

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA AVALIAR A EFICIÊNCIA DE UMA TORRE DE RESFRIAMENTO

Jade Spinola Ávila ¹
Luana Nascimento ²
Salvador Ávila Filho ³

RESUMO

Atualmente o uso da água nas indústrias tem sido objeto de muitos estudos, em especial, como fluido refrigerante. No entanto, com a escassez de água em vários estados do país nos últimos anos há a necessidade de otimizar o seu uso. Nesse contexto, no processo industrial, as torres de resfriamento é um dos equipamentos que mais se consome água, que está associado a um custo energético e financeiro. Portanto, há uma necessidade de otimizar o funcionamento desta utilidade. Uma das alternativas de otimizar esse processo é a análise da variação ou intervalo entre as temperaturas de entrada e saída da torre de resfriamento por meio do cálculo da eficiência da torre. Neste sentido, a proposta deste trabalho foi desenvolver uma modelagem matemática capaz de analisar o comportamento das torres de resfriamento em relação a sua eficiência e determinação do ponto de operação de funcionamento. A ferramenta computacional desenvolvida deve ser capaz de auxiliar o operador da torre na tomada de decisão, em relação as condições de operação, a partir da análise do comportamento da torre de acordo com um histórico gerado com a finalidade de otimizar o funcionamento da torre.

Palavras-chave: Água, Torres de Resfriamento, Modelagem, Eficiência.

INTRODUÇÃO

A água é utilizada como fluido de resfriamento na maioria dos sistemas industriais que requerem remoção de carga térmica. Ao final da troca de calor realizada nos processos industriais, a água de resfriamento é reaproveitada ao percorrer uma torre de resfriamento. Sabe-se que as torres de resfriamento são equipamentos que é dada pouca atenção pela indústria, sendo lembrado na maioria das vezes no desenvolvimento do projeto da fábrica e especificação da torre, que geralmente é construída afastada da unidade de processo. Este fato deveria ser repensado pela indústria, pois as torres de resfriamento tem um papel preponderante nas condições operacionais do processo e merece uma atenção especial, principalmente quando ocorrem falhas ou interrupções nos processos e a justificativa pode estar no serviço de utilidades e não no processo propriamente dito. Atualmente existe a necessidade de estudos sobre as

¹ Mestranda do Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia - UFBA, jade.engavila@gmail.com;

² Graduada do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, luana.nascimento25@hotmail.com;

³ Professor orientador: Doutor, Universidade Federal da Bahia - UFBA, avilasalva@gmail.com.

variáveis de operação e dados experimentais do desempenho, pois estes dados são baseados nos dados de projeto, sem uma verificação posterior (OLIVEIRA, 2011).

O conceito mais usado na avaliação de desempenho do resfriamento de água é a Teoria de Merkel, a qual relaciona a transferência de calor sensível e latente a partir da diferença de entalpia, sendo esta considerada a força motriz do processo (PERRY, 1997; CASSETTA, 2003; SILVA, 2015). Para medir o desempenho das torres é empregado o valor da eficiência determinada a partir das temperatura de entrada e saída da água e temperatura de bulbo úmido. Atualmente, mudanças climáticas ocasionadas pelo aumento do efeito estufa (devido a emissões de CO e CO₂ para a atmosfera por atividades humanas) é um dos desafios atuais da humanidade. Sabe-se que, a indústria tem uma grande responsabilidade neste fato e deve-se concentrar-se na redução e geração destes gases, a partir da implementação de mudanças de comportamento e melhorar a eficiência energética, assim reduzindo o consumo de combustível. A eficiência energética ideal é alcançada quando damos importância para a água na indústria (ÁVILA, 2015).

Diante do cenário mundial atual é perceptível a necessidade da busca pela sustentabilidade nas indústrias, com objetivo de alcançar o equilíbrio entre os fatores econômicos, ambientais e sociais. Uma forma de atingir esse equilíbrio é por meio da otimização dos processos atrelado a redução de custos e dos impactos ambientais. Por se tratar da água, e da problemática da sua escassez, é de extrema importância observar a operação destes equipamentos que podem trazer benefícios econômicos e ambientais para as empresas (SILVA, 2015). Com base no levantamento bibliográfico, problemas recorrentes no processo industrial e a problemática no que diz respeito a água e energia, percebeu-se a necessidade de desenvolver uma ferramenta que proporcione um melhor manuseio de torres de resfriamento no setor industrial, visando melhorias econômicas, sociais e ambientais.

DESENVOLVIMENTO

Torres de Resfriamento

A torre de resfriamento é um equipamento utilizado para resfriar a água industrial proveniente de trocadores de calor e condensadores. Este é um dos equipamentos mais encontrados em plantas industriais, sendo, geralmente, empregada em indústrias químicas e usinas de energia termelétrica e nuclear (LIMA JR., 2011).

Segundo Blackadder e Nedderman (2004), uma torre de arrefecimento é, basicamente, uma coluna de transferência de calor e massa, com uma grande área de troca térmica entre as correntes. Nesse contexto, a troca térmica no equipamento é dado pela transferência de massa da água para o ar atmosférico, pelo processo natural de evaporação, responsável por aproximadamente 80 % do resfriamento, e a transferência de calor sensível por convecção, provocada pela diferença de temperatura entre o ar e a água, que é normalmente responsável por 20 % do calor transferido, ambos ocorrem devido ao gradiente de temperatura e de concentração do processo (TROVATI, 2004).

A água quente oriunda do processo é enviada para a torre de resfriamento onde uma parte da água é evaporada no ar que atravessa o equipamento, ocorrendo uma troca de calor devida ao calor latente que ocasiona aumento da umidade do ar. À medida que a água evapora, o ar absorve o calor, diminuindo a temperatura da água restante. Além disso, calor sensível também é trocado devido a diferença de temperatura entre a água e o ar. Este processo proporciona o aumento da temperatura do ar e o resfriamento significativo da porção de água acumulada na bacia da torre, que pode ser redirecionada ao processo, permitindo, assim, que grande parte da água seja reusada como fluido de resfriamento, suprimindo a demanda do processo (FEMP, 2011; ÁVILA FILHO, 2015).

No funcionamento do sistema de torres de resfriamento existe a adoção da água de make-up afim de suprir a quantidade de água evaporada no processo de resfriamento através do calor latente. Deve-se focar a atenção na importância das fontes dessa água. Existem fontes de água de superfície, que incluem lagos, rios e córregos, e as fontes de água subterrânea que consistem em poços ou aquíferos. De acordo com sua localização, as fontes de água podem transportar altos níveis de lixo suspenso e detritos que podem causar incrustações, se não forem removidas por sistemas de pré-filtração, ou podem ter altos níveis de minerais dissolvidos que contribuem para a formação de escamas ou a corrosão no sistema de resfriamento. Apesar do reuso da água ser uma boa alternativa econômica, deve-se considerar a qualidade da água e a forma como isso impactará o funcionamento eficiente do sistema e a sua capacidade de satisfazer a demanda de refrigeração necessária (FEMP, 2011).

Em sistemas abertos, a água fria proveniente de um manancial é bombeada para os equipamentos resfriadores de calor, e em seguida, é descartada em sua fonte original, dessa maneira, a água de resfriamento entra em contato com os trocadores de calor somente uma vez. Em sistemas fechados com recirculação o processo é não evaporativo, ou seja, o resfriamento da água é realizado em um trocador de calor onde a água não entra em contato com o fluido de

resfriamento (TROVATI, 2004). Algumas vantagens dos circuitos fechados são: necessidade de pouca quantidade de água de reposição, melhor controle das temperaturas nos equipamentos de transferência de calor, e evaporação da água quase nula (GE, 2017).

O sistema semiaberto com recirculação é caracterizado, principalmente, pelo fato de que a água é continuamente resfriada para ser aplicada em outros processos (MANCUSO, 2001). Inicialmente, a água passa pelo tratamento químico, e é encaminhada para os equipamentos que devem ser resfriados, normalmente uma rede de trocadores de calor. Em seguida, a água com sua temperatura elevada é enviada para uma torre de resfriamento a qual é formada por um recheio interno com distribuição uniforme da água (CORTINOVIS e SONG, 2005). Neste processo a transferência de calor e massa entre a água e o fluxo de ar atmosférico proporciona a redução de temperatura da água, devido, principalmente, à evaporação de uma parcela da água circulante, a qual é retornada de forma apropriada para o reuso com a finalidade de absorver o calor de um novo ciclo do processo (TROVATI, 2004; CTI, 2017).

A Psicrometria

A Psicrometria trata das propriedades termodinâmicas do ar úmido e está intimamente relacionada com a análise teórica do desempenho nas torres de resfriamento (MARQUES, 2007). Para o estudo e entendimento de torres de resfriamento, se faz necessário um conhecimento básico de psicrometria. Pela carta psicrométrica podemos estudar o sistema ar-água e determinar suas propriedades. Um conceito importante dentro da psicrometria é a temperatura de bulbo úmido, que é a temperatura atingida pela água quando uma pequena quantidade dessa água é evaporada em uma corrente de ar úmido não saturado, logo, a menor temperatura a qual se consegue resfriar a água em uma torre (KERN, 1950). Na prática, essa temperatura não é alcançável, pois para que isso ocorresse seria necessário que toda a água entrasse em contato com o ar e que essas duas correntes ficassem em contato pelo maior período de tempo possível, o que não ocorre (ÁVILA FILHO, 2015).

Transferência de Calor e Massa

Afim de solucionar o problema da transferência de massa e calor simultânea que rege o funcionamento das torres de resfriamento, foi desenvolvido por Merkel uma teoria que combina os dois processos em um único (CASSETA, 2003). Este modelo utiliza a diferença de entalpia como força motriz (PERRY, 1997). A teoria de Merkel é baseada na análise de uma gota de água e a relação da sua interface com o ar atmosférico. Por exemplo, tomando como base uma gota de água, assume-se que esta é cercada por um filme de ar saturado à temperatura da interface do contato ar-água. O ar é aquecido e se torna continuamente mais

úmido à medida que passa através da torre. O calor é transferido da fase líquida para a interface, e da interface para a fase gasosa (SILVA, 2015).

Segue algumas hipóteses simplificadoras que foram consideradas no modelo de Merkel (CASSETA, 2003; MARQUES, 2007): 1) As temperaturas, os fluxos de água e ar e as entalpias do ar são constantes em toda a área de uma mesma seção horizontal da torre. 2) O ar frio, na entrada da torre, está saturado e na temperatura de bulbo úmido. 3) A torre é adiabática, logo, a transferência de calor através das paredes da torre é desprezível. Dessa forma, temos que qualquer transferência de calor ocorrerá apenas entre a água e o ar, de modo que os efeitos referentes à radiação ou à convecção entre a torre e a vizinhança são desprezados.

A aplicação da Lei de Merkel é feita a partir do balanço de energia e massa correlacionados a partir da Equação (1).

$$Q = KS(h_U - h_A) \quad (1)$$

onde:

Q = calor transferido ($J.s^{-1}$);

K = coeficiente global de transferência de massa ($kg.sm^{-2}$);

S = superfície total na transferência de calor (m^2);

h_U = entalpia da película de ar na temperatura da água ($J.kg^{-1}$ de ar seco);

h_A = entalpia do ar não saturado ($J.kg^{-1}$ de ar seco).

Sabendo que:

$$Q = mC_p dT \quad (2)$$

Combinando as Equações (1) e (2) e integrando pode-se mostrar que:

$$\frac{KaV}{L} = NUT = \int_{T_{UF}}^{T_{UQ}} \frac{C_L dT}{h_U - h_A} \quad (3)$$

onde:

NUT = número de unidades de transferência (adimensional);

a = área de interface/ volume do enchimento ($m^2.m^{-3}$);

V = volume específico de enchimento/ área transversal ($m^3.m^{-2}$);

L = vazão mássica de água ($kg.sm^{-2}$);

C_L = capacidade calorífica da água ($J.kg^{-1}K^{-1}$);

T_{UQ} = temperatura de entrada da água (K);

T_{UF} = temperatura de saída da água (K);

h_u = entalpia da película de ar na temperatura da água ($J.kg^{-1}$ de ar seco);

h_a = entalpia do ar não saturado ($J.kg^{-1}$ de ar seco).

Cálculo da Eficiência

O cálculo da eficiência da torre de resfriamento é um dos parâmetros de desempenho das torres. Este depende da temperatura de bulbo úmido e das temperaturas de entrada e saída da torre, e é dada pela Equação (4). (FISENKO E PETRUCHIK, 2004)

$$\eta = \frac{T_{UQ} - T_{UF}}{T_{UQ} - T_{BU}} 100 \quad (4)$$

onde:

T_{UQ} = temperatura de entrada da água (K);

T_{UF} = temperatura de saída da água (K);

T_{BU} = temperatura de bulbo úmido (K).

Com base nos valores da eficiência, é possível verificar se a torre está funcionando dentro do esperado. Para esta análise toma-se como base que para uma avaliação de performance de uma torre, de acordo com Hensley (2009), o range de temperatura deve estar entre $\pm 20\%$ de variação em comparação ao range de projeto da torre.

As alterações na eficiência das Torres de Resfriamento podem ser atribuídas por não conformidades no equipamento e operação. No caso de uma operação em que uma variação de fluxo é identificada acima ou abaixo do ideal, é possível identificar algumas causas, como mostrado na Figura 1 (SILVA et al., 2018).

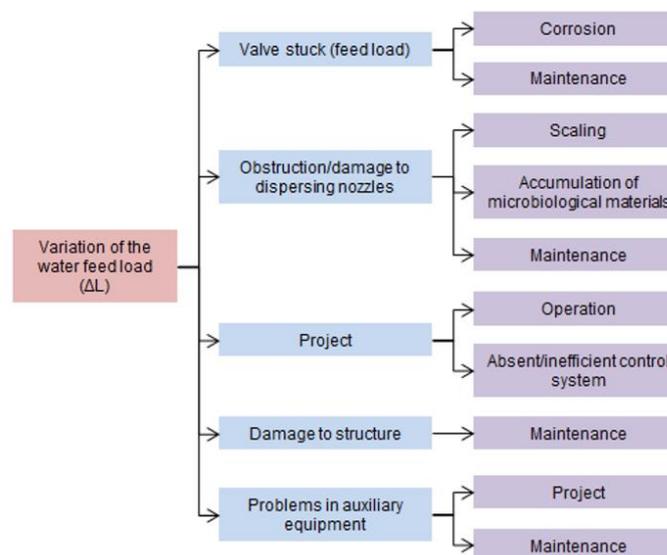


Figura 1- Árvore de causa e efeito para variação na água de carga de alimentação. Fonte: SILVA et al. (2018)

Algumas dessas irregularidades estão associadas a: (1) válvula presa da bacia superior (corrosão do material, baixa manutenção preventiva periódica); (2) obstrução dos bicos

dispersantes (formação e acúmulo de incrustações e materiais microbiológicos, baixa manutenção preventiva periódica); (3) projeto da torre de resfriamento (dados de operação fora da especificação com dados de projeto, sistema de controle ausente ou ineficiente para fornecer dados de operação); (4) danos à estrutura que gera vazamento de água para o exterior (baixa manutenção preventiva periódica); (5) problemas em equipamentos auxiliares (bombas, motores/ turbinas mal dimensionados ou selecionados, baixa manutenção preventiva periódica).

METODOLOGIA

Visando atender os objetivos do presente trabalho foi tomado uma torre de resfriamento, semelhante ao esquema ilustrado na Figura 4. Para o desenvolvimento do aplicativo computacional foi usado o VBA/Excel e um computador Sistema Operacional de 64 bits, processador com base em x64, processador AMD A8-4500M APU with Radeon(tm) HD Graphics 1.90GHz e memória RAM de 4GB.

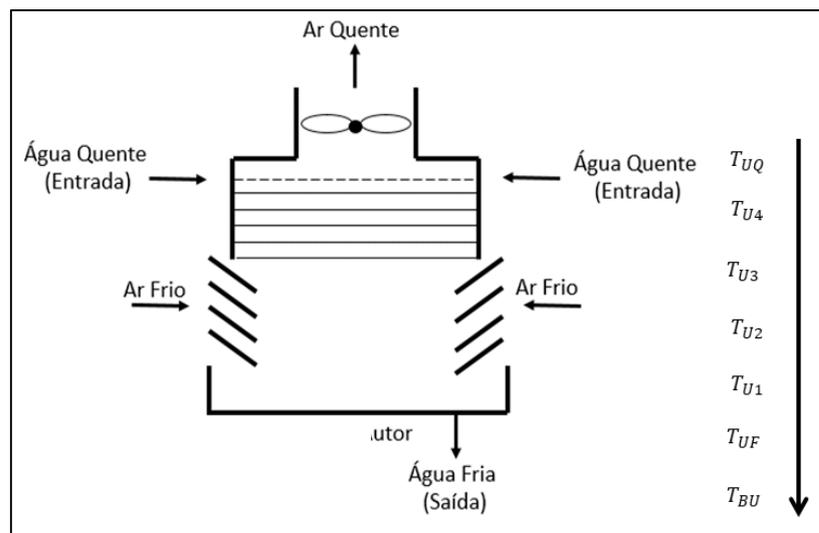


Figura 2 - Representação de uma torre contra corrente e diagrama de temperatura.
Fonte: Próprio Autor

O modelo matemático desenvolvido foi considerando uma torre de resfriamento em contra corrente e empregando o modelo desenvolvido por Merkel, conforme apresentado na Equação (3). Na Figura 2, abaixo, representa um fluxograma indicando como a modelagem matemática é disposta para o cálculo do ponto de operação de uma torre de resfriamento.

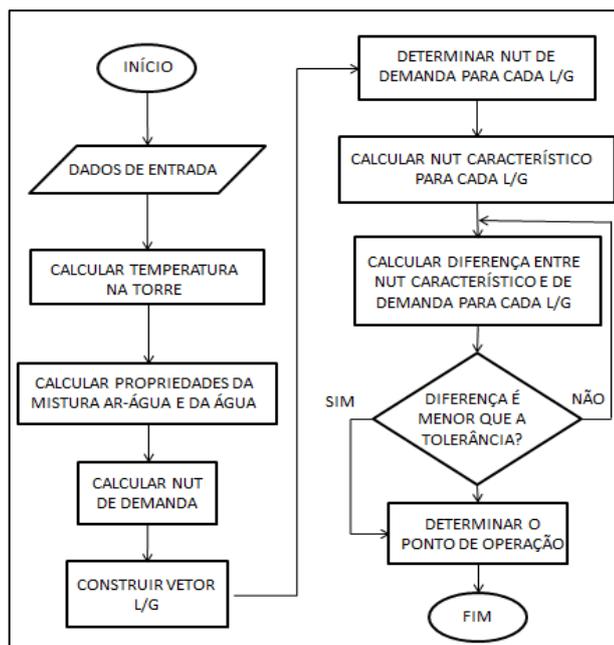


Figura 3 - Fluxograma para calcular o ponto de operação. Fonte: Próprio Autor

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Validação com dados da literatura

Para validação da modelagem matemática adotada foram comparados os resultados obtidos pelo OPCTower1.0 com os resultados da literatura. Foram usados como base os resultados encontrados por Casseta (2003) e Silva (2015), ambos utilizaram equacionamento semelhante ao presente trabalho. Os resultados comparados estão dispostos nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Comparação com dados da literatura (CASSETA, 2003)

Dados de Entrada			
Temperatura de Entrada (°C)	Temperatura de Saída (°C)	Temperatura de Bulbo Úmido (°C)	Pressão Atmosférica (Atm)
45	30	24	1
Resultados			
	CASSETA, 2003	Calculado	Diferença (%)
L/G	1,05	1,03	2,0
NUT	1,53	1,54	1,0

Tabela 2 - Comparação com dados da literatura (SILVA, 2015)

Dados de Entrada			
Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)	Temperatura de bulbo úmido (°C)	Pressão atmosférica (Atm)
34	25	23,3	1

Resultados			
	SILVA, 2015	Calculado	Diferença (%)
L/G	0,56	0,49	7,0
NUT	2,6	2,45	19,0

Análise de Histórico - Hipóteses

Neste tópico serão apresentados hipóteses do comportamento de uma torre de resfriamento que a ferramenta é capaz de apresentar para ajudar o operador/engenheiro na tomada de decisão e avaliação da performance da torre.

O julgamento do desempenho de uma torre foi feito pela análise da eficiência diária da torre de acordo com a eficiência de projeto e seus limites inferior e posterior. A torre analisada possui os dados de projeto apresentados na Tabela 3 a seguir. Os dados de temperatura de bulbo úmido e pressão atmosférica se mantém constante ao longo do histórico assumido.

Tabela 3 - Dados de projeto

Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)	Temperatura de bulbo úmido (°C)	Pressão atmosférica (atm)	Eficiência (%)
42	30	26	1	75

O bom desempenho da torre

O bom funcionamento da torre é avaliado se o range da temperatura e, conseqüentemente, a eficiência está dentro do intervalo desejado, $\pm 20\%$ do valor de projeto, portanto entre 60 e 90% (HENSLEY, 2009). Nesse contexto, percebe-se que simulando os dados de teste da Tabela 4, a torre está dentro das especificações. Esse comportamento pode ser reconhecido, também, pela Figura 4.

Tabela 4 – Histórico do bom desempenho da torre de resfriamento

Data	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)	Eficiência (%)
27/nov	39,3	29,3	75,19
30/nov	39,7	29,4	75,18
01/dez	40,7	30,6	68,71
04/dez	40,4	29,8	73,61
05/dez	40,9	30,3	71,14
06/dez	41,2	30,2	72,37
07/dez	41,5	30,2	72,9
10/dez	41,6	30,5	71,15
11/dez	40,2	30,1	71,13
13/dez	41	30,2	72

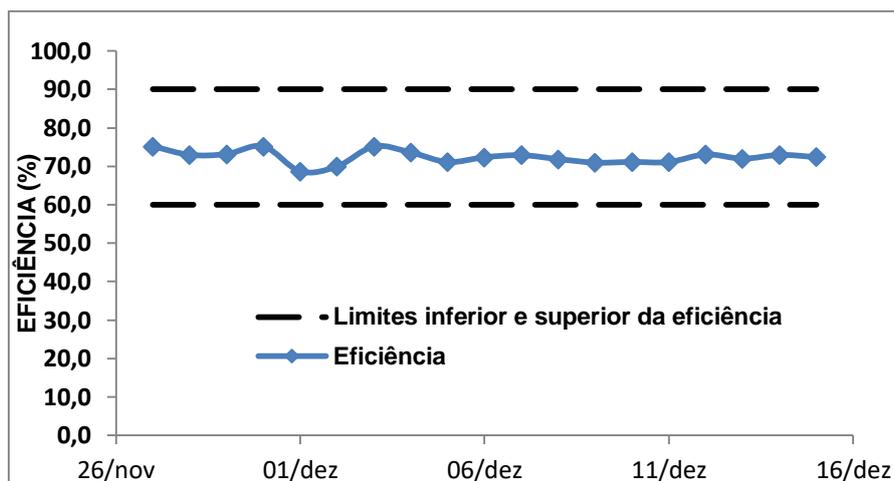


Figura 4 - Eficiência de um bom desempenho

O mau desempenho da torre

O funcionamento da torre é avaliado se a eficiência está dentro do intervalo desejado, $\pm 20\%$ do valor de projeto, entre 60 e 90%. Nesse contexto, percebe-se que simulando os dados de teste da Tabela 5, a torre está fora das especificações entre os dias 04 e 06 de dezembro. Esse comportamento pode ser reconhecido, também, pela Figura 5.

Uma baixa eficiência na torre de resfriamento pode ser justificada por motivos variados. Desde problemas na estrutura da torre, como incrustação, corrosão ou crescimento biológico, como também problemas técnicos como variação do ângulo da pá dos ventiladores, transbordo da piscina. e má funcionamento dos sensores de temperatura e vazão de água. Sabe-se que a torre de arrefecimento é um equipamento que recebe água quente de outros equipamentos da indústria com intuito de resfriá-la. Nesse contexto, problemas no processo também podem interferir no desempenho da torre, como por exemplo uma parada da planta.

Nesse contexto a modelagem tem a função de alertar o operador/engenheiro em relação a algum distúrbio no comportamento da torre para que possa ser solucionado com agilidade.

Tabela 5 - Histórico do mau desempenho da torre de resfriamento

Data	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)	Eficiência (%)
27/nov	41,6	31,3	66,03
30/nov	42	31,2	67,5
01/dez	41	30,2	72
04/dez	30,3	27,8	58,14
05/dez	35	30,6	48,89
06/dez	38	30,8	60,00
07/dez	40	30,6	67,14

10/dez	35,2	28,8	69,57
11/dez	35,1	28,6	71,43
13/dez	36,9	29,4	68,81

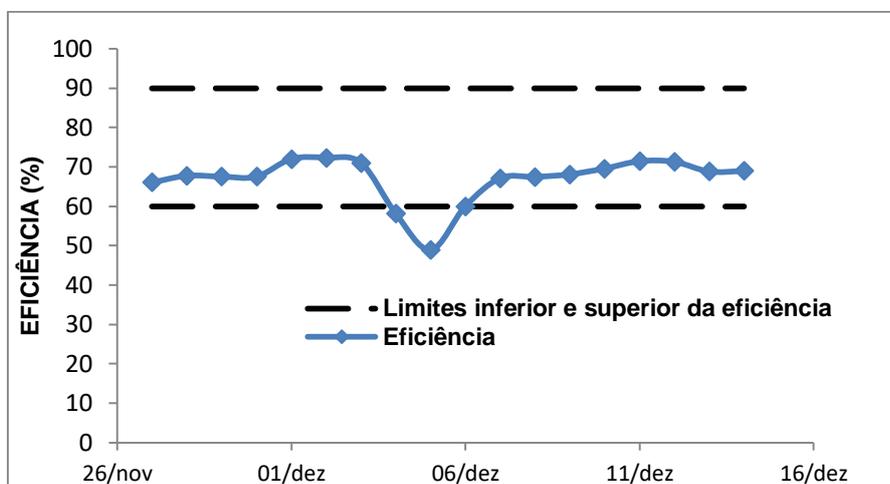


Figura 5 - Eficiência de um mau desempenho

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da modelagem matemática e simulação desenvolvida, permitiu-se uma análise dos efeitos operacionais sobre a eficiência de uma torre de resfriamento. Nesse contexto, foi possível verificar o quanto as temperaturas de entrada e saída da torre influenciam na eficiência da torre. A modelagem foi desenvolvida com sucesso devido a sua validação com dados da literatura. Podendo ser aplicada em casos reais na indústria, a partir da análise do comportamento da torre de acordo com um histórico gerado com a finalidade de otimizar o seu funcionamento e auxiliar o operador na tomada de decisão, com objetivo de diminuir o consumo de água nas indústrias.

REFERÊNCIAS

- OLIVEIRA, J.D. **Auditoria em torres de resfriamento em indústrias químicas**. Especialização em Engenharia Econômica, Estratégia e Prevenção de Perdas na Indústria – CEPI. UFBA, 2011.
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 7th ed., McGraw Hill, Nova York, 1997.
- CASSETTA, E. **Curso teórico de torres de resfriamento de água**. TRA TORRES DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA LTDA. Rio de Janeiro. 2003.

SILVA, A. F. **Otimização de torres de resfriamento**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, UFRJ, 2015.

ÁVILA FILHO, S.; NÓBREGA, B. S. **Oportunidades para melhorar o desempenho térmico em torres de resfriamento**. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA. Campinas, 2015.

LIMA JÚNIOR, R. C. **Modelagem Fenomenológica do desempenho de torres de resfriamento de água acopladas e estudo de casos**. 2011. Dissertação (mestrado em Engenharia Química)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-26082011-141855/pt-br.php>>. Acesso em: Novembro de 2017.

BLACKADDER, D.A; NEDDERMAN, R.M. **Manual de operações unitárias**. São Paulo: Hemus, 2004.

TROVATI, J. **Tratamento de água de resfriamento**. 2004. Disponível em: < http://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua.pdf>. Acesso em: Novembro de 2017.

FEMP (Federal Energy Management Program). **Cooling towers: understanding key components of cooling towers and how to improve water efficiency**. 2011. Disponível em: < http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/waterfs_coolingtowers.pdf >. Acesso em: Novembro de 2017.

GE. **Handbook of industrial water treatment**. Site internet. Disponível em: <<http://www.gewater.com/handbook/index.jsp>>. Acesso em: Novembro de 2017.

MANCUSO, P. C. S. **Reúso de água para torre de resfriamento**. Biblioteca Virtual da Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: < <http://dspace.fsp.usp.br/xmlui/bitstream/handle/bdfsp/678/man001.pdf?sequence=1>>. Acesso em: Novembro de 2017.

CORTINOVIS, G. F.; SONG, T. W. **Funcionamento de uma torre de resfriamento de água**. Revista de Graduação da Engenharia Química. São Paulo, 14, p. 5-10, 2005. Disponível em: < <http://www.hottopos.com/regeq14/giorgia.pdf>>. Acesso em: Novembro de 2017.

MARQUES, C. A. X. **Análise e controle em torres de resfriamento**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Química (PPEQ). Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia – UFBA. 2007

SILVA, J. M. P; ÁVILA, J. S.; ÁVILA, S. F.; MIRRE, R. C.; FIALHO, R. L. L. **Mapping of Nonconformities that Impact the Performance of Cooling Towers: Refinery Case**. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, VOL. 67, 2018.