

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE INCRUSTAÇÃO EM TURBINAS A VAPOR¹

Jonas Pedro Caumo ²

Resumo

Esse trabalho apresenta uma metodologia baseada na lei do cone de Stodola para avaliação de incrustação de turbinas a vapor através de parâmetros operacionais. O principal ponto é avaliar a pressão de câmara de roda da turbina e comparar com outros dados usando esta metodologia. Esta análise também é válida para avaliar a vazão de vapor na admissão da turbina. A fórmula matemática usada utiliza a relação entre as pressões da turbina e a vazão de admissão. Para questões de manutenção esta ferramenta torna-se relevante, pois permite avaliar a necessidade de grandes intervenções em turbina a vapor. Uma dessas intervenções é a abertura da carcaça que é um trabalho que necessita de um período longo além de ser bastante trabalhosa. Esta metodologia também permite a avaliação da condição da turbina a vapor ao longo do tempo. Ela também pode auxiliar na calibração do instrumento de medição da vazão. Foram feitas comparações entre esta metodologia e o cálculo aerodinâmico completo de uma turbina além de dados medidos na prática.

Palavras-chave: Turbina a vapor; Manutenção; Termodinâmica; Aerodinâmica.

METHODOLOGY TO ANALYSE INCRUSTATION ON STEAM TURBINES

Abstract

This work shows a methodology based on the Stodola's cone law for the evaluation of incrustation on steam turbines with operational parameters. The main point is to evaluate the wheel chamber pressure of the turbine and compare with other data using this methodology. This analysis is also valid to evaluate the inlet steam flow rate of the turbine. The mathematical formulation used utilizes the relation between turbine pressures and inlet steam flow rate. For maintenance purposes this tool becomes relevant, because it allows evaluating the need for big interventions on steam turbines. One of these interventions is the casing opening, which is a work that needs a long period besides it is very laborious. This methodology also allows the evaluation of the steam turbine condition through time. It also permits helping the calibration of the steam flow rate instrument. Comparisons were made between this methodology and the complete aerothermodynamics calculation of the turbine besides practical measured data.

Keywords: Steam turbine; Maintenance; Thermodynamics; Aerodynamics.

¹ Contribuição técnica ao 34º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 28º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 28 a 30 de agosto de 2013, Vitória, ES.

² Engenheiro mecânico, Engenheiro de Projetos, TGM Turbinas. Sertãozinho, São Paulo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Esse trabalho descreverá uma metodologia de cálculo e análise das condições de vapor de operação da turbina para posterior diagnóstico da mesma.

Com base nos parâmetros de vapor que são parte da operação da turbina será possível mensurar e identificar a condição de incrustação e parte de sua eficiência.

Culminando na tomada de decisão de abertura ou não da turbina.

Atualmente as questões de eficiência e manutenção estão cada vez mais presentes no cotidiano das empresas que utilizam e geram energia, por isso, metodologias como a apresentada neste trabalho se tornam tão importantes.

Serão vistos e analisados:

- a história e desenvolvimento teórico da metodologia;
- quais são os parâmetros de operação necessários para esta análise;
- como utilizar esses dados para o cálculo; verificar as equações utilizadas;
- como analisar o resultado deste cálculo;
- será mostrado um exemplo prático;
- conclusões e discussões que norteiam o tema serão apresentadas.

2 METODOLOGIA

A metodologia apresentada neste trabalho foi desenvolvida pelo engenheiro Aurel Stodola, o mesmo desenvolveu uma relação entre as pressões de admissão, escape e pressões internas com a vazão mássica de vapor que é admitida na turbina.

Segundo Schegliáiev⁽¹⁾ e Traupel⁽²⁾ as equações podem ser deduzidas e seguem o raciocínio matemático demonstrado abaixo:

Em uma turbina a vapor a seguinte relação descreve a vazão dentro da turbina para um estágio qualquer que opera com velocidades críticas:

$$G = A\sqrt{p/v}$$

Pode-se entender vazão crítica com a vazão máxima que passa através da área de passagem dos estágios da turbina, ou seja, a vazão na qual a velocidade do vapor é igual à velocidade do som para aqueles parâmetros de vapor. E esta vazão não é alterada em função da variação da pressão de saída do estágio, ou seja, só depende dos parâmetros do vapor na entrada do estágio.

Através da equação acima se pode demonstrar que para um ponto de carga conhecido a relação do mesmo com outro ponto de carga pode ser descrita através das equações abaixo:

$$\frac{G}{G_0} = \sqrt{\frac{p_{01}v_{01}}{p_{00}v_{00}}} \approx \frac{p_{01}}{p_{00}} \sqrt{\frac{T_{00}}{T_{01}}} \sqrt{\frac{x_{00}}{x_{01}}} = \varepsilon_{01} \sqrt{\frac{T_{00}}{T_{01}}} \sqrt{\frac{x_{00}}{x_{01}}}$$

No caso para o qual nenhum dos estágios opera com vazão crítica, o seguinte equacionamento pode ser usado:

$$\left(\frac{G}{G_0}\right)^2 [(p_{00})_i^2 - (p_{20})_i^2] = (p_{01})_i^2 - (p_{21})_i^2$$

Se for considerada a soma destas relações ao longo de toda a turbina, a equação resultante assume a seguinte forma:

$$\left(\frac{G}{G_0}\right)^2 \sum_1^z [(p_{00})_i^2 - (p_{20})_i^2] = \sum_1^z [(p_{01})_i^2 - (p_{21})_i^2]$$

Todos os valores intermediários de pressão se excluem, pois a pressão do final para estágio i é igual a pressão inicial do estágio $i + 1$, portanto:

$$\frac{G}{G_0} = \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_{z1}^2}{p_{00}^2 - p_{z0}^2}}$$

A visualização gráfica desta equação é um cone, por isso, que esta metodologia é conhecida como lei do cone de Stodola.

A equação acima também pode ser entendida como uma relação que é mantida constante mesmo ao comparar os parâmetros de pontos de carga diferentes, ou seja:

$$K = \frac{G_0^2}{(p_{00}^2 - p_{z0}^2)}$$

Ao utilizar as equações acima na análise de uma turbina a vapor as seguintes hipóteses e considerações podem ser utilizadas:

p_{01} = pressão de vapor de câmara de roda medida (depois do estágio de regulagem)

p_{z1} = pressão de vapor de escape da turbina medida

p_{00} = pressão de vapor de câmara de roda conhecida (ponto de projeto)

p_{z0} = pressão de vapor de escape da turbina conhecida (ponto de projeto)

G = vazão de vapor de admissão medida

G_0 = vazão de vapor de admissão conhecida (ponto de projeto)

A partir de um projeto de turbina a vapor são conhecidos os valores das pressões de vapor mencionados acima e, portanto a partir do projeto pode ser definida essa constante K que deve ser mantida ao longo da operação, ou seja, em diversos pontos de carga com os parâmetros acima esse valor deve ser mantido, caso isso não ocorra devem ser investigados os fenômenos que podem causar essa diferença e durante a operação na turbina, os mesmos podem ter alterado a mesma internamente, esses fenômenos serão discutidos posteriormente neste trabalho, um deles é a incrustação.

Com base nesta análise e nas diferenças encontradas entre os valores da constante K é possível tomar a decisão de abrir ou não a turbina e reformá-la.

Ao longo do tempo a turbina pode sujar pelas condições do vapor, por algum objeto estranho ou mesmo desgastar alterando assim a sua geometria, culminando,

portanto em uma alteração na área de passagem o que faz com que as pressões no interior da turbina sejam modificadas com relação ao valor esperado pelo cálculo do cone de Stodola.

3 CASOS APLICADOS

3.1 Turbina a Vapor de Reação e Condensação

Durante a operação de uma turbina a vapor, suspeita-se que a mesma operou com vapor fora dos limites de composição química recomendada e, portanto, que a mesma está incrustada diminuindo assim a capacidade de vazão de admissão de vapor e gerando uma potência menor que a esperada para a mesma pressão de câmara da roda.

Decidiu-se então mensurar dados em campo para através da metodologia do cone de Stodola calcular a pressão de câmara de roda que deveria ser correspondente ao valor medido dos parâmetros de vapor encontrados, como pressões, temperaturas etc.

Usando a equação que define o valor de K e os parâmetros de projeto, calculou-se este valor.

Mantendo esse valor constante e usando a equação que define a relação entre as vazões (conhecida e medida) $\frac{G}{G_0}$ calcula-se então o valor de pressão de câmara de roda pela lei do cone de Stodola a partir dos parâmetros de vapor medidos.

O cálculo aerotermodinâmico completo também foi feito para este caso, considerando todas as novas condições da turbina operando fora do ponto de projeto, os dois resultados serão apresentados em forma de tabela.

Tabela 1. Dados medidos e calculados a partir de parâmetros de vapor real para uma turbina a vapor

Ponto		Projeto	1	2	3	4	5	6	7
Pressão de admissão (medida)	kgf/cm ² (g)	-	64,60	60,98	63,02	65,26	65,83	65,60	63,41
Pressão de admissão (medida)	bar(a)	67	64,36	60,81	62,81	65,01	65,57	65,34	63,20
Temperatura de admissão (medida)	°C	520	514,6	508,4	521,3	521,6	519,0	515,4	511,6
Vazão na admissão (medida)	kg/h	107000	75240	72290	74440	75440	75670	75540	74420
Pressão da câmara da roda (medida)	kgf/cm ² (g)	-	47,39	44,76	46,25	47,94	48,36	48,21	46,60
Pressão da câmara da roda (medida)	bar(a)	46,1	47,49	44,91	46,37	48,03	48,44	48,29	46,71
Pressão da câmara da roda (cálculo completo)	bar(a)		32,08	30,75	31,95	32,32	32,33	32,20	31,69
Pressão da câmara da roda (Stodola)	bar(a)	46,10	32,42	31,15	32,07	32,50	32,60	32,55	32,06
Pressão de escape (medida)	kgf/cm ² (g)	-	-0,71	-0,72	-0,71	-0,69	-0,69	-0,69	-0,7
Pressão de escape (medida)	bar(a)	0,15	0,32	0,31	0,32	0,34	0,34	0,34	0,33
Vazão no escape	kg/h	107000	75240	72290	74440	75440	75670	75540	74420
Potência (medida)	kW	-	28900	29000	28240	29080	29080	28070	28060

4 DISCUSSÃO

4.1 Turbina a Vapor de Reação e Condensação

Observa-se que os dados calculados pelo cálculo termodinâmico completo são bem próximos ao calculado pela lei do cone de Stodola, metodologia apresentada neste trabalho.

A partir dos resultados obtidos é possível verificar e afirmar que esta turbina possui uma obstrução no fluxo de vapor ao longo da turbina, pois o valor de câmara de roda esperado correspondente ao valor de vazão de vapor medido deveria ser menor, esse resultado pode ser visto tanto no cálculo aerotermodinâmico completo como no cálculo feito pela lei do cone de Stodola.

Na Figura 1 observa-se o injetor desta turbina.



Figura 1. Injetor ou primeiro estator da turbina a vapor em análise.

Observa-se que a área de passagem da turbina em análise está incrustada e com amassamento causando restrição na passagem de vapor pelo canal aerotermodinâmico, confirmando a suspeita que os resultados indicavam.

5 CONCLUSÃO

O caso apresentado neste trabalho, assim como outros casos que utilizarem a metodologia acima, permitem concluir que:

- A metodologia acima é simples e de fácil utilização, traz resultados que permitem uma boa análise da situação de uma turbina a vapor;
- Esta metodologia é relevante e permite que decisões sobre abertura ou não de turbinas a vapor sejam feitas de maneira rápida com boa precisão, tornando-se assim uma ótima ferramenta para profissionais que trabalham com manutenção;
- Esta metodologia permite também avaliar e auxiliar na calibração de instrumentos de medição de vazão;
- Como a questão de eficiência torna-se um assunto cada vez mais em voga, metodologias como essa se tornam extremamente importantes e servem para acompanhamento da condição da turbina, trabalhando assim como ferramenta no caso de manutenção preditiva e preventiva;
- Se o operador da turbina não tiver em mãos os dados de projeto originais da turbina, é possível realizar um teste no qual se sabe que a turbina está limpa e obter os parâmetros necessários para cálculo da constante K e assim ao longo do tempo avaliar a condição da mesma;
- Além de incrustação outros fenômenos também podem causar estes tipos de problema ou variação da pressão de câmara de roda como objetos estranhos que atrapalham e impedem a passagem de vapor pelas palhetas e no caso de degradação o efeito causa é contrário, ou seja, a pressão medida será menor que a calculada.

REFERÊNCIAS

- 1 SCHEGLIÁIEV, A. V. La teoría del preceso térmico y las construcciones de turbinas. Moscou: Editora Mir, 1978 cap. 7, p. 9-50.
- 2 TRAUPEL, W. Termische turbomaschinen: Zweiter Band: regelverhalten, festigkeit und dynamische problem. Berlin: Springer-Verlag, 1968, temperaturprobleme. Berlin: Springer, 1981 cap. 12, p. 1-53.