

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

METODOLOGIA PARA DETECÇÃO DE ARRASTE DE ÁGUA COM PLACA DE
ORIFÍCIO EM LINHA DE VAPOR SATURADO PARA PROTEÇÃO DE
MICROTURBINA USADA EM COGERAÇÃO

por

Gabriel Grazziotin

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2020

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Grazziotin, Gabriel

Metodologia para detecção de arraste de água com placa de orifício em linha de vapor saturado para proteção de microturbina usada em cogeração / Gabriel Grazziotin. -- 2020.

25 f.

Orientador: Alexandre Vagtinski de Paula.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Vapor. 2. Lockhart-Martinelli. 3. Over-reading. 4. TRP. 5. Arraste de água. I. Vagtinski de Paula, Alexandre, orient. II. Título.

Gabriel Grazziotin

METODOLOGIA PARA DETECÇÃO DE ARRASTE DE ÁGUA COM PLACA DE
ORIFÍCIO EM LINHA DE VAPOR SATURADO PARA PROTEÇÃO DE
MICROTURBINA USADA EM COGERAÇÃO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Comissão de Avaliação:

Prof. Cirilo Seppi Bresolin

Prof. Guilherme Henrique Fiorot

Prof. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, novembro de 2020

DEDICATÓRIA

Primeiramente, dedico aos meus amigos de longa data Mauricio, Walter e Caroline, assim como meus amigos da primeira série que mantenho o contato até hoje. Tenho certeza que com a amizade que tenho com vocês, tudo na vida fica mais fácil. Agradeço ao apoio, carinho e grande confiança de vocês.

Aos professores por todo compartilhamento de conhecimento e dedicação, eterna gratidão.

Dedico aos meus colegas e também amigos do peito que conheci dentro do curso da Engenharia Mecânica. Nossa parceria ajudou, e muito, a passar por toda a trajetória.

Ainda, dedico este trabalho à minha família. Mesmo em tempos de dificuldade, me mostrou que amor, confiança e dedicação são capazes de vencer qualquer obstáculo.

Acima de tudo, dedico este trabalho à minha mãe Nelci e meu pai Fabiano. Sempre me motivaram e incentivaram ao estudo, mostrando quais caminhos são os mais dignos a uma vida de paz. Por toda sua dedicação comigo, fazendo com que nada me faltasse, este trabalho foi feito pensando em vocês.

EPÍGRAFE

*Aprender é a única coisa que a mente
nunca se cansa,
nunca tem medo
e nunca se arrepende*

Leonardo da Vinci

**METODOLOGIA PARA DETECÇÃO DE ARRASTE DE ÁGUA COM
PLACA DE ORIFÍCIO EM LINHA DE VAPOR SATURADO PARA
PROTEÇÃO DE MICROTURBINA USADA EM COGERAÇÃO**

Grazziotin, Gabriel

ggabrielgrazziotin@gmail.com

***Resumo.** Cada vez mais o mercado de aproveitamento energético vem ganhando espaço em indústrias, visando redução de gastos e descarga de efluentes. Nessa linha, as Turbinas Redutoras de Pressão (TRP) aproveitam a energia desperdiçada por válvulas redutoras de pressão, localizadas logo após a caldeira, para gerar energia elétrica – sem alterar o processo requerido pela fábrica. Este tipo de equipamento está sujeito a sofrer golpes de água em seu rotor devido a grandes variações de processo ao longo de um dia. Desta forma, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma metodologia para detecção de condensado no escoamento, fazendo uso de uma placa de orifício cuja seleção teve intenção de apenas definir suas dimensões. Com as dimensões da placa de orifício, foi possível definir a perda de carga imposta por ela ao escoamento. Também, utilizando uma correlação entre over-reading e o parâmetro Lockhart-Martinelli, foi possível determinar valores específicos de pressão diferencial que indicassem a presença de condensado em excesso sendo arrastado na tubulação.*

***Palavras-chave:** vapor, Lockhart-Martinelli, over-reading, TRP, arraste de água*

Methodology for water drag detection with orifice plate used in steam saturated line for protection of microturbine used in cogeneration

***Abstract.** Every day the heat waste recovery market becomes more important to the industry at any sector, always aiming expenses reduction and waste emission. With that being said, the Pressure Reducer Turbine (PRT) uses the energy wasted by pressure reducer valves (PRV), located after the steam generator, to generate electric power with no modification in the plant process. This kind of equipment may suffer water hits at its rotor due to great variation in process during a day. That way, this paper develops a methodology for detection of condensate in the steam flow, using only an orifice plate where the main parameter used for plate selection is pressure drop imposed to the flow. Also, using a correlation between the over-reading and the Lockhart-Martinelli parameter was possible to determine specific values for pressure drop that indicates the presence of condensate being dragged along the steam line.*

***Keywords:** steam, Lockhart-Martinelli, over-reading, PRT, water drag*

SIMBOLOGIA

Símbolos	Descrição	Unidade
OR	<i>Over-reading</i>	[-]
p	Pressão estática	Pa
V	Velocidade	m/s
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
z	Altura	m
A	Área	m ²
ρ	Massa específica	kg/m ³
\dot{m}	Vazão mássica	kg/s
Re	Número de Reynolds - $Re = \frac{4\dot{m}}{\pi\mu D_1}$	[-]
X_{LM}	Parâmetro Lockhart Martinelli	[-]
ΔP_{bf}	Variação de pressão para escoamento bifásico	Pa
ΔP_g	Variação de pressão para a fase gasosa	Pa

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. FUNDAMENTAÇÃO	8
2.1 Vapor saturado – Conceitos e aplicações	8
2.2 Medida de vazão por pressão diferencial – Placa de orifício.....	9
2.3 Escoamento bifásico	11
3. METODOLOGIA	13
3.1 A instalação.....	13
3.2 Método de análise	14
4. RESULTADOS.....	15
4.1 Seleção da placa de orifício	15
4.2 Análise para detecção do condensado.....	17
5. CONCLUSÃO	19

1. INTRODUÇÃO

A busca por soluções de eficiência energética na indústria vem gerando equipamentos com alto rendimento e sistemas com baixo desperdício de energia. Uma destas soluções é a Turbina Redutora de Pressão, ou TRP. Em instalações que utilizam vapor saturado, é comum o uso de válvulas redutoras de pressão, que possuem a finalidade de regular a pressão do processo. Estas válvulas são dispositivos que expandem o fluido por perda de carga e consequente consumo de trabalho de bombeamento (FRANÇA; SOARES, 2005).

Uma solução alternativa é a Turbina Redutora de Pressão, ou TRP, que é uma microturbina instalada após a caldeira. Elas são capazes de manter a pressão do vapor requerida pelo processo, ou seja, não alteram as condições usuais de operação. Ainda, a potência gerada pela TRP pode ser utilizada em outros pontos do processo.

O uso de uma TRP requer certos cuidados de operação a fim de evitar a entrada de condensado na turbina. A entrada de condensado em excesso pode ocasionar danos à turbina, assim como perda de rendimento. A exemplo disso, uma TRP de 500 kW que operava em uma cervejaria no estado de São Paulo, em 2019, sofreu um golpe de água que danificou seus mancais axiais e o eixo do rotor. Este é um problema que deve ser recorrendo no uso da TRP, já que fábricas que operam com vapor saturado possuem grande variação de consumo ao longo de um dia – e estas variações de consumo, junto com a formação de condensado nas linhas, podem provocar golpes de água em TRP. A partir disso, se enxerga a necessidade de um equipamento ou método de análise que preveja o fenômeno de arraste de condensado.

O uso de uma instrumentação adequada poderia ser capaz de evitar este tipo de acidente. Um dos instrumentos de medição de vazão mais empregados na indústria em geral é a placa de orifício, que é um medidor de vazão por restrição ao escoamento, que realiza a medida de vazão mássica pelo monitoramento da pressão diferencial a montante e a jusante da placa, fazendo uso das equações de continuidade e de Bernoulli (FOX et al., 2010). A placa de orifício é desenvolvida para escoamentos monofásicos. A presença de condensado acarreta em erros de leitura.

A patente americana de Huang (Huan et al, 1986) desenvolveu um sistema com duas placas de orifício para aplicação em extração de petróleo em poços, sendo capaz de medir a qualidade (título) e a vazão mássica do escoamento. Foi exposto também que estas são duas propriedades interdependentes: não é possível determinar uma sem saber a outra.

Evans e Ifft (2007) mostraram que a grande maioria dos medidores de vazão empregados na indústria são do tipo diferencial, e que cada um possui um comportamento diferente para escoamentos que carregam uma fase líquida (bifásicos). Também, mostra outras opções de medidores do tipo diferencial, como em forma de cone, placa de orifício com 4 furos e tubo Venturi. Em seus experimentos, era possível controlar a vazão mássica da fase líquida, assim como controlar a vazão da fase gasosa. Neste caso, o escoamento era uma mistura de gás natural com hidrocarbonetos em fase líquida.

Da mesma maneira, Kinney e Steven (2012) realizaram experimentos com o mesmo fluido, entretanto, utilizaram apenas placas de orifício, visando analisar o efeito do escoamento bifásico na resposta da placa. Utilizando a mesma metodologia, duas principais grandezas foram observadas: os parâmetros Lockhart-Martinelli e o *over-reading* (OR). Levam em sua definição os valores da vazão mássica real e a medida, entre outros, de forma que a sua relação pode indicar a presença de líquido no escoamento.

É sabido que o parâmetro Lockhart-Martinelli indica a presença de segunda fase no escoamento para valores menores que 0,3 (BAKER, 2016; EVANS; IFFT; HODGES, 2007; KINNEY; STEVEN, 2012; STEVEN; HALL, 2009). Já o *over-reading* (OR), ou “sobre leitura” do inglês, é uma relação da vazão mássica medida, ou aparente, com a vazão real. Ou seja, esta é uma grandeza que representa o erro de medição criado pela presença de líquido no

escoamento, visto que ele provoca um aumento da pressão diferencial medido na placa – resultando em valores de vazão mássica maiores que o real. Usualmente, durante a utilização das placas de orifício, é realizado um ajuste de curva que dependem do *over-reading* e do parâmetro Lockhart-Martinelli que permite leitura corrigida da vazão mássica (KINNEY; STEVEN, 2012).

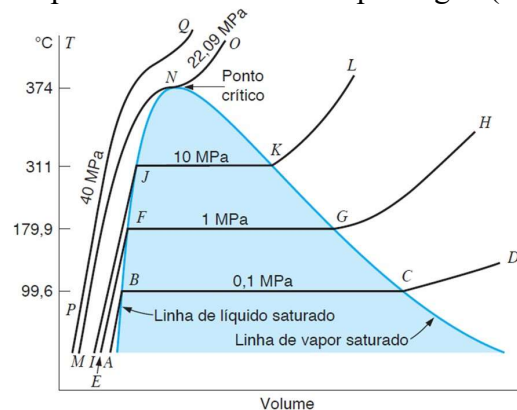
Com estas referências e pesquisa de alternativas, o presente trabalho tem como objetivo utilizar uma placa de orifício como elemento de proteção para uma TRP. Para isso, será desenvolvida uma metodologia de análise com medidas de pressão e, levando em consideração os parâmetros Lockhart-Martinelli e o *over-reading*, detectar a presença de líquido no escoamento e acionar o fechamento de segurança da turbina. A ideia é determinar valores pontuais de pressão que indiquem a presença de condensado sendo arrastado no escoamento e, conectado a um CLP (Controlador Lógico Programável), acionar a válvula de *trip* e impedir a entrada de condensado na turbina.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1 Vapor saturado – Conceitos e aplicações

A Figura 1 é um diagrama temperatura – volume ($T - v$). Nele, é possível identificar as coordenadas na superfície que indicam a formação de vapor saturado.

Figura 1 - Diagrama temperatura versus volume para água (VAN WYLEN, 2013).

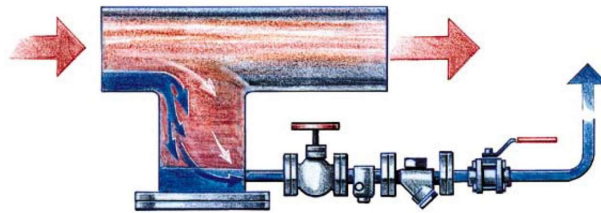


A linha que limita o diagrama define o vapor saturado, à medida que as linhas horizontais representam mudança de fase. Pelo diagrama, também fica claro que a temperatura é diretamente determinada uma vez conhecida a pressão (VAN WYLEN, 2013).

Dependendo das condições de operação na caldeira, o vapor gerado ainda pode conter água na fase líquida em pequenas quantidades, sendo chamado de “vapor saturado úmido”. Agora, uma vez que houver absorção de todo calor latente e toda a água evaporar, o vapor é chamado de “vapor saturado seco”. Com esta denominação, determina-se a propriedade “título” ($x = m_{vapor}/m_{total}$), que é comumente chamada de “qualidade” do vapor. Aplicado neste caso, o título representa a quantidade relativa de vapor seco existente em uma mistura de água e vapor (SARCO, 2014).

Além de ser trazido diretamente da caldeira, condensado é formado conforme o vapor escoar pela tubulação, sendo provocado principalmente por perda de carga – podendo ser oriundo de curvas, instrumentos, longas distâncias de tubulação, entre outros – e este fenômeno é previsto nos projetos de tubulação. Para isto, são posicionadas ao longo das linhas botas coletoras de condensado, conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Ilustração de instalação de bota coletora com purgador de condensado (SARCO, [s.d.]).



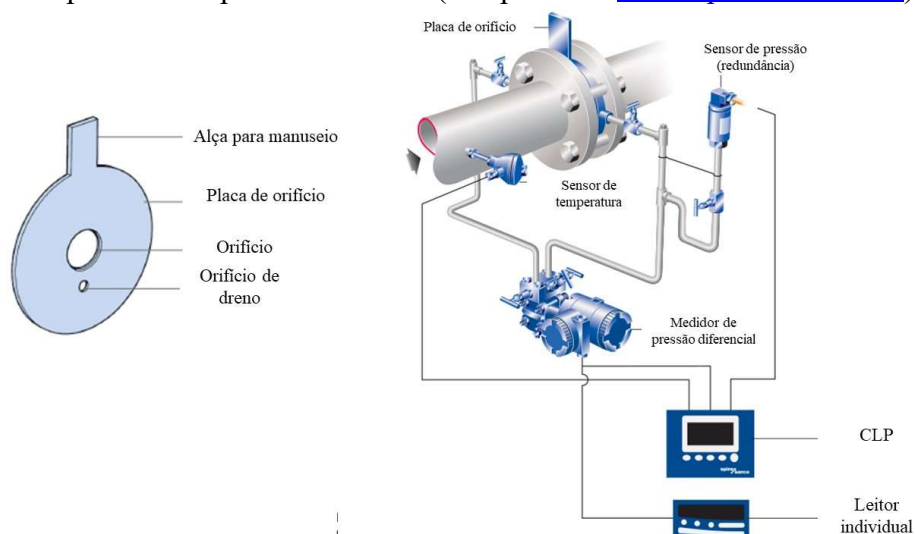
Em situações com grande demanda de consumo de vapor para a fábrica, pode ocorrer o arraste de água da caldeira antes mesmo dela evaporar. Junto com isso, o escoamento pode arrastar junto algum volume de água que esteja acumulado em uma bota coletora, por exemplo, até mesmo distribuído da tubulação (SARCO, 2014).

2.2 Medida de vazão por pressão diferencial – Placa de orifício

São sensores do tipo “medidor por obstrução”, uma vez que impõem uma restrição ao escoamento com uma redução de área e, realizando-se uma medida de pressão diferencial e de equacionamento adequado, é capaz de estimar a vazão mássica que passa pelo instrumento (SCHNEIDER, 2011). Em essência, as equações da continuidade e de Bernoulli são utilizadas para modelar o sistema (FOX et al., 2010).

Sua instrumentação necessita essencialmente de medidas de pressão antes e depois da placa. As distâncias necessárias do sensor em relação à placa é melhor descrita na norma ABNT NBR ISO 5167, que explica detalhadamente os critérios relacionados. A Figura 3 ilustra como é uma placa de orifício comum e como seria sua instrumentação. A placa mostrada na esquerda possui um orifício para dreno, utilizado em situações onde é prevista a presença de fase líquida ou acúmulo de sedimentos a montante da placa. Já na direita, é possível ver a instrumentação necessária.

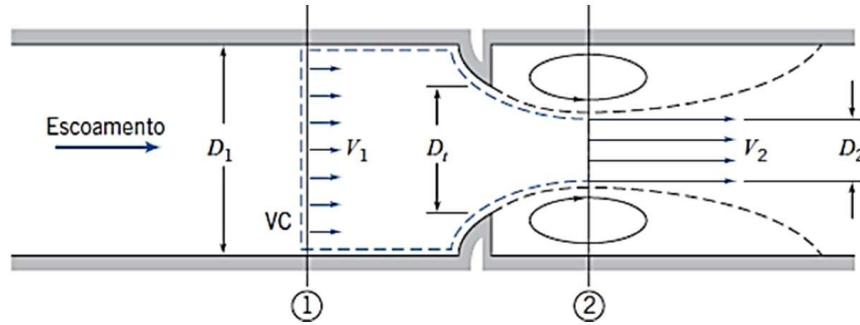
Figura 3 – À esquerda, uma placa de orifício genérica. À direita, uma instalação com instrumentos para uso de placa de orifício (Adaptado de www.spiraxsarco.com).



Na figura é representado um instrumento que faz a medida da pressão diferencial (do inglês, *differential pressure cell*). O sensor de temperatura não é utilizado no cálculo da vazão mássica, mas sim apenas para monitorar o sistema de forma mais completa (SARCO, 2020).

A Figura 4, mostra os pontos da modelagem matemática e detalhes do escoamento.

Figura 4 – Escoamento através de bocal genérico (FOX et al., 2010).



Inicialmente parte-se das equações de Bernoulli (Equação 1) e da Continuidade (Equação 2):

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \quad (1)$$

$$\rho V_1 A_1 = \rho V_2 A_2 \quad (2)$$

Com isso, chega-se na seguinte expressão:

$$\dot{m}_{teórica} = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (3)$$

Nesta equação, a variável $\dot{m}_{teórica}$ representa a vazão mássica estimada. É interessante observar que a vazão é diretamente proporcional à raiz quadrada da variação de pressão medida na placa. Entretanto, a Equação 3 não é utilizada para fazer o cálculo da vazão mássica, uma vez que ela não promove as correções necessárias, como a área de passagem na *vena contracta* em 2, conforme foi ilustrado na Figura 2.

Assim, definindo um *coeficiente de descarga* C empírico, e identificando a região 2 como região do orifício (no inglês chamado de *throat*, garganta), dá-se o subíndice “ t ” para variáveis avaliadas nesta região. Nisto, com $\beta = D_t/D_1$, então $\left(\frac{A_t}{A_1}\right)^2 = \beta^4$ e definindo um coeficiente de vazão $K \equiv C/\sqrt{1 - \beta^4}$, chega-se na Equação 4:

$$\dot{m}_{real} = K A_t \sqrt{2\rho \Delta p} \quad (4)$$

Os coeficientes C e K podem ser determinados por curvas que os relacionam em função do número de Reynolds, ou ainda é possível definir C pela Equação 5 (MILLER, 1983),

$$C = 0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,184\beta^8 + \frac{91,71\beta^{2,5}}{Re_{D1}^{0,75}} \quad (5)$$

que é capaz de fornecer valores para o coeficiente de descarga com exatidão de $\pm 0,6\%$ para $0,2 < \beta < 0,75$ e $10^4 < Re_{D1} < 10^7$.

A norma ABNT NBR 5167 explica que, de modo a levar em conta a compressibilidade do fluido, se faz uso de um fator de expansão ε , descrito pela Equação 6. O fator de expansão é igual à unidade quando o fluido é incompressível e é menor que a unidade quando é compressível.

$$\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256\beta^4 + 0,93\beta^8) \left(1 - \left[\frac{p_2}{p_1} \right]^{1/k} \right) \quad (6)$$

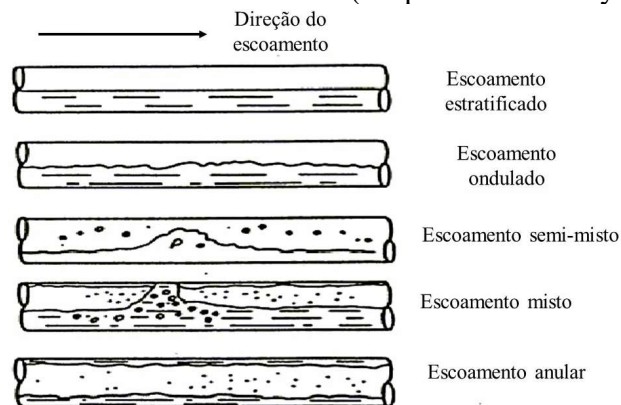
A variável k (adimensional) é o expoente isentrópico, definido pela razão entre a variação relativa na pressão e a correspondente variação relativa na massa específica, sob condição de transformação adiabática. Para utilizar ε , basta multiplicar a vazão mássica sob condições de incompressibilidade, $\dot{m}_{compressível} = \dot{m}_{incompressível} \varepsilon$ (MOURA, 2008).

Estas equações são essenciais para a seleção da placa de orifício ideal na aplicação em estudo, permitindo a previsão da pressão diferencial esperada (perda de carga) e da definição do dimensionamento da peça. Em Fox, 2010, é apresentado o desenvolvimento detalhado deste equacionamento.

2.3 Escoamento bifásico

A definição de escoamento bifásico, no caso definido pela mistura de vapor e água líquida, pode resumidamente assumir diferentes morfologias dentro da tubulação, de acordo com a velocidade das duas substâncias (STEVEN; HALL, 2009). A Figura 5 ilustra os padrões de escoamento já mapeados.

Figura 5 – Padrões de escoamento bifásico (adaptado de Kinney et. al, 2012).



O gráfico que relaciona as condições de escoamento mostra na Figura 5 é comumente encontrado tendo em seus eixos valores do número adimensional de Froude (STEVEN; HALL, 2009) ou velocidade do escoamento (KINNEY; STEVEN, 2012), onde o eixo horizontal representa a fase gasosa, e o vertical, a fase líquida. O escoamento anular bifásico se caracteriza pelo escoamento da fase líquida pela parede do tubo. Esse tipo de escoamento ocorre quando ambas as fases possuem alta velocidade (KINNEY; STEVEN, 2012). Espera-se que a morfologia do caso estudado seja anular, pelos altos valores de velocidade do escoamento (na ordem de 30 m/s).

Desta forma, tendo em vista os tipos de escoamento bifásico vistos anteriormente, é importante ter uma definição direta de escoamento úmido, isto é, um escoamento que possui a

segunda fase líquida. Este conceito envolve o parâmetro Lockhart-Martinelli, X_{LM} , representado pela Equação 7.

$$X_{LM} = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_g} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (7)$$

, onde:

\dot{m}_l é a vazão mássica da fase líquida, em kg/s.

\dot{m}_g é a vazão mássica da fase gasosa, em kg/s.

O parâmetro é um número adimensional que expressa a quantidade relativa de líquido em um gás e, de maneira mais direta, indica a presença de líquido no escoamento para valores menores que 0,3. Em conjunto com o parâmetro Lockhart-Martinelli, um outro conceito é comumente utilizado em situações de medição de escoamentos bifásicos com placa de orifício, e este é o *over-reading*, ou sobre leitura (STEVEN; HALL, 2009).

O parâmetro OR é uma representação do erro de medição de vazão, visto que ele relaciona a vazão aparente, que é a vazão medida com a presença de líquido, com a vazão real (STEVEN; HALL, 2009). A equação 8 apresenta a definição deste parâmetro, onde ΔP_{bf} representa a pressão diferencial causada por um escoamento bifásico.

$$OR = \frac{\dot{m}_{g,aparente}}{\dot{m}_g} \cong \sqrt{\frac{\Delta P_{bf}}{\Delta P_g}} \quad (8)$$

Semelhante ao conceito da Equação 3, a Equação 8 mostra que a vazão mássica é proporcional à raiz quadrada da pressão diferencial provocada pela obstrução do instrumento.

Em situações de presença da segunda fase, ocorre um aumento de OR , isto é, acontece uma pressão diferencial maior que a esperada em relação ao caso se o gás escoasse sozinho na tubulação. E junto com o parâmetro Lockhart-Martinelli, é possível utilizar ajustes de curvas para estimar a vazão real (EVANS; IFFT; HODGES, 2007).

O modelo de Chisholm (1977) relaciona as variáveis X_{LM} e OR , de forma que é possível ajustar uma curva entre eles. As equações 9 e 10 mostram as equações utilizadas no modelo.

$$OR = \sqrt{1 + C_C X_{LM} + X_{LM}^2} \quad (9)$$

$$C_C = \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^n + \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^n, n = 0,25 \quad (10)$$

É possível analisar que, calculando-se a variável auxiliar C_C para valores conhecidos de ρ_l e ρ_g , a relação entre *over-reading* e X_{LM} é direta (BJØRNER et al., 2017).

3. METODOLOGIA

3.1 A instalação

Instalada em uma cervejaria no estado de São Paulo, Brasil, a turbina do presente estudo de caso operava com as condições exibidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Condições de operação da turbina do presente estudo de caso.

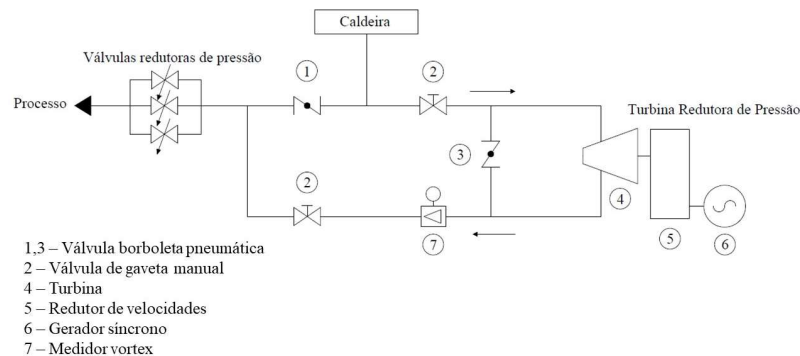
Variável	Unidade	Condição de projeto	Valor medido (média)	Variação
Vazão mássica	ton/h	22	16,7	16 – 23
Pressão da caldeira	bar(g)	16,5	12	9 – 13

Como exibe a Tabela 1, a turbina opera em condições fora do projeto, além de estar submetida a grandes variações de condições de entrada, com uma tubulação de entrada de um tubo schedule 40 de 8” (diâmetro interno de 0,20274 m). Essas grandes variações, principalmente bruscas oscilações no consumo da fábrica que demandam grande vazão em pequeno intervalo de tempo, podem provocar arraste da água de fundo da caldeira e a levam junto na tubulação.

Em um dia típico de operação, a linha varia sua vazão em valores de 7 até 23 ton/h. Entretanto, valores muito baixos de vazão não são ideais para a turbina. Assim, para este trabalho, serão considerados valores a partir de 16 ton/h.

A Figura 6 mostra o esquema de instalação atual da turbina. É possível tornar a TRP responsável pelo controle da pressão de todo o vapor através do fechamento da válvula 1. Também, na saída da turbina há um medidor de vazão do tipo *vortex*. O cenário ideal seria que ele ficasse antes da TRP, visto que existe uma pequena formação de condensado na passagem do vapor pela turbina, ou seja, há perda de massa. Entretanto, a formação de condensado está entre 3 e 5% em massa. Por isso, para efeitos de simplificação neste trabalho, será considerado que a medida de vapor na saída representa a mesma de entrada.

Figura 6 - Esquema de instalação atual da turbina do presente estudo de caso.



A turbina possui uma vasta instrumentação de modo a protegê-la e controlá-la. Como mostra a Tabela 1, o menor valor de pressão na entrada é de 9 bar (g), e este é um valor limite. Abaixo disso, a turbina desarma. Para isso, ela possui uma válvula de emergência (válvula *trip*) em sua entrada que fecha rapidamente. Outro alarme importante é que a turbina deve gerar no mínimo 12 kW de potência, ou seja, com valores de vazão mássica muito baixa, ela desarma também. Assim, o valor de 16 ton/h da Tabela 1 também ilustra um valor mínimo para operação.

Em relação ao golpe de água já citado no texto, foi possível concluir sobre ele devido ao monitoramento das medidas feitas da turbina. O alarme que provocou o fechamento da válvula *trip* foi de alta vibração no redutor de velocidades – aqui é importante frisar que o eixo de alta rotação do redutor é o mesmo eixo do rotor da turbina, ou seja, não há acoplamento. Após isso, a turbina foi de 1800 RPM para 0 RPM em menos de 2 minutos, o que não é normal. Isso mostrou que houve amassamento dos mancais axiais do redutor devido à água ter empurrado o rotor – ou seja, o eixo do rotor – e, com isso, ocorreu desaceleração brusca.

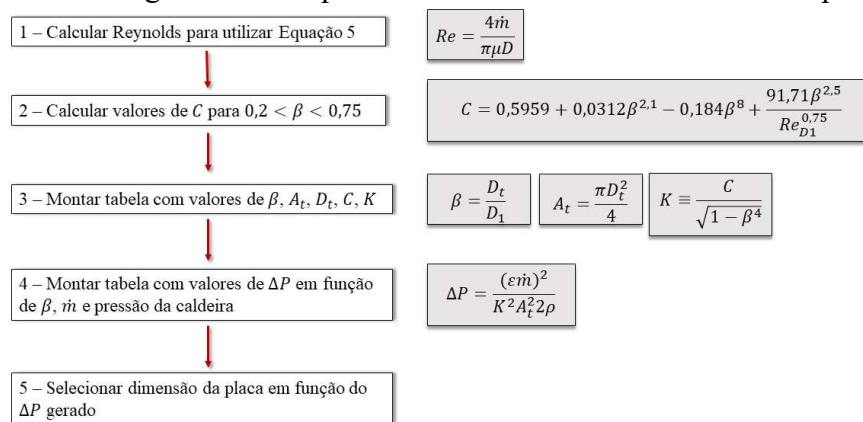
3.2 Método de análise

Propõe-se a instalação de uma placa de orifício na entrada da turbina onde, apenas com a medida de pressão diferencial, seja possível identificar a presença de líquido no escoamento. Em relação ao esquema da Figura 6, a placa ficaria posicionada logo a após a válvula de gaveta (item 2) na entrada da turbina.

Para tanto, será feito um dimensionamento básico da placa. Não será feita a previsão da sua instrumentação, e tampouco de sua posição na tubulação. Este dimensionamento será preliminar, isto é, será feita a seleção da placa de acordo com os valores obtidos a partir de seu equacionamento.

De modo a identificar a presença de líquido, será feito o uso do modelo de Chisholm. A ideia é estimar valores de ΔP na placa que indiquem a situação crítica. A Figura 7 ilustra a metodologia utilizada para seleção da placa, junto com a equação atrelada à etapa.

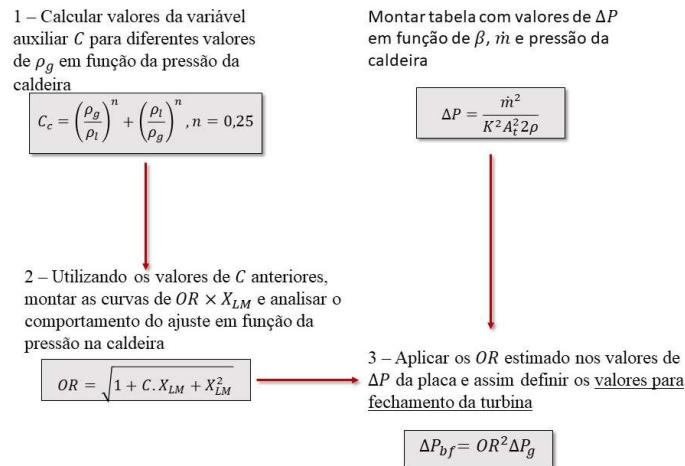
Figura 7 - Fluxograma das etapas realizadas no dimensionamento da placa.



A equação utilizada na etapa 4 é a Equação 4, isolando-se a variável ΔP . Também, é possível observar que nela será feita a correção com o fator de expansão ε . O critério que será utilizado para selecionar a dimensão da placa será puramente a pressão diferencial causada por ela. Valores muito altos não podem ser escolhidos pela alta perda de carga imposta ao escoamento, ao passo que valores muito pequenos podem ser considerados como “ruído” na medição, levando a baixa exatidão. Assim, será feita a escolha intermediária para valores de pressão diferencial.

Para a análise seguinte, a Figura 8 ilustra, da mesma forma que a Figura 7, a metodologia utilizada.

Figura 8 - Fluxograma de atividades utilizada na análise.



A equação utilizada na terceira etapa é a Equação 8 deste texto, apenas isolando-se a pressão diferencial para escoamento bifásico, que será o valor considerado para fechamento da turbina.

Em suma, a ideia da metodologia desenvolvida neste trabalho é comparar os valores de vazão medidos no *vortex* já presente na instalação, com os valores de pressão diferencial na placa de orifício. Neste cenário, os dois sensores estariam contidos no programa do CLP (Controlador Lógico Programável) da turbina, de forma que seria necessária escrever algumas novas linhas de código para relacionar estas duas TAGs (TAG é um código dado a um sensor com o objetivo de identificá-lo no programa do CLP). A estratégia, em suma, é possuir valores de pressão diferencial específicos na placa de orifício já mapeados, que indiquem a presença de líquido no escoamento.

Todos os cálculos e gráficos foram produzidos utilizando-se planilhas eletrônicas.

4. RESULTADOS

4.1 Seleção da placa de orifício

O primeiro passo é calcular o número de Reynolds. Para a viscosidade dinâmica do vapor a 12 bar(g), ou 1,2 MPa, igual a 0,00001531 Pa.s (“EES - Engineering Equation Solver”, 2020), e para vazão mássica média de 16 ton/h, ou 4,444 kg/s, o número de Reynolds fica igual a $1,8 \times 10^6$. Com esse valor de Reynolds, a Equação 5 é válida.

Seguindo para a próxima etapa, a Tabela 2 mostra os valores obtidos nas etapas 2 e 3 da Figura 7.

Tabela 2 - Variáveis da placa de orifício calculadas em função de sua dimensão.

β	D_t (m)	C	A_t (m ²)	K
0,2	0,040548	0,596995	0,0012913	0,597473
0,3	0,060822	0,598469	0,0029054	0,600907
0,4	0,081096	0,600521	0,0051652	0,608359
0,5	0,10137	0,602786	0,0080707	0,622554
0,6	0,121644	0,603998	0,0116217	0,647405
0,7	0,141918	0,600803	0,0158185	0,689214
0,75	0,152055	0,595432	0,018159	0,720167

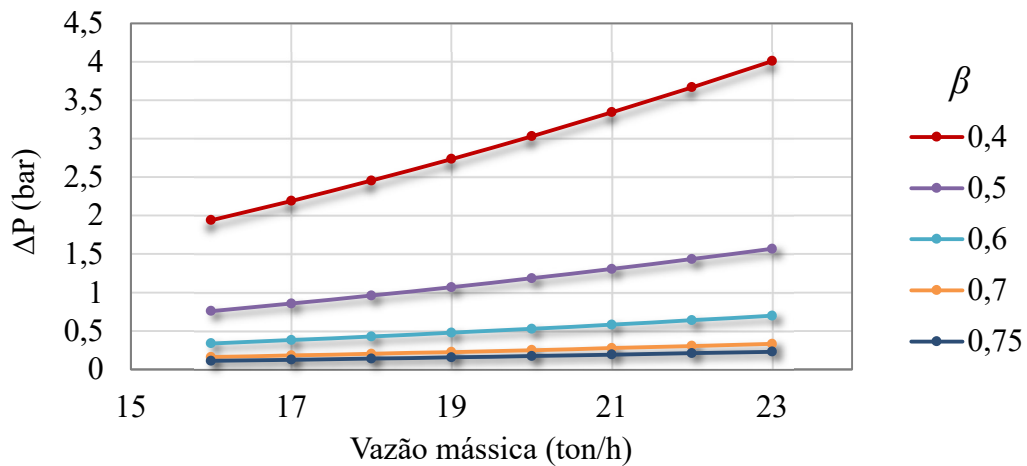
Antes de corrigir os valores com o fator de expansão, deve-se primeiro fazer o cálculo considerando um fluido incompressível, utilizando a Equação 11.

$$\Delta P = \frac{\dot{m}^2}{K^2 A_t^2 2\rho} \quad (11)$$

Pela dependência da massa específica em função da pressão absoluta, neste caso, foi considerado um valor da pressão de 9 bar(g), ou 0,9 MPa, visto que tem o menor valor de massa específica e, desta forma, gera os maiores valores de pressão diferencial. Os valores de pressão diferencial obtidos aqui já serão utilizados para selecionar a placa.

A Figura 9 mostra os valores de pressão diferencial na placa, de acordo com a Equação 12.

Figura 9 - Valores de pressão diferencial em função da vazão mássica e de β , para pressão na caldeira igual a 9 bar(g).



Os valores de β menores que 0,4 não aparecem no gráfico da Figura 9 porque ocasionaram valores de pressão diferencial muito grandes, que prejudicariam a visualização das demais curvas. Pelos valores obtidos, a placa selecionada será a com $\beta = 0,5$. Para o cálculo de ε , será utilizado o maior valor de pressão diferencial, que neste caso é 1,569 bar. Antes disso, é necessário calcular o expoente isentrópico k . Para tanto, a Tabela 3 mostra os valores da massa específica e sua variação relativa com respeito à variação de pressão, assim como variação relativa da pressão.

Tabela 3 - Dados para o cálculo de k
(dados obtidos das tabelas termodinâmicas de www.tlv.com).

	Pressão (bar(g))	Massa específica (kg/m ³)
	9	5,152
	7,43	4,380
Varição relativa (-)	0,174	0,150

Na sequência, a Equação 12 mostra o cálculo de k .

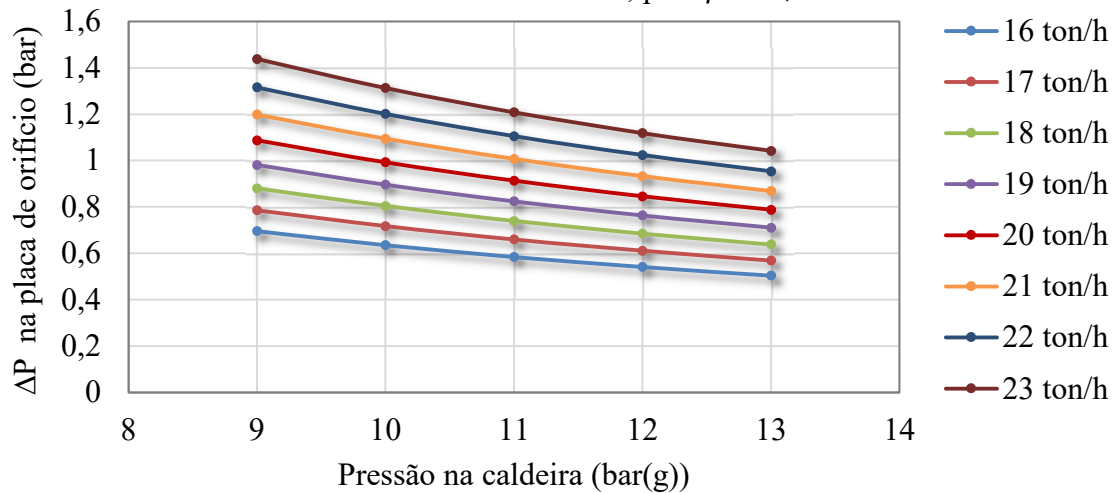
$$k = \frac{\text{variação relativa da pressão}}{\text{variação relativa da massa específica}} = \frac{0,174}{0,150} = 1,163 \quad (12)$$

Com o valor de k , agora é possível calcular ε utilizando a Equação 6. Substituindo os valores da Tabela 3 para P_1 e P_2 , $\beta = 0,5$ e $k = 1,163$, tem-se que $\varepsilon = 0,916$.

Agora, utilizando a Equação 13, é possível prever todos os valores de pressão diferencial na placa, como mostra as curvas na Figura 10.

$$\Delta P = \frac{(\varepsilon \dot{m})^2}{K^2 A_t^2 2\rho} \quad (13)$$

Figura 10 - Valores de pressão diferencial na placa de orifício em função da pressão na caldeira e vazão mássica, para $\beta = 0,5$.

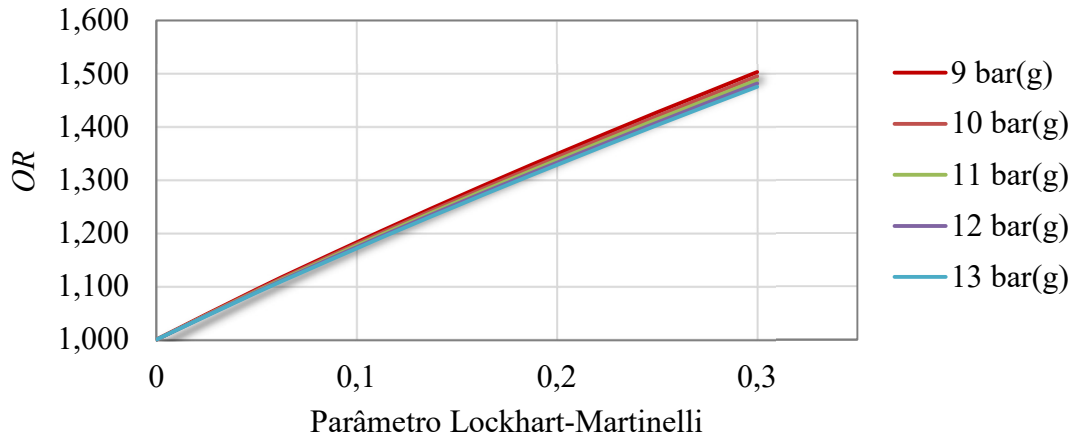


Como esperado, as maiores vazões mássicas provocam maiores valores de pressão. Em comparação com as curvas da Figura 9, o valor de ΔP para 9 bar(g) e 23 ton/h era de 1,569 bar. Agora, este mesmo ponto tem ΔP de 1,43 bar.

4.2 Análise para detecção do condensado

Deve-se iniciar pela etapa 1 da Figura 8, calculando os valores de C_C , em função da massa específica do vapor para cada valor de pressão. O objetivo disso é analisar como o C_C varia junto com a massa específica. Para ilustrar da melhor forma, a Figura 11 mostra as curvas de OR versus X_{LM} em função da pressão na caldeira, isto é, variando-se o valor de C_C na Equação 9.

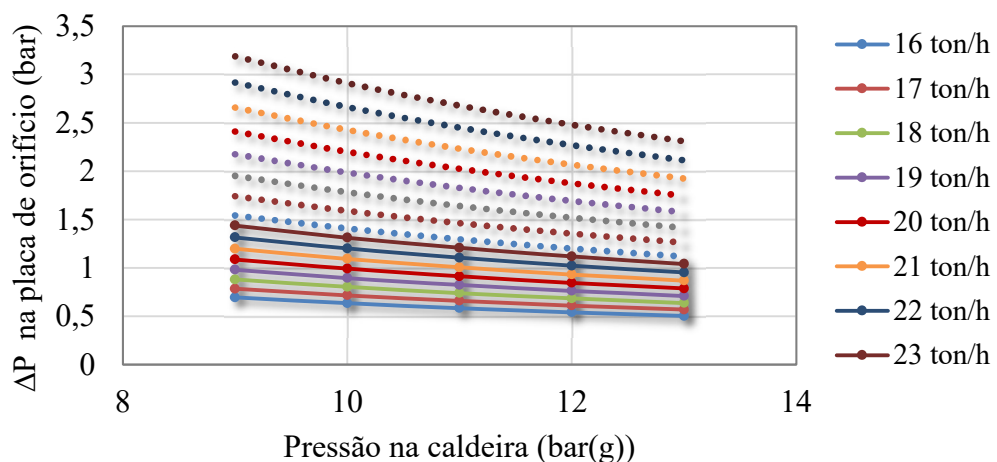
Figura 11 - Curvas de OR vs X_{LM} em função da pressão na caldeira.



A Figura 11 já resume os resultados obtidos nas etapas 1 e 2 da Figura 8. Como é possível ver, o ajuste de curva não se altera significativamente com o valor de C . Assim, para continuar a análise, foi escolhido o valor médio de C_C , tendo-se um ajuste da curva intermediária destas 5 geradas, com um ajuste com curva polinomial de segunda grau com $R^2 = 1$. Os detalhes do ajuste da curva podem ser encontrados no Apêndice A.

Seguindo para a etapa 3 da Figura 8, é importante aplicar os valores de *over-reading* sobre os valores de pressão, para assim identificar valores de pressão diferencial indicativos de água em excesso na linha. Assim, usando a Equação 8, a Figura 12 mostra os valores de pressão diferencial esperados na placa de orifício quando há condensado na linha. As linhas contínuas representam os mesmos valores já mostrados na Figura 10, enquanto a linha pontilhada indica os valores de ΔP com condensado na linha. Para a construção destas curvas, foi escolhido o maior valor de *over-reading* obtido no ajuste das curvas, que foi de 1,488.

Figura 12 - Valores de pressão diferencial esperados na placa de orifício com e sem efeito do OR . Linhas pontilhadas indicam efeito do OR , onde a primeira de baixo é 16 ton/h e a última de cima é 23 ton/h.

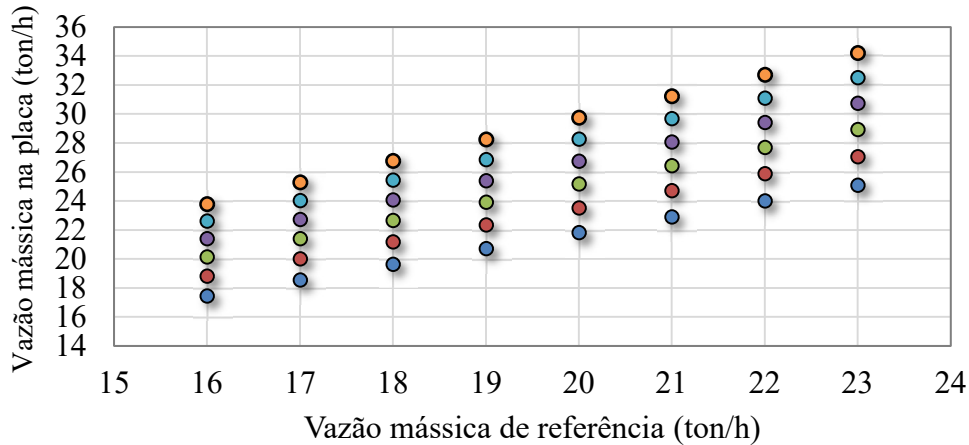


Observa-se, a partir da Figura 12 que o efeito do OR não só aumenta consideravelmente os valores de pressão diferencial, mas também afasta as curvas.

Ao final, já que o objetivo era comparar os valores de vazão mássica medidos na placa e no *vortex*, foi feita uma comparação entre estes dois equipamentos. A Figura 13 mostra um gráfico que registra os pontos de vazão medida na placa de orifício com condensado na linha

no eixo das ordenadas, ao passo que o eixo das abcissas mostra o valor de referência no medidor *vortex*.

Figura 13 - Comparação dos valores de vazão mássica medida na placa de orifício e no medidor *vortex*.



A Figura 13 é responsável por mostrar os valores de vazão mássica medidas na placa de orifício que serão considerados como situação onde existe água na tubulação, ou seja, serão os valores referência para alarme e fechamento da turbina. Os seis pontos em cada coordenada do eixo horizontal representam cada ponto utilizado no ajuste de curva *OR versus X_{LM}*, isto é, o valor de referência foi multiplicado pelos seis valores de *OR*.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo propor uma solução para o problema de uma microturbina a vapor usada para cogeração que, instalada em condições de operação muito variáveis, sofreu, e poderia sofrer novamente, um golpe de água que foi arrastada junto com o escoamento de vapor.

Assim, foi proposto o desenvolvimento de uma metodologia para tratar os dados obtidos na instrumentação da automação da turbina, inserindo-se uma placa de orifício antes da turbina e, apenas com medidas de pressão diferencial, detectar a presença de água em excesso na linha. A ideia foi a de se chegar a uma solução que fosse a mais simples e barata possível, por mais que não fosse feito este tipo de avaliação.

Inicialmente, foi feita uma seleção preliminar das dimensões da placa de orifício, onde a placa com relação de diâmetros $\beta = 0,5$ se mostrou ser a ideal. Não foi escolhida outra placa com valores de ΔP muito pequenos porque, devido à variação constante na linha, isso poderia atrapalhar a medida e pequenos ruídos comprometeriam o desempenho do equipamento. Da mesma forma, valores de ΔP muito grandes não foram escolhidos pela grande perda de carga imposta ao escoamento e, já que a ideia da turbina é recuperar energia, impor uma grande perda de carga significaria grande desperdício do potencial desta energia.

Tendo-se as dimensões da placa, foi possível prever a pressão diferencial que ela provocaria, em função da vazão mássica e da pressão da caldeira.

Utilizando o modelo de Chisholm, foi possível ajustar uma curva de *over-reading* versus o parâmetro Lockhart-Martinelli. O ajuste da curva teve um índice de $R^2 = 1$, indicando ajuste perfeito. Esta curva, por sua vez, foi obtida com valores do parâmetro Lockhart-Martinelli menores que 0,3, que indicam a presença da segunda fase no escoamento. A partir disso, foram calculados os valores de *over-reading* na placa devido à presença de água.

Aplicando os valores de *OR* nas previsões de pressão diferencial, e também nas vazões mássica, foi possível determinar valores que seriam alarme para o CLP turbina, isto é, valores que quando lidos, indicariam o comando de fechamento da turbina, protegendo-a contra um golpe d'água.

Por fim, nota-se que a metodologia proposta é consistente e deve apresentar bons resultados, uma vez que o conceito de aumento da pressão diferencial, para valores não usuais, na presença de líquido, é bem estabelecido. A ideia de possuir valores pontuais de pressão que indiquem água no escoamento é adequada, uma vez que aumenta a exatidão na detecção e não provoca situações de ociosidade na turbina, isto é, fechamento dela sem necessidade. Em suma, o método proposto aqui deve proporcionar condições de solucionar o problema identificado neste caso de estudo e ainda possuir boa exatidão.

5.1. Sugestões de trabalhos futuros

Um passo importante para validação dele é a experimentação. Visto que este trabalho foi desenvolvido no ano de 2020, a pandemia de COVID-19 dificultou o trabalho presencial e não permitiu a montagem de uma bancada de testes.

Assim, sugere-se como trabalho futuro a execução de experimentos que validem a metodologia proposta.

Além disso, outra análise importante que deve ser feita é a resistência ao desgaste da placa aos grandes valores de vazões de vapor saturado. Isto não foi levado em consideração neste trabalho, mas é de suma importância para a continuação deste estudo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAKER, R. C. Multiphase Flowmeters. **Cambridge University press**, n. Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications, p. 508–529, 2016.
- BJØRNER, M. et al. Generalized wet gas venturi meter correlations: Assessment and improvement. **35th International North Sea Flow Measurement Workshop, NSF MW 2017**, n. October, p. 24–26, 2017.
- EES - Engineering Equation Solver**. Madison, EUPAF-Chart Software, , 2020.
- EVANS, R.; IFFT, S.; HODGES, D. Wet gas performance of differential pressure flowmeters. **25th North Sea Flow Measurement Workshop - Gardenmoen, Noruega**, p. 1–14, 2007.
- FOX, R. W. et al. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8ª Edição ed. [s.l.] Editora LTC, 2010.
- FRANÇA, G. A. C.; SOARES, L. N. Análise Exergética De Válvulas Redutoras De Pressão Visando Cogeração Estudo. **Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)**, v. 15, n. 2, p. 1–6, 2005.
- HUANG, W.-S.; MIMS, D. S.; ALLEN, R. S. **Method and apparatus for determining quality and mass flow rate of flowing steam** EUA, 1986.
- KINNEY, J.; STEVEN, R. Effects of wet gas flow on gas orifice plate meters. **Colorado Engineering Experiment Station, Inc.**, 2012.
- MILLER, R. W. **Flow Measurement Engineering Handbook**. 3. ed. Nova York: McGraw-Hill, 1983.
- MOURA, A. E. **ABNT NBR 5167-1:2008 - Medição de vazão de fluidos por dispositivos de pressão diferencial, inserido em condutos forçados de seção transversal circular**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- SARCO, S. **Curso de Projeto de Sistemas de Vapor**. Disponível em <<https://pt.slideshare.net/marcosromanholo7/parte-02-gerao-de-vapor>>. Acessado em 09 nov. 2020.
- SARCO, S. **Bem vindo ao mundo do vapor**. Disponível em <<https://pt.slideshare.net/lcmartinelli1/apostila-de-vapor-spirax-sarco>>. Acessado em 09 nov. 2020.
- SARCO, S. **Spirax Sarco Brasil - Líder em soluções para sistemas a vapor**. Disponível em: <www.spiraxsarco.com>. Acesso em: 27 out. 2020.
- SCHNEIDER, P. S. Medição de velocidade e vazão de fluidos. In: Porto Alegre, Brasil: [s.n.]. p. 24.
- STEVEN, R.; HALL, A. Orifice plate meter wet gas flow performance. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 20, n. 4–5, p. 141–151, 2009.
- TLV. **TLV INTERNATIONAL, INC**. Disponível em: <<https://www.tlv.com/global/BR/>>.
- VAN WYLEN. **Fundamentos da Termodinâmica**. 8. ed. Rio de Janeiro: Blucher, 2013.

APÊNDICE A

Na aplicação do modelo de Chisholm, a Tabela abaixo mostra os valores de C em função da pressão na caldeira. Os valores de C foram calculados usando a Equação 10.

Pressão (bar(g))	ρ_g (kg/m ³)	ρ_l (kg/m ³)	C_C
9	5,152	887,067	3,898
10	5,642	882,558	3,819
11	6,132	878,295	3,749
12	6,621	874,225	3,685
13	7,110	870,337	3,627

Agora, usando a Equação 9, a Tabela seguinte mostra os valores de OR para cada C calculado, para valores do parâmetro Lockhart-Martinelli menores que 0,3.

OR		C_C				
		3,898	3,819	3,749	3,685	3,627
X_{LM}	0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	0,05	1,094	1,092	1,091	1,089	1,088
	0,1	1,183	1,180	1,177	1,174	1,172
	0,15	1,268	1,263	1,259	1,255	1,252
	0,2	1,349	1,343	1,338	1,333	1,329
	0,25	1,427	1,420	1,414	1,408	1,403
	0,3	1,503	1,495	1,488	1,482	1,476

Para todos os valores de X_{LM} , foi feita uma média e assim foi construída a curva OR vs X_{LM} . A seguinte tabela mostra os valores de ajuste da curva, assim como as seguintes figuras mostram os pontos junto com a curva de tendência.

X_{LM}	OR
0	1
0,05	1,090997
0,1	1,17709
0,15	1,259287
0,2	1,338306
0,25	1,414681
0,3	1,488818

