

DIMENSIONAMENTO E PERDA DE CARGA DE UMA REDE A VAPOR EM UMA FÁBRICA DE CERA DE CARNAÚBA (*Copernicia prunifera* (Miller) H. E. Moore)

Felipe Melo Lima (UNIFACID - PI) E-mail: felipe70melo@outlook.com
Francisco Rafael Campos de Macêdo (UNIFACID - PI) E-mail: rafaelcamposprofufpi@gmail.com

Resumo: O estudo realizado faz análise da rede de vapor, estudando-se sua perda de carga consequente do vapor utilizado na fábrica de cera. A caldeira utilizada na empresa tem capacidade de trabalho com a pressão máxima de 10kgf/cm², porém a mesma só utiliza 80% de sua capacidade, trabalhando na pressão de 8,0 kgf/cm². A tubulação utilizada para fazer o transporte do vapor da saída da caldeira até o ponto de consumo, o seu primeiro trecho encontra-se bem dimensionada, mas no segundo trecho não estar bem dimensionada, havendo um aumento na velocidade do fluido. O presente trabalho focou no estudo da perda de carga, bem como fazer um redimensionamento para o segundo trecho da tubulação, afim de reduzir a perda de carga. Uma vez que o correto dimensionamento proporciona economia no consumo de combustível e água, e o dimensionamento incorreto interfere direto no transporte e utilização do vapor. Para realiza-se os cálculos, dados como manual e especificação da caldeira foram essenciais para a análise de dados, em seguida foi feito a medida da rede de vapor, logo depois foi realizado cálculos para a análise da situação da tubulação e sua atual perda de carga. Em seguida foi feito um redimensionamento para o segundo trecho da tubulação, onde apresentou uma melhoria de 20% na entrega do transporte de vapor.

Palavras-chave: perda de carga em tubulações, vapor, geração de vapor, dimensionamento de tubulações.

DIMENSIONING AND PRESSURE DROP OF A STEAM NETWORK IN A CARNAUBA WAX FACTORY (*Copernicia prunifera* (Miller) H. E. Moore)

ABSTRACT: The study carried out analyzes the steam network, studying its pressure loss resulting from the steam used in the wax factory. The boiler used in the company has a working capacity with a maximum pressure of 10 kgf/cm², but it only uses 80% of its capacity, working at a pressure of 8.0 kgf/cm². The piping used to transport steam from the boiler outlet to the point of consumption, its first section is well sized, but in the second section it is not well sized, with an increase in fluid velocity. The present work focused on the study of head loss, as well as redimensioning the second section of the pipeline, in order to reduce head loss. Since the correct sizing provides savings in fuel and water consumption, and incorrect sizing directly interferes with the transport and use of steam. To carry out the calculations, data such as manual and boiler specification were essential for data analysis, then the measurement of the steam network was performed, then calculations were performed to analyze the situation of the pipe and its current loss of charge. Then, a redimensioning was carried out for the second section of the pipeline, which presented a 20% improvement in the delivery of steam transport.

Keywords: loss of head pipes, steam, steam generation, dimensioning of pipes

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente necessidade do melhor aproveitamento de energia em processos industriais, visando ter uma redução dos custos pela geração envolvidos na produção e uma diminuição do impacto ambiental causados pela geração de energia utilizada, vários são os fatores que podem ser acatados para que este desejo seja alcançado (PEDERIVA; MATTIONI; MICHELS, 2013). O vapor tem uma grande importância como fonte de industrial de calor. O vapor além de ser uma energia limpa proporciona um aquecimento rápido e uniforme. Um aquecimento a vapor apresenta 1,5 a 2 vezes mais eficiência do que aqueles utilizam água quente (SEGUNDO, 2014).

O vapor é utilizado como meio de transmissão de energia desde a Revolução Industrial. À princípio, utilizava-se vapor no preparo de alimentos. Hoje, o vapor tornou-se uma ferramenta flexível e versátil para a indústria quando se necessita de aquecimento (SPIRAX SARCO, 2005). O sistema de distribuição de vapor é, sem dúvidas, o mais importante elo de ligação entre o produtor (caldeira), e o consumidor de vapor (SARCO SUL AMERICANA, 1975). O sistema de distribuição é nada menos que o sistema de vias de transporte que interliga os pontos de produção e de utilização (DAUMICHEN, 1975).

De acordo com Daumichen (1975) dimensionamento de tubulações pode ser feito levando em consideração a velocidade ou então a perda de carga, isto é, determinar-se qual a velocidade ou perda de carga desejada para determinar uma vazão, e com esses dados, calcula-se o diâmetro necessário. As tubulações de vapor de devem ser montadas no mais nivelado possível, para se evitar o acúmulo de condensado nas mesmas. Caso seja possível, deve-se prever uma inclinação no sentido do fluxo. Uma rede de vapor quando mal dimensionada a acarretará no maior consumo de vapor, maior consumo de combustível e maior custo de produção.

De acordo com Sarco Sul Americana (1975) torna-se evidente, que a tubulação deve ser instalada com o diâmetro conveniente para uma dada vazão de vapor. Se subdimensionada, teremos erosão provocada por velocidade excessiva, e alta perda de carga. Se superdimensionada, teremos elevação considerável no custo inicial da instalação, embora isso não prejudique, de forma alguma, o funcionamento da mesma. O dimensionamento do diâmetro das tubulações é quase sempre um problema de hidráulica, resolvido em função da vazão necessária do fluido, das diferenças de cota existentes, das pressões disponíveis, das velocidades e perdas de cargas admissíveis, da natureza do fluido e do material e do tipo de tubulação (TELLES, 2006).

O presente trabalho foca no estudo das perdas de cargas e no dimensionamento da tubulação, responsável pela a distribuição de vapor, entre a caldeira e o consumidor final, a extração. A rede estudada foi encontrada uma perda de carga considerável, mas com a necessidade de diminuir mais a perda de carga, foi feito um novo dimensionamento na tubulação onde pode-se encontra uma melhora na distribuição do vapor

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado em um fábrica de cera de carnaúba (*Copernicia prunifera* (Miller) H. E. Moore), no município de Campo Maior – PI (04°49'40''S e 42°10'07''W). A pesquisa ocorreu no período de julho até setembro de 2021, onde era realizado o período de estágio do autor.

Para a medição da rede de vapor foi utilizada uma trena de 15 metros, onde foi medido da saída da caldeira até o consumidor final, encontrando-se o comprimento de 80 metros de tubulação. Com as sobras dos tubos que estavam armazenadas no depósito da fábrica, foram medidos o diâmetro das tubulações, com o auxílio do parquímetro. A rede de vapor é composta por dois tipos de tubos, o de 154,08mm (6 polegadas) que é o da saída da caldeira, que corresponde a 15 metros do comprimento da tubulação, depois tem a redução para o tubo de 102,26mm (4 polegadas) onde é percorrido até o ponto final, que a mesma corresponde a 65 metros do comprimento da tubulação.

Para realizarmos os cálculos da perda de carga que estão ocorrendo na tubulação, se faz necessário conhecer o tipo do gerador de vapor (caldeira). A caldeira utilizada na empresa é do tipo mista, utiliza-se como combustível, lenhas em toras e a borra da palha de carnaúba, que é transformado em briquetes, na máquina de briquetes que possui na fábrica. Dados como produção de vapor, pressão máxima (PMTA), e temperatura, são fornecidos pelo o manual da caldeira.

3 **CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA**

3.1 **FUNCIONAL**

Capacidade Prod. Vapor:8000..... kg/h c/ água a20..... °C

Vapor: Saturado Superaquecido a179..... °C

MPTA: 10 kg/cm²

Combustível (Fonte de Calor):

Normal: Lenha

Auxiliar: Cavaco, serragem

Fonte: Manual da caldeira

Figura 1 – Caracterização técnica da caldeira



Fonte: Manual da caldeira

Figura 2 – Especificação da caldeira

A caldeira tem a capacidade de produção de 8000 kgv/h, com pressão a 10 kgf/cm², mas as condições do uso de vapor na fábrica não permitem a caldeira trabalhar com sua pressão máxima. Por meio disso foi feita uma regra de três para a dedução da vazão de vapor que a mesma produz, trabalhando com a pressão que a empresa utiliza que é de 8,0 kgf/cm². Montou-se uma tabela com a dedução da vazão de vapor.

Tabela 1 – Valores da pressão em função da vazão

PRESSÃO (kgf/cm ²)	VAZÃO DE VAPOR (kgv/h)
8,0	6400
9,0	7200
10	8000

Fonte: Autoria própria (2021)

Para os cálculos da rede de vapor, dividiu-se em duas partes, a primeira parte é a parte do tubo de 6 polegadas e a segunda parte é a do tubo de 4 polegadas. Após a coleta de todas as informações partiu-se para os cálculos. Primeiro calcula-se a velocidade do vapor na tubulação. Depois calcula-se o número de Reynolds e por último calcula-se a perda de carga linear e nas singularidades.

Para calcular a velocidade do vapor na tubulação, utiliza-se a equação 1:

$$Q = \rho \cdot A \cdot v$$

Q → Vazão

$\rho \rightarrow$ Densidade do fluido (kg/m^3) \rightarrow (Tabelado)

$A \rightarrow$ Área interna do tubo (m)

$V \rightarrow$ Velocidade do fluido (m/s)

Depois de calculada a velocidade, calcula-se número o de Reynolds, que é dado pela equação 2:

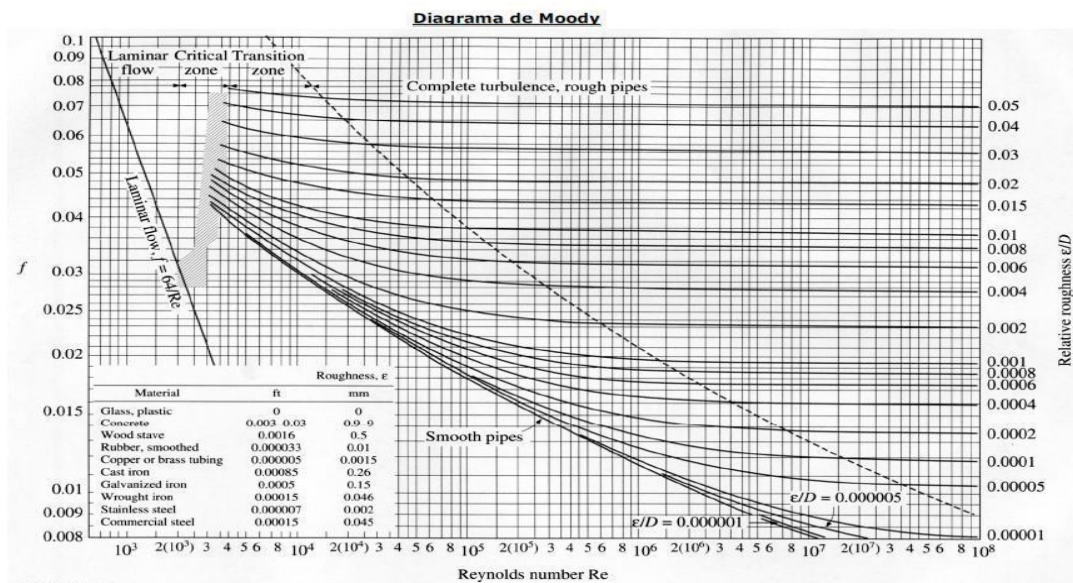
$$Re = \frac{v * D}{\vartheta}$$

$Re \rightarrow$ Número de Reynolds

$D \rightarrow$ Diâmetro interno do tubo (m)

$\vartheta \rightarrow$ Viscosidade cinemática (m^2/s) \rightarrow (Tabelado)

Após calcular-se Reynolds, precisa-se encontrar o coeficiente de atrito (f) e a rugosidade do tubo. É encontrado através do diagrama de Moody – Rouse.



Fonte: Google.

Figura 3 – Diagrama de Moody - Rouse

Depois de analisar o gráfico e encontrar o coeficiente de atrito e a rugosidade do tubo, partiu-se para o último passo, calcular a perda de carga linear e a localizada em suas singularidades. É dada pela as equações 3 e 4:

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho * v^2}{2}$$

$hf \rightarrow$ Perda de carga linear (Pascal) \rightarrow (Pa)

$f \rightarrow$ Coeficiente de atrito

$L \rightarrow$ Comprimento da Tubulação

$$hs = ks \cdot \frac{\rho * v^2}{2} * n$$

h_s → Perda de carga na singularidades

k_s → Coeficiente perda de carga singular → (Tabelado)

n → Número de singularidades

3. RESULTADOS

Para calcularmos a perda de carga na tubulação estudada, foram feitas algumas análises, como citados na parte de materiais e métodos desse artigo. A caldeira possui a pressão máxima de trabalho de 10 kgf/cm^2 , mas com as condições de trabalho e uso na fábrica não permite que ela trabalhe como toda essa pressão. Atualmente a caldeira trabalha com a pressão de $8,0 \text{ kgf/cm}^2$.

De acordo com a dedução que foi feita, descrita na tabela acima, a caldeira com essa pressão, tem uma vazão de vapor de 6400 kg/h ou $1,777 \text{ kg/s}$, com a temperatura de 170°C . A tubulação foi dividida em duas partes. Calculando-se a primeira parte da tubulação, começaremos pela a velocidade, que é descrita pela a equação 1:

$$Q = \rho \cdot A \cdot v$$

$$1,777 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 4,162 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{\pi * 0,15408^2}{4} * v$$

$$v = 23 \text{ m/s}$$

Velocidades usuais do vapor saturado, pode-se indicar 20 a 30 m/s (DAUMICHEN, 1975). Percebe-se que a velocidade na primeira parte do trecho estar dentro do recomendado, mesmo com a caldeira não trabalhando com sua pressão máxima. Logo em seguida é realizado o cálculo do número de Reynolds, de acordo com a equação 2:

$$Re = \frac{v * D}{\nu}$$

$$Re = \frac{23 * 0,15408}{14,68 * 10^{-6}}$$

$$Re = 2,41 * 10^5$$

Calculando-se a rugosidade relativa do tubo:

$$\frac{\varepsilon}{D}$$

$$\frac{0,045 \text{ mm}}{154,08 \text{ mm}} = 0,0002 \text{ (rugosidade)}$$

Fazendo a análise no diagrama de Moody – Rouse, encontraremos o coeficiente de atrito, $(f) = 0,0165$. Após encontramos o valor do atrito, calculamos o valor da perda de carga no primeiro trecho.

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

$$hf = 0,0165 * \frac{15}{0,15408} * \frac{4,162 * 23^2}{2}$$

$$hf = 1768 \text{ Pa}$$

Depois de obtida a perda de carga no primeiro trecho da tubulação, calculou-se a perda de carga nas singularidades do primeiro trecho da tubulação, como a rede de vapor em sua primeira parte possuem 3 cotovelos de 90°, o coeficiente de singularidade para os cotovelos de 90° é de (0,9) e como também possui uma curva de 45°, o coeficiente é de (0,4). O valor de cada coeficiente é tabelado. Calculamos através da equação 4:

$$hs = ks \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} * n$$

$$hs = 0,9 * \frac{4,162 * 23^2}{2} * 3$$

$$hs = 2972 \text{ Pa}$$

$$hs = 0,4 * \frac{4,162 * 23^2}{2} * 1$$

$$hs = 440 \text{ Pa}$$

Somando-se a perda de carga nas singularidades, temos um valor de 3412 Pa, mas como a perda total na primeira seção se dar pela a soma de *hf* e *hs*, a tubulação do primeiro trecho tem a perda de carga total de 5180 Pa.

Para a segunda seção, onde temos o comprimento de 65 metros, tomamos o mesmo procedimento da primeira, altera-se apenas o diâmetro da tubulação, pois ocorre uma redução na rede de vapor, como a vazão é a mesma, começa calculando-se a velocidade do fluido, através da equação 1:

$$1,777 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 4,162 \frac{\text{k}}{\text{m}^3} * \frac{\pi * 0,10226^2}{4} * v$$

$$v = 52,3 \text{ m/s}$$

Nota-se que temos um aumento na velocidade devido à redução do diâmetro do tubo, em seguida calcula-se novamente o Reynolds, e a rugosidade do tubo.

$$Re = \frac{52,3 * 0,10226}{14,68 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 3,4 \times 10^5$$

$$\frac{0,045 \text{ mm}}{102,26 \text{ mm}} = 0,0004 \text{ (rugosidade)}$$

Voltando-se ao diagrama de Moody, encontraremos novamente o coeficiente de atrito, ao qual encontramos no valor de $f=0,0171$. Depois de sabermos o coeficiente de atrito, calcula-se a perda de carga no trecho 2.

$$hf = 0,0171 \cdot \frac{65}{0,10226} \cdot \frac{4,162 * 52,3^2}{2}$$

$$hf = 61869 Pa$$

Nas singularidades da segunda seção, a rede também possui cotovelos de 90° e curva de 45°, partindo desse pressuposto calcula-se a perda de cada singularidade.

$$hs = 0,9 \cdot \frac{4,162 * 52,3^2}{2} * 7$$

$$hs = 35860 Pa$$

$$hs = 0,4 \cdot \frac{4,162 * 52,3^2}{2} * 2$$

$$hs = 4553 Pa$$

Somando-se as perdas de cargas linear e singulares na seção 2 da tubulação, encontrou-se o valor de 102282 Pa. A perda de carga completa na rede de vapor é a soma das seções 1 e 2, então nesse caso foi encontrado ao longo de toda rede o valor da perda de carga, que foi de 107462 Pa.

Por ação do aumento da velocidade do vapor no trecho 2, ocasionado devido a redução do diâmetro da tubulação, foi obtido uma perda de carga considerável no sistema, onde foi feita uma conversão de Pascal (Pa) para kgf/cm^2 , encontrando-se o valor de 1,09 kgf/cm^2 . Foi feita a conversão através da equação:

$$H_{pt} = 107462 Pa * (1,02 \times 10^{-5})$$

Isso implica a dizer, como a pressão inicial de trabalho da caldeira é de 8,0 kgf/cm^2 , até o vapor percorrer os 80 metros da tubulação da rede de vapor, haverá uma perda de pressão ou carga de 1,09 kgf/cm^2 .

Com o a intenção de reduzir mais a perda de carga, fez-se um novo dimensionamento optando por uma tubulação de diâmetro único, o diâmetro do tem de permitir o escoamento do fluido a uma velocidade entre 20 a 30 m/s. Como a caldeira tem de trabalho máximo 10 kgf/cm^2 de pressão, e em algum futuro próximo possa-se utilizar essa pressão. Pegando os dados das deduções que foi feita na tabela 1, temos que a vazão de vapor com a pressão máxima é de 8000 kgv/h , transformando para o Sistema Internacional (S.I), temos 2,222 kg/s . A partir desses dados, partiu-se para os cálculos. Para a obtenção do diâmetro, tomamos por base a equação 1.

$$Q = \rho \cdot A \cdot v$$

$$2,222 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 4,162 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{\pi * D^2}{4} * 30$$

$$D = 0,1503m$$

Consultando-se catálogos de tubos comerciais, percebeu-se que o tubo comercial mais próximo ao diâmetro calculado é de 0,15408 metros de diâmetro interno, que corresponde

ao tubo de 6 polegadas, tubo já instalado na caldeira. Depois calcula-se a velocidade de escoamento do fluido na nova tubulação de trecho único.

$$2,222 \frac{kg}{s} = 4,162 \frac{kg}{m^3} * \frac{\pi * 0,15408^2}{4} * v$$

$$v = 28,6 \text{ m/s}$$

Com a velocidade de escoamento do fluido e o diâmetro da tubulação definidos, calculou-se o Reynolds para a nova tubulação.

$$Re = \frac{28,6 * 0,15408}{14,68 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 3,0 \times 10^5$$

Faz-se novamente a consulta no diagrama para encontrar o coeficiente de atrito, onde encontrou-se um coeficiente de $f = 0,0165$. Como agora não existe mais diferença de tubulação, o cálculo da perda de carga, foi calculado apenas em duas etapas, calculando-se a perda de carga linear e a perda em suas singularidades.

$$hf = 0,0165 * \frac{80}{0,15408} * \frac{4,162 * 28,6^2}{2}$$

$$hf = 14582 \text{ Pa}$$

$$hs = 0,9 * \frac{4,162 * 28,6^2}{2} * 10$$

$$hs = 15319 \text{ Pa}$$

$$hs = 0,4 * \frac{4,162 * 28,6^2}{2} * 2$$

$$hs = 1361 \text{ Pa}$$

Somando-se as perdas de cargas da nova tubulação, ao qual o somatório dar-se pela a perda linear e suas singularidades, encontrou-se o resultado de 31262 Pa. Convertendo-se de Pa para kgf/cm^2 , chegou-se ao valor de $0,318 \text{ kgf/cm}^2$. A conversão foi dada através da equação:

$$H_{pt} = 31262 \text{ Pa} * (1,02 \times 10^{-5})$$

Como a nova tubulação tem o diâmetro interno de 154,08 mm, o rendimento da caldeira aumentará aproximadamente 98%, pois na saída da caldeira teremos uma pressão de 10 kgf/cm^2 e no final da tubulação o vapor chegará com uma pressão de $9,68 \text{ kgf/cm}^2$. De acordo com Sarco (2005) recomenda-se uma perda de carga de $0,08 \text{ kgf/cm}^2$ a cada 100 metros de tubulação. Como nesta tubulação o seu comprimento total é de 80 metros, dimensionamento ficou dentro do recomendável, sendo aceitável.

4. CONCLUSÃO

No término deste trabalho, desenvolveu-se dimensionamento da tubulação da rede de vapor da fábrica estudada, onde comprovou-se através de cálculos, os quais apresentaram

uma diferença entre a eficiência atual da tubulação e a nova tubulação dimensionada corretamente. Pois o dimensionamento correto mostrou-se uma eficiência de 20% de melhoria na passagem do vapor na tubulação, onde a tubulação atual opera-se com uma eficiência de 80%. Analisado todos os métodos e processo para o dimensionamento, tendo como objetivo verificar e propor melhorias, assim evitando desperdício de combustível e água. Pois uma rede de tubulação mal dimensionada, ocasiona mais consumo de combustível e água, assim gera prejuízo para a empresa. Analisando a metodologia aplicada para o dimensionamento, observou-se que coletas de dados necessária para o dimensionamento foi muito importante para que os resultados fossem alcançados. Todo o processo seguiu literaturas e catálogos de empresa especializada no ramo de vapor, eficiência energética, dimensionamento de tubulações, entre outras. O novo dimensionamento realizado seguiu os padrões de recomendações de manuais específico para esse tipo de estudo. Para realizar o dimensionamento de tubulações, leva-se em conta a velocidade do fluido e a perda de carga, foi aplicado um diâmetro correto da tubulação, para reduzir-se a perda de carga na tubulação total.

5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DAUMICHEN, Ricardo V. H. Curso Sobre Distribuição de Vapor. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, 1975.

PEDERIVA. A. C.; MATTIONI. R.; MICHELS. A. Dimensionamento de uma tubulação de vapor para uma fábrica de ração animal. 3ª SEMANA INTERNACIONAL DAS ENGENHARIAS DA FAHOR, 2013.

MARTINELLI, Luiz Carlos Jr. Geradores de Vapor. Ijuí, 2003.

SARCO SUL AMERICANA. Curso Sobre Distribuição de Vapor. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, 1975.

SARCO, Spirax. Apostila de Distribuição de Vapor. Cotia, 1999

SARCO, Spirax. Bem-vindo ao mundo do vapor. 2005

SEGUNDO, Valdir B.S. Princípio de balanços termoenergéticos em caldeiras geradoras de vapor nas industrias sucroalcooleiras. 2014.

TELLES, P. Tubulações Industriais: Cálculo. 9. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2006.