



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



# AVALIAÇÃO OPERACIONAL DA TROCA DE RECHEIO DE UMA TORRE DE RESFRIAMENTO

CAROLINA BORDINHÃO  
ORIENTADORA : LUCIANE FERREIRA TRIERWEILER

PORTO ALEGRE, 2018

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTO .....</b>	<b>iv</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE SIGLAS .....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE VARIÁVEIS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Torres de resfriamento .....</b>	<b>3</b>
2.1.1 Variáveis importantes para Torres de Resfriamento .....	4
2.1.2 Balanço de energia .....	5
2.1.3 Teoria de Merkel .....	7
<b>2.2 Tipos de recheio .....</b>	<b>11</b>
<b>2.3 Avaliação de torres de resfriamento.....</b>	<b>13</b>
2.3.1 Eficiência conforme definição do <i>Cooling Technology Institute</i> (CTI): Capabilidade .....	14
2.3.2 Modelo de eficiência .....	15
2.3.3 Modelo de efetividade .....	16
2.3.4 Método do CTI.....	17
<b>3 ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>18</b>
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>21</b>
<b>4.1 Coleta de dados .....</b>	<b>21</b>
<b>4.2 Análise da Capabilidade .....</b>	<b>22</b>
<b>4.3 Eficiência e Efetividade .....</b>	<b>22</b>

4.4	Modelagem do CT.....	22
5	RESULTADOS .....	24
5.1	Capabilidade.....	24
5.2	Análise da eficiência .....	25
5.3	Análise da efetividade.....	26
5.4	Modelagem da Característica da Torre (CT) .....	28
6	CONCLUSÃO .....	34
7	REFERÊNCIAS.....	36
8	APÊNDICE A.....	39
9	APÊNDICE B .....	40
10	APÊNDICE C .....	42
11	APÊNDICE D.....	46
12	APÊNDICE E .....	50

## AGRADECIMENTO

À Deus, pela oportunidade de vivenciar neste mundo experiências tão gratificantes, desafiadoras e recompensadoras. Por ter me dado a oportunidade de participar deste mundo ao lado de pessoas tão maravilhosas.

À minha família, principalmente ao meu pai e a minha mãe, por sempre me incentivarem no caminho da educação, com amor incondicional e apoio em todos os momentos. A minha irmã, pelo exemplo de inteligência, dedicação e animação.

Ao Edu, por todo o apoio e amor neste período tão turbulento. Obrigada por sempre me acalmar quando estava ansiosa e me incentivar quando estava desanimada.

À UFRGS, na forma de todas as pessoas, professores, colegas e amigos que compartilharam um pouco desta jornada comigo. Principalmente aos integrantes do departamento de engenharia química, por serem professores e mestres excepcionais preocupados em fornecer uma formação tão completa pelo ensino e pelo exemplo.

À professora Luciane, por toda dedicação e paciência no decorrer deste período de trabalho em conjunto. Muito obrigada pelos incentivos, ideias construtivas e vontade de fazer dar certo.

## RESUMO

O presente trabalho avaliou as influências da troca de recheio em uma torre de resfriamento, bem como os métodos de avaliação de performance de torres de resfriamento. As torres de resfriamento são equipamentos fundamentais em diversas indústrias, e por serem de fácil operação, comumente passam despercebidos quando realizados projetos de recapacitação de plantas industriais. Neste trabalho foi analisado a influência da troca de recheio de 3 células de uma torre de resfriamento de tiragem induzida de 12 células. A avaliação foi feita através das metodologias de efetividade, eficiência, capacidade e característica da torre. O resultado de capacidade demonstrou que o recheio novo apresenta maior desempenho quando comparada com a de projeto, porém este método não pode ser utilizado para comparação de projetos diferentes de recheios. As análises de efetividade e eficiência demonstraram que a situação pré troca de recheio apresentava desempenho melhor que pós troca, porém estes indicadores apresentam grande influência das variações climáticas e não podem ser utilizados como parâmetros de análise da situação operacional da torre. Já a característica da torre foi analisada para diferentes faixas de umidade. Esta análise demonstrou uma grande influência da umidade e da razão L/G para o desempenho da torre, porém apontou que nas situações mais críticas de operação, o novo recheio apresenta melhor desempenho. Sendo assim, é sustentada a hipótese que o novo recheio apresentou melhorias para o funcionamento da torre de resfriamento.

Palavras chave: torre de resfriamento, eficiência, performance, recheios.

## ABSTRACT

This paper evaluated the influences of the changing of fill in a cooling tower, as well as the methods of performance assessment in cooling towers. The cooling towers are essential equipment in different industries, and might be overlooked due to its easy operation regarding revamping projects in industrial plants. This paper aimed to analyze the influence of the fill change in 3 cells of a induced draft cooling tower with 12 cells. The analysis was made through the methods of effectiveness, efficiency, capability and tower characteristics. The result of capability showed that the new fill presented greater performance when compared with the project; however, this method cannot be used for different fill projects comparison. The analysis of effectiveness and efficiency showed that the situation before the fill change had better performance, however these indicators present huge influence of weather variation and cannot be used as parameter for the analysis of the of operational situation of the tower. The tower characteristics was analyzed for different levels of humidity. It displayed a great influence of the humidity and ratio L/G for the tower performance, but has also pointed that the new filling presented better performance in critical operation mode. Hence, the hypothesis in which the new filling presented improvements for the cooling tower performance has been kept.

Key words: cooling tower, efficiency, performance, fills.

## LISTA DE SIGLAS

AR – água de resfriamento

CT – característica da torre

CTI – *Cooling Technology Institute*

SD – *slowdown*

TBS – temperatura de bulbo seco

TBU – temperatura de bulbo úmido

**LISTA DE VARIÁVEIS**

$L$  – vazão de água (kg/s)

$G$  – vazão do ar (kg/s)

$dQ_{total}$  - calor total trocado

$dQ_{convecção}$  - calor trocado por convecção

$dQ_{evaporação}$  – calor trocado por evaporação

$h_{conv}$  – coeficiente de transferência de calor por convecção ( $Wm^{-2}C^{-1}$ )

$T_{ar}$  -temperatura do ar

$T_{água}$  – temperatura da água

$dA$  - área de troca térmica

$h_m$  – coeficiente de transferência de massa ( $kg\ m^{-2}s^{-1}$ )

$L_c$  – calor latente de vaporização da água ( $kcal\ kg^{-1}$ )

$UE_1$  – umidade específica do ar na entrada

$UE_2$  – umidade específica do ar na saída

$\dot{m}_{ar}$  – vazão mássica do ar ( $kg\ s^{-1}$ )

$dH_{ar}$  - variação da entalpia do ar ( $kcal\ kg^{-1}$ )

$C_p$  - calor específico do ar a pressão constante

$c_{água}$  - calor específico da água

$Z$  – altura (m)

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1- Sub conjunto de dados coletados no historiador da unidade.....	21
Tabela 2 - Comparação dos resultados de Capabilidade da torre .....	24
Tabela 3 - Comparação da eficiência antes e após troca de recheio .....	26
Tabela 4 - Valores médios de CT e desvio padrão para cada faixa de umidade. ....	29
Tabela 5 - Ajuste de dados para correlação entre CT e LG para dados pré-troca de recheio .....	30
Tabela 6- Ajuste de dados para correlação entre CT e LG para dados pós-troca de recheio .....	31

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Esquema de torre de resfriamento de tiragem induzida em fluxo cruzado. (Fonte : CHEREMISINOFF, 1986).....	4
Figura 2-2. Diagrama demonstrativo das transferências de calor em um gota de água (CASSETA, 2003) .....	6
Figura 2-3 Esquema representativo da teoria de Merkel (Fonte: LIZARAZU, 2016) .....	8
Figura 2-4. Diagrama de entalpia específica versus temperatura da água em torres de resfriamento (Fonte: PERRY; GREEN, 1997) .....	11
Figura 2-5. Exemplos dos tipos de recheio: a) filme, b) gotejamento e c) respingo (Fonte: BERTRAND, 2011). .....	12
Figura 2-6. (a) Enchimento do tipo respingo (SPX COOLING TECHNOLOGIES INC, 2012), (b) Enchimento do tipo gotejamento(GROBBELAAR; REUTER; BERTRAND, 2013), (c) Recheio do tipo filme (SPX COOLING TECHNOLOGIES INC, 2012) .....	13
Figura 2-7. Exemplo de curva de performance para 90% da vazão de projeto da torre (Fonte: COOLING TECHNOLOGY INSTITUTE, 2000) .....	15
Figura 2-8 Relação entre <i>range</i> e <i>approach</i> ( adaptado de BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY, 2007).....	16
Figura 2-9 Entalpia do ar saturado vs. Temperatura (Fonte: LU; CAI, 2002). .....	17
Figura 3-1 Torre de resfriamento estudada (Fonte: BRASKEM, 2016).....	18
Figura 3-2 Esquema representativo da torre de resfriamento (Fonte: BRASKEM, 2016) . .....	19
Figura 4-1. Ajuste de dados da entalpia do ar saturado (Fonte: BRUM, 2015). .....	23
Figura 5-1. Avaliação da eficiência, TBS e TBU ao longo do tempo, pré-troca de recheio .....	25
Figura 5-2. Avaliação da eficiência, TBS e TBU ao longo do tempo, pós troca de recheio. .....	25
Figura 5-3. Variação da efetividade da torre ao longo do tempo, e a influência da TBU antes da troca do recheio.....	27
Figura 5-4. Variação da efetividade da torre ao longo do tempo, e a influência da TBU após da troca do recheio. ....	27

Figura 5-5 Variação dos CT's médios pré e pós troca de recheio com a faixa de umidade	28
Figura 5-6. Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 95-100%.	31
Figura 5-7.Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 70-75%.	32
Figura 5-8. Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 50-55%.	32
Figura 10-1 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 95 - 100%.	42
Figura 10-2 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa de 90-95%	42
Figura 10-3 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa de 85-90%	43
Figura 10-4 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa de 80-85%	43
Figura 10-5 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa de 75-80%	43
Figura 10-6 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa de 70-75%	44
Figura 10-7 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa de 65-70%	44
Figura 10-8 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa de 60-65%	45
Figura 10-9 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa de 55-60%	45
Figura 10-10 Ajuste de dados para faixa de umidade relativa de 50-55%.	45
Figura 11-1 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 95 - 100%.	46
Figura 11-2 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 90-95%	46
Figura 11-3 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 85-90%	46
Figura 11-4 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 80-85%	47
Figura 11-5 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 75-80%	47
Figura 11-6 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 70-75%	47
Figura 11-7 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 65-70%	48
Figura 11-8 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 60-65%	48
Figura 11-9 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 55-60%	48
Figura 11-10 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 50-55%	49
Figura 12-1 Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 90-95%.	50
Figura 12-2 Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 85-90%.	50

Figura 12-3. Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 80-85%.....	51
Figura 12-4.Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 75-80%.....	51
Figura 12-5 Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 65-70%.....	52
Figura 12-6. Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 60-65%.....	52
Figura 12-7. Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 55-60%.....	53

## 1 INTRODUÇÃO

As torres de resfriamento são essenciais em grande parte dos processos da indústria química. São equipamentos de baixa complexidade construtiva, porém muitas vezes são subestimados e com o decorrer do tempo, a falta de manutenção e a perda de desempenho, começam a apresentar reflexos em toda a produção. Estes reflexos são notados na perda de eficiência da troca térmica que pode ocasionar um fornecimento de água de resfriamento com temperatura acima da requerida pelo processo.

Mesmo apresentando grande influência na operação cotidiana, estes equipamentos normalmente são avaliados somente nas fases de projeto da planta. Sendo assim, apesar dos processos apresentarem alterações e interferências ao longo dos anos, como aumento de capacidade e instalações de novas áreas, raramente se investe na melhoria do desempenho de uma torre de resfriamento (JUNIOR, 2011).

Neste trabalho, foi estudada uma torre de resfriamento de uma empresa petroquímica, que vem notando a necessidade de redução de carga em dias quentes, já que a temperatura de saída da água frequentemente fica superior a temperatura de projeto (acima de 30°C), causada por uma ineficiência da torre de resfriamento. Nos últimos 2 anos de operação, a torre foi responsável por uma diminuição de carga de nafta processada em 3% da capacidade total em alguns períodos, gerando perdas operacionais significativas para a empresa. Além disso, projetos de aumento de capacidade em outras unidades foram realizados, sem a readequação da capacidade de troca térmica da torre instalada.

Estes fatores, juntamente com a deterioração do recheio, como queda de parte de sustentação e incrustações devido à qualidade da água, foram responsáveis pela ocorrência de fornecimento de água de resfriamento acima da temperatura necessária, ressaltando assim a necessidade de um projeto para recapacitação da torre. Para tanto, a alternativa estudada foi a troca do recheio de algumas células da torre para algum novo recheio que apresentasse performance melhor que o recheio original. Assim sendo, em 2017 foi realizada a troca do recheio de 3 das 12 células existentes nesse sistema. Porém, em virtude da troca ser realizada em somente algumas células e não existirem medidores específicos por células, a melhoria desta troca não pôde ser

confirmada, não existindo assim a validação da hipótese que a troca do recheio das outras células traria benefícios significativos para a operação do equipamento.

Desta forma, o objetivo principal deste trabalho é verificar se o novo recheio realmente apresenta melhorias operacionais quando comparado com o recheio anterior. Para tanto serão empregadas diversas metodologias de avaliação de torres de resfriamento, incluindo a modelagem dos sistemas com relação à característica da torre - que é específica para cada tipo de recheio, e assim definir a melhor alternativa para a avaliação da situação estudada.

O trabalho está estruturado em uma revisão bibliográfica sobre torre de resfriamento, equacionamento matemático e tipos de recheio, um breve estudo do caso atual da torre de resfriamento, seguido pelas avaliações e modelagens matemáticas realizados para comparar ambas situações (pré-troca e pós-troca de recheio).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As torres de resfriamento são fundamentais em muitos setores da indústria química, sendo responsáveis pelo fornecimento de água de resfriamento para diversas etapas do processo. Responsáveis por grande parte das correntes de troca térmica de uma indústria, são de grande importância para garantir uma boa performance de equipamentos mais complexos.

Apesar da importância e do grande interesse na otimização de maneiras de projetar uma torre de resfriamento, existe uma carência de métodos para avaliação de torres durante seu funcionamento. Esta carência é mais notada pela falta de indicadores de desempenho e monitoramento sobre o melhor momento para a realização de investimento e processos de melhoria nestes sistemas. (CORTINOVIS et al., 2009; OIKAWA, 2012)

As seções a seguir, trarão uma breve explanação sobre o funcionamento deste equipamento, modelagem matemática e influências dos diversos tipos de recheio existentes.

### 2.1 Torres de resfriamento

As torres de resfriamento são equipamentos utilizados para o fornecimento de água de resfriamento industrial, podendo esta ser utilizada para resfriamento de correntes em condensadores, trocadores de calor e outros equipamentos da indústria. Basicamente, a torre de resfriamento é um equipamento no qual a água aquecida troca calor por condução e convecção com ar atmosférico.

Existem diversos tipos de torre de resfriamento, sendo a mais usual em plantas petroquímicas a torre de resfriamento de tiragem induzida em fluxo cruzado. Neste modelo, ventiladores no topo da torre succionam o ar das laterais da torre, que trocam calor com a água descendente (CTI, 2018). Um esquema representativo da torre de fluxo cruzado pode ser visto na Figura 2-1.

A água, proveniente do processo (ou seja, com grande carga térmica) é distribuída na parte superior da torre e desce lentamente através de algum tipo de recheio, em fluxo cruzado com uma corrente de ar frio à temperatura ambiente. No contato direto

das correntes de água e ar ocorre a evaporação de parte da água, principal fenômeno que produz seu resfriamento.

Um item muito importante na escolha de uma torre de resfriamento é o recheio, sendo este responsável por fornecer a superfície para o contato eficaz entre a água quente e o ar, de forma a promover a maior área de troca de massa e energia possível (CHEREMISINOFF; CHEREMISINOFF, 1981). Além disso, o recheio deve ser responsável pela distribuição uniforme da água por toda a área da torre. Usualmente, os recheios podem ser bandejas perfuradas, colmeias de plástico ou metálico.

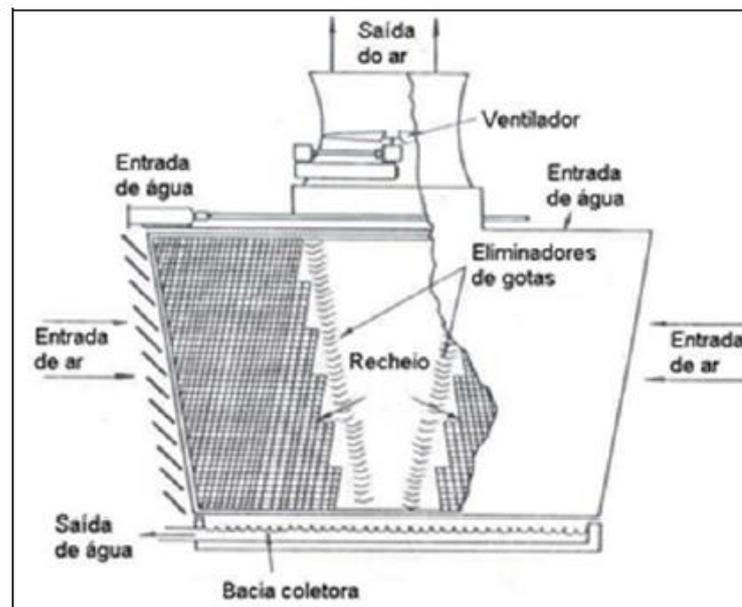


Figura 2-1. Esquema de torre de resfriamento de tiragem induzida em fluxo cruzado. ( Fonte : CHEREMISINOFF, 1986).

### 2.1.1 Variáveis importantes para Torres de Resfriamento

Dentro do projeto e operação de torres de resfriamento, existem diversos parâmetros que são de fundamental importância no monitoramento e modelagem de torres de resfriamento:

- Temperatura de bulbo seco (TBS): temperatura ambiente do ar, medida por termômetros convencionais.

- Temperatura de bulbo úmido (TBU): é definida como sendo a temperatura medida ao ser colocada uma mecha úmida na ponta de um termômetro em contato com o ar. Como o ar ao redor da mecha não está saturado ocorre a evaporação da água. À medida que a água evapora, calor latente é removido da mecha. Como o ar nesta

condição está mais quente, inicia-se um fluxo de calor sensível do ar para a mecha, e a temperatura em que ocorre o equilíbrio entre a vaporização da água e o fluxo de calor sensível do ar para a água é chamada temperatura de bulbo úmido (OLIVEIRA, 2010). A temperatura de bulbo úmido do ar é a menor temperatura que a água pode atingir na saída da torre de resfriamento (KERN, 1950).

- Approach: é definido como sendo a diferença de temperatura entre a água que deixa a torre (água resfriada) e a temperatura de bulbo úmido do ar que entra na torre (EVANS JR, 1980). O desempenho de uma torre de resfriamento é influenciado pelo *approach*, pois quanto menor o seu valor, mais próxima da menor temperatura possível de ser atingida estará a água que sai da torre e, portanto, mais próxima estará o desempenho da torre do limite termodinâmico.

- Range: é a diferença entre a temperatura em que a água quente entra na torre e a temperatura em que a água fria sai da torre (BURGER, 1995).

- Água de reposição (ou make-up): é a água reposta na bacia da torre de resfriamento para compensar as perdas por evaporação, purga e respingos (BURGER, 1995).

- Purga: é o descarte de determinado volume de água da torre a fim de diminuir a concentração de sais ou prevenir a deposição de sólidos.

- Umidade específica: é a quantidade de vapor d'água contida no ar numa determinada condição. Geralmente é expressa em quilograma de água por quilograma de ar seco (BURGUER, 1995).

- Umidade relativa: é a razão entre a quantidade de vapor d'água no ar e a máxima quantidade de vapor que o ar poderia conter, na mesma temperatura.

### **2.1.2 Balanço de energia**

Para este tipo de equipamento, o balanço de energia considera a troca de calor da água de resfriamento com o ar atmosférico, levando em consideração diversas influências, como a razão de vazão de água e ar (L/G), temperatura de bulbo úmido (TBU), temperatura de bulbo seco (TBS), entre outras variáveis conforme descrito a seguir.

O conceito da troca térmica de uma torre de resfriamento se dá basicamente por dois tipos de calor: calor sensível e calor latente, sendo assim é necessário considerar os

fenômenos que ocorrem no interior e na superfície de uma gota de água e no ar, conforme demonstrado na Figura 2-2 (OIKAWA, 2012).

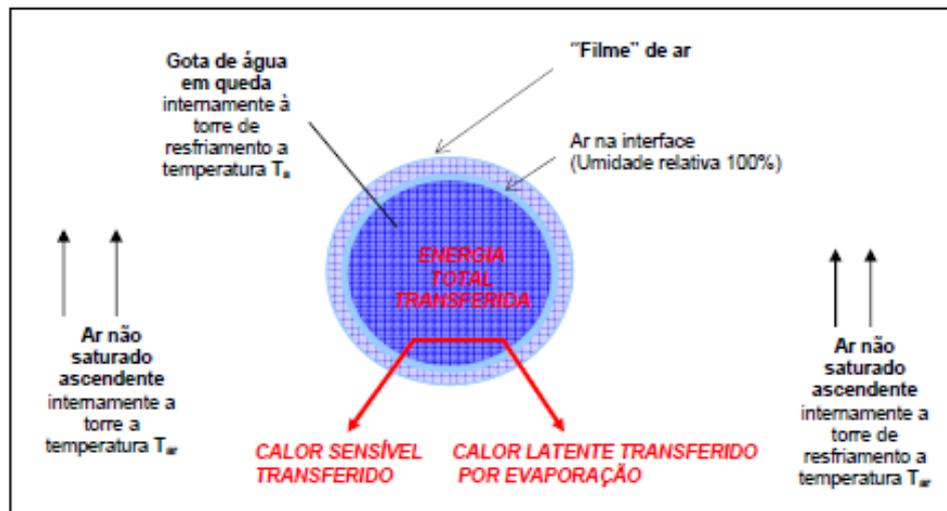


Figura 2-2. Diagrama demonstrativo das transferências de calor em uma gota de água (CASSETA, 2003)

A força motriz para a transferência de massa é a diferença entre a pressão do vapor da água na superfície da gotícula de água e a pressão parcial do vapor de água no ar. Esta transferência de calor é adiabática, gerando assim um resfriamento da água devido a evaporação da água, diminuindo a temperatura da gota até a temperatura de bulbo úmido. Além dessa troca de calor, existe a transferência de calor sensível pela diferença de temperatura entre a água e o ar.

Considerando que o coeficiente de transferência de calor do líquido é muito maior que o coeficiente de transferência de calor do ar, a temperatura da interface ar-líquido pode ser aproximada para a temperatura de bulbo úmido, e como o número de Lewis, para sistemas de água-ar é muito próximo de 1, a temperatura de saturação adiabática, pode ser considerada a temperatura de bulbo úmido (CORTINOVIS et al., 2009; JASIULIONIS, 2012). Além disso, pode-se assumir o equilíbrio da interface ar-água, e então a entalpia da interface passa a ser a entalpia da saturação do ar. Estas considerações tornam possíveis uma melhor avaliação e projeto de uma torre de resfriamento. O balanço de energia para o volume do controle da torre de resfriamento será representado pela abordagem da teoria de Merkel na subseção 2.1.3.

### 2.1.3 Teoria de Merkel

Uma teoria muito conhecida e a mais utilizada para torres de resfriamentos é a teoria de Merkel, que considera como força motriz no processo a diferença entálpica (FERNANDES, 2012). Nesta teoria, são considerados os coeficientes de transferência de calor sensível e de transferência de massa em um único coeficiente global.

Esta teoria se baseia no fato de que o calor é transferido da água para o ar por convecção e por evaporação, como pode ser visto na equação (1).

$$dQ_{total} = dQ_{convecção} + dQ_{evaporação} \quad (1)$$

onde  $dQ_{total}$  é o calor total trocado, e  $dQ_{convecção}$  e  $dQ_{evaporação}$  são os calores trocados por convecção e evaporação, respectivamente.

No processo de convecção, o calor é transferido da água para o ar em virtude do gradiente de temperatura entre o ar e a água. Logo, tem-se a equação (2)

$$dQ_{convecção} = h_{conv} (T_{água} - T_{ar})dA \quad (2)$$

onde  $h_{conv}$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção [ $W m^{-2} °C^{-1}$ ],  $T_{água}$  é a temperatura da água,  $T_{ar}$  é a temperatura do ar e  $dA$  é a área de troca térmica.

As principais simplificações realizadas no modelo de Merkel, que reduzem os cálculos a um procedimento relativamente simples são as seguintes:

- Toda gotícula de água está envolta por um película de ar saturada na mesma temperatura que a água, e o cálculos das transferências de calor e massa consideram a interface entre o ar e essa película.(JASIULIONIS, 2012; KLOPPERS; KRÖGER, 2005);
- A redução na vazão de água devido à perda por evaporação não é considerada nos balanços de massa e energia, isto é, a vazão de água é constante;
- O número de Lewis,  $Le$ , que correlaciona os coeficientes convectivos de transferência de calor e massa, é igual a 1. (CORTINOVIS et al., 2009; JASIULIONIS, 2012).

A teoria de Merkel é, resumidamente, a afirmação de que toda transferência de calor dentro de uma torre de resfriamento ocorre por difusão e posterior troca térmica por convecção entre a água e o ar (GURGEL et al., 2016). A Figura 2-3 apresenta esquematicamente os principais fenômenos e variáveis que são utilizados na dedução da teoria de Merkel.

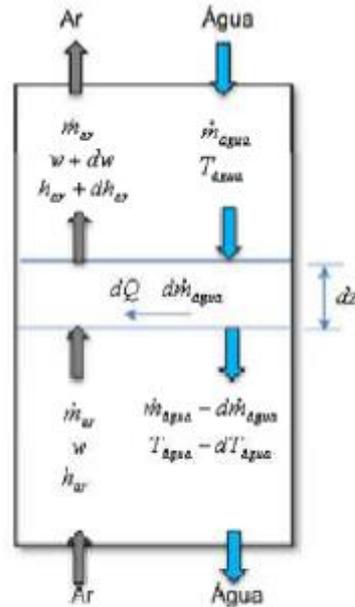


Figura 2-3 Esquema representativo da teoria de Merkel (Fonte: LIZARAZU, 2016)

A transferência da água para a corrente gasosa ocorre por dois mecanismos. O primeiro é a difusão das moléculas de água para o ar pela interface. O segundo é o arraste das moléculas de água pela corrente de ar que normalmente é gerada pela ação de ventiladores. Logo, o calor retirado da torre por evaporação pode ser representado por:

$$dQ_{evaporação} = h_m L_c (UE_2 - UE_1) dA \quad (3)$$

onde  $h_m$  é o coeficiente de transferência de massa ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );  $L_c$  é o calor latente de vaporização da água ( $\text{kcal kg}^{-1}$ );  $UE_1$  e  $UE_2$  representam a umidade específica do ar antes de entrar em contato com a água e a umidade do ar saturado, respectivamente, e  $dA$  é a área de troca térmica ( $\text{m}^2$ ).

A energia recebida pelo ar neste processo pode ser expressa por:

$$dQ = \dot{m}_{ar} dH_{ar} \quad (4)$$

onde  $\dot{m}_{ar}$  é a vazão mássica do ar ( $\text{kg s}^{-1}$ ) e  $dH_{ar}$  é a variação da entalpia do ar ( $\text{kcal kg}^{-1}$ ). Esta variação de entalpia ocorre em virtude do calor sensível e do calor latente recebidos pelo ar em virtude da troca térmica com a água. Sendo assim, pode-se aproximar o valor de  $H_{ar}$  como sendo:

$$H_{ar} = C_p T_{ar} + L_c UE_{ar} \quad (5)$$

onde  $C_p$  é o calor específico do ar a pressão constante,  $T_{ar}$  é a temperatura do ar, e por fim,  $UE_{ar}$  é a umidade específica do ar. Além disso, o calor transferido da água para o ar pode ser expresso por:

$$dQ = \dot{m}_{agua} c_{agua} dT_{agua} \quad (6)$$

onde  $c_{\acute{a}gua}$  é o calor específico da água,  $\dot{m}_{agua}$  é a vazão mássica de água e  $dT_{agua}$  é a variação da temperatura da água.

Utilizando a aproximação de Merkel citada anteriormente, na qual se considera que não existem perdas de massa de água por evaporação, ou seja, a massa de água é constante na torre de resfriamento, chega-se a seguinte equação:

$$dQ = \dot{m}_{agua} c_{agua} dT_{agua} = h_{conv}(T_{\acute{a}gua} - T_{ar})dA + h_m L_c (UE_2 - UE_1)dA \quad (7)$$

Por fim, como o fator de Lewis é definido como sendo a correlação entre a difusividade térmica e difusividade mássica, tem-se a seguinte expressão:

$$Le = \frac{h_{convecção}}{h_m c_p} \quad (8)$$

Utiliza-se a aproximação de Merkel que considerada que  $Le=1$ , aproximando que a facilidade da transferência de calor por convecção é a mesma para a transferência de massa por evaporação.

Portanto, chega-se a seguinte equação:

$$dQ = \dot{m}_{agua} c_{agua} dT_{agua} = h_m c_p (T_{\acute{a}gua} - T_{ar})dA + h_m L_c (UE_2 - UE_1)dA \quad (9)$$

Obtendo-se assim:

$$dQ = \dot{m}_{agua} c_{agua} dT_{agua} = h_m [c_p T_{\acute{a}gua} + L_c UE_2] - (c_p T_{ar} + L_c UE_1)]dA \quad (10)$$

Substituindo a equação (5) na equação (10), obtém-se:

$$dQ = \dot{m}_{agua} c_{agua} dT_{agua} = h_m (H_{ar_{sat}} - H_{ar_{seco}})dA \quad (11)$$

onde  $H_{ar_{sat}}$  e  $H_{ar_{seco}}$  representam a entalpia do ar saturado e a entalpia do ar seco. Como não é possível calcular o real estado do ar na saída, Merkel assumiu que o ar deixando a torre estava saturado com vapor de água (KLOPPERS; KRÖGER, 2005). A partir da equação 11 obtém-se:

$$\frac{h_m dA}{\dot{m}_{agua}} = \frac{c_{agua} dT_{agua}}{H_{ar_{sat}} - H_{ar_{seco}}} \quad (12)$$

A equação (12) é conhecida como equação de Merkel. Com a integração desta, obtém-se:

$$\frac{KaV}{L} = \frac{h_m a_p A_p z}{\dot{m}_{\text{agua}}} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_{\text{agua}} dT_{\text{agua}}}{H_{\text{ar,sat}} - H_{\text{ar,seco}}} \quad (13)$$

onde  $a_p$  representa a área específica do preenchimento da torre ( $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$ );  $A_p$  representa a área da seção transversal do recheio ( $\text{m}^2$ ) e  $z$  representa a altura da torre de resfriamento (m)

O termo  $\frac{KaV}{L}$  é um parâmetro adimensional que representa o coeficiente de desempenho da torre. O termo  $Ka$  ( $\text{kg m}^{-3}\text{s}^{-1}$ ) é o resultado entre o produto de  $K$  (coeficiente total de transferência calor,  $\text{kg}^{-1} \text{m}^2$ ) e a área de transferência de calor por unidade de volume  $a$ , em  $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$ . Já o termo  $L$  representa a vazão mássica de água na torre, em  $\text{kg s}^{-1}$ .

Além disso, pode-se fazer a aproximação de que na faixa de temperatura de operação de uma torre de resfriamento, o  $c_{\text{agua}}$  permanece constante.

Logo, a equação de Merkel na forma integrada pode ser expressa por:

$$\frac{KaV}{L} = c_{\text{agua}} \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT_{\text{agua}}}{H_{\text{ar,sat}} - H_{\text{ar,seco}}} \quad (14)$$

Como pode ser notado, o lado direito da equação depende somente das propriedades do ar e da água, sendo independente das dimensões da torre.

Na Figura 2-4, a linha de equilíbrio da água é representada pela linha AB, e é determinada pela temperatura de entrada e saída da água na torre. A linha de operação do ar começa no ponto C (entalpia do ar na entrada) e termina no ponto correspondente a entalpia do ar na saída, apresentando inclinação L/G. A integral da equação 14, é representada pela área ABCD da Figura 2-4, sendo assim conhecida como característica da torre, que varia com a relação de L/G (PERRY; GREEN, 1997).

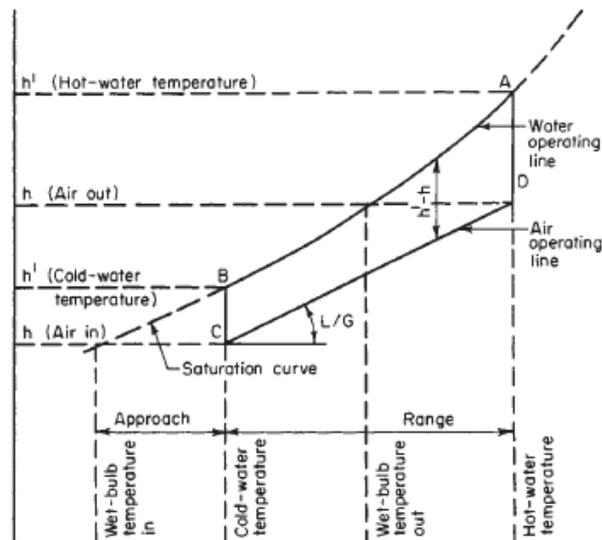


Figura 2-4. Diagrama de entalpia específica versus temperatura da água em torres de resfriamento (Fonte: PERRY; GREEN, 1997)

## 2.2 Tipos de recheio

Em uma torre de resfriamento, a função do recheio é basicamente aumentar a quantidade de energia que é transferida da água para o ar. O recheio aumenta a superfície de contato entre a água e o ar, que é onde ocorre a transferência de massa e calor (BERTRAND, 2011; CHEREMISINOFF; CHEREMISINOFF, 1981). O aumento da troca térmica de uma torre de resfriamento é responsável pelo aumento da eficiência de um sistema de resfriamento como um todo.

Existem três diferentes tipos de recheios que são mais comumente utilizados: o recheio tipo filme, gotejamento e respingo (também conhecido como *splash*) (SPX COOLING TECHNOLOGIES INC, 2012), conforme pode ser visto na Figura 2-5.

Os recheios do tipo respingo e gotejamento apresentam um modo de funcionamento muito parecido, sendo geralmente utilizados em arranjos de fluxo cruzado. Este tipo de arranjo apresenta uma nova camada de água para ter contato com o ar, durante todo o comprimento da torre.

A finalidade dos recheios tipo respingo e gotejamento é realizar a mistura da água com ar movendo-a na direção horizontal (corrente cruzada) ou vertical (contra-corrente). A máxima exposição da superfície da água ao fluxo de ar é obtida pela repetição da interrupção da queda da água, respingando-se sobre tábuas de respingo individuais, onde se origina a denominação deste recheio. É de fundamental importância

que o enchimento do tipo respingo seja suportado adequadamente, pois as tábuas de respingo devem estar na posição horizontal, caso contrário à água e o ar serão canalizados através do enchimento da torre e sua capacidade diminuirá sensivelmente. (TERMOPARTS, 2018). Existem diversos tipos de suporte para enchimento tipo respingo, desde grades de aço galvanizado, grades de poliéster reforçadas com fibra de vidro, até grades executadas em aço inoxidável. Estes asseguram o nivelamento das tábuas de respingos durante toda a extensão da torre. Os materiais mais utilizados neste tipo de recheio são madeira, plásticos, cimento, amianto, aço galvanizado, alumínio, aço inoxidável e cerâmico. No entanto, devido ao alto custo, estes materiais tem o uso limitado a aplicações especiais.

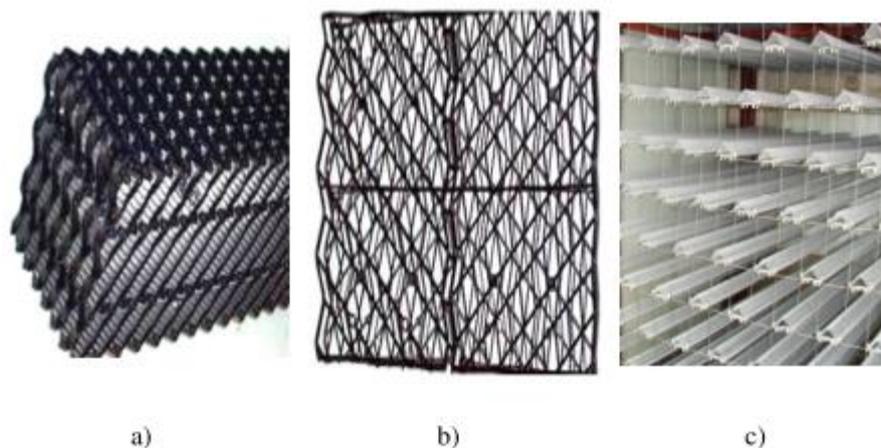


Figura 2-5. Exemplos dos tipos de recheio: a) filme, b) gotejamento e c) respingo (Fonte: BERTRAND, 2011).

Já os recheios do tipo filme são mais comumente utilizados em torres de contracorrente, onde o filme é feito de múltiplas superfícies verticais na qual a água quente passa na forma de finos filmes ocorrendo a transferência de calor. Uma representação do recheio tipo filme pode ser visto na Figura 2-6. A eficiência deste tipo de enchimento depende de sua habilidade de espalhar a água em um filme fino, escorregando sobre áreas grandes, ocasionando a máxima exposição da água à corrente de ar. Porém este tipo de recheio é mais sensível à irregularidade do fluxo de ar e da distribuição de água do que o tipo respingo, logo o projeto da torre deve assegurar um fluxo uniforme, tanto do ar como da água, e todo o volume de enchimento também precisa ser adequadamente suportado e espaçado uniformemente.

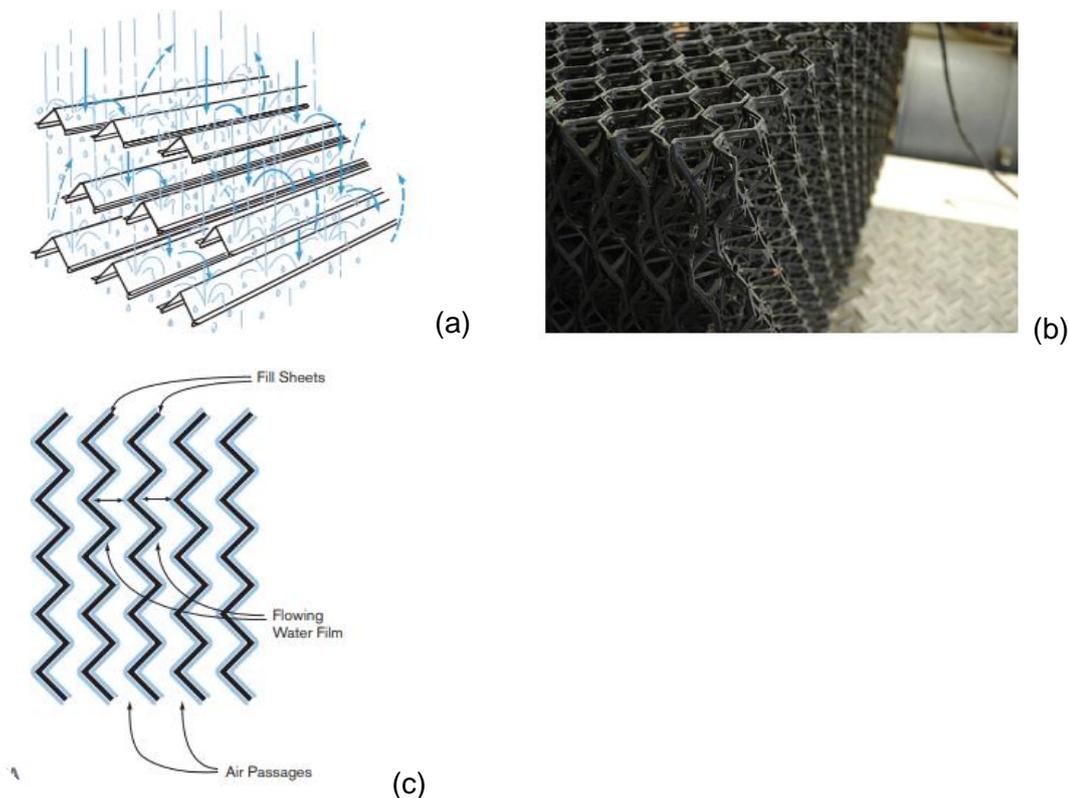


Figura 2-6. (a) Enchimento do tipo respingo (SPX COOLING TECHNOLOGIES INC, 2012), (b) Enchimento do tipo gotejamento (GROBBELAAR; REUTER; BERTRAND, 2013), (c) Recheio do tipo filme (SPX COOLING TECHNOLOGIES INC, 2012)

### 2.3 Avaliação de torres de resfriamento

Apesar de serem equipamentos altamente difundidos e de grande uso na indústria, ainda existe uma dificuldade em encontrar metodologias para a avaliação da performance da torre de resfriamento durante sua campanha de operação.

Os principais parâmetros que podem ser monitorados diretamente durante a operação de uma torre de resfriamento refletem somente informações que afetam o consumidor da água de resfriamento, existindo poucos métodos de monitoramento que sejam representativos quando se refere à atual situação e desempenho da torre de resfriamento.

A seguir, estão detalhados os principais métodos que podem ser utilizados para avaliação da torre e que geralmente são utilizados para avaliações pontuais, tendo em vista que alguns destes indicadores necessitam de uma análise mais aprofundada para apresentarem resultados significativos a operação.

### 2.3.1 Eficiência conforme definição do *Cooling Technology Institute* (CTI): Capabilidade

A eficiência de uma torre de resfriamento pode ser expressa pela determinação da capabilidade térmica de uma torre de resfriamento. A norma mais utilizada é a ATC 105, o que é uma norma padrão de testes de torre de resfriamento do CTI (COOLING TECHNOLOGY INSTITUTE, 2000).

A norma conta com 5 métodos de cálculo de eficiência de uma torre. Usualmente, estes métodos comparam as condições do recheio especificadas pelo fornecedor (no projeto) com as condições operacionais atuais da torre. Sendo assim, para o cálculo da eficiência existem diversos métodos que podem ser utilizados, sendo escolhidos em virtude do tipo de informação que se tem disponível do recheio.

O método utilizado no presente trabalho é o teste de uma torre de resfriamento de tiragem induzida utilizando o método da curva de performance. Estas informações devem ser fornecidas pelo fabricante do recheio, e conter as curvas que correlacionam a temperatura de bulbo úmido com a temperatura de saída, para diferentes *ranges* de operação. Para a aplicação deste método, é necessária a existência de no mínimo 3 curvas de performance (para diferentes vazões), com no mínimo 3 diferentes ranges em cada. Para a utilização do método, é necessário o monitoramento de variáveis de fácil obtenção em uma torre de resfriamento, como vazão de água, temperatura da água na entrada, temperatura de saída da água, temperatura de bulbo úmido e o range. Além disso, é necessário monitorar a potência dos ventiladores para comparar a operação deste com as condições de projeto. Um exemplo de curva de performance pode ser visto na Figura 2-7.

Os principais passos deste procedimento são:

- Elaboração de 3 curvas (1 para cada vazão) comparando para cada *range*, qual seria a temperatura de saída prevista pelo recheio, na condição da temperatura de bulbo úmido do teste;
- A partir das curvas de vazão por temperatura de saída, deve-se determinar para cada curva de vazão, qual seria a temperatura de saída para o *range* do teste;

- Com as temperaturas de saída para o range do teste, plotar uma curva de temperatura de saída por vazão;
- Determinar para a temperatura de saída do teste, qual deveria ser a vazão de água;
- Corrigir esta vazão com as condições do ar, calculando assim a vazão do teste ajustada;
- Comparar a vazão real do teste, com a vazão necessária corrigida pelas condições do ar.

Esta relação entre a vazão real do teste e a vazão necessária expressa a capacidade de uma torre de resfriamento quando comparado com as condições de projeto.

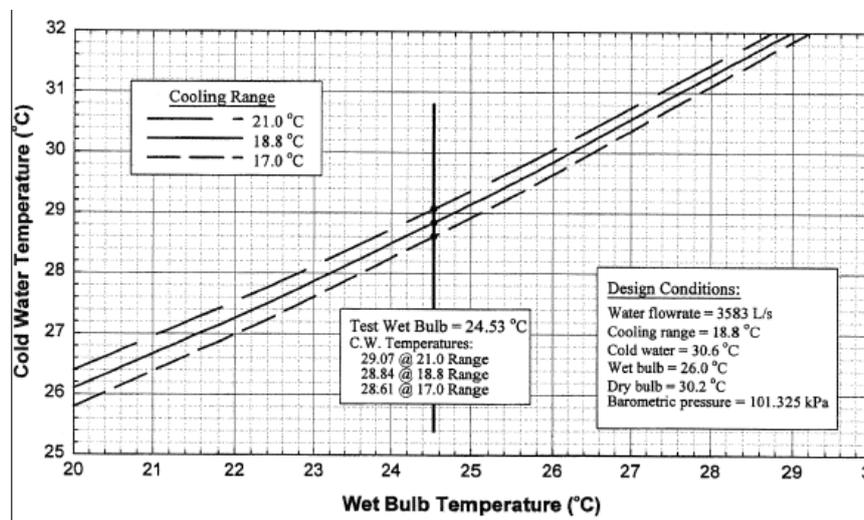


Figura 2-7. Exemplo de curva de performance para 90% da vazão de projeto da torre (Fonte: COOLING TECHNOLOGY INSTITUTE, 2000)

### 2.3.2 Modelo de eficiência

A eficiência de troca térmica em uma torre de resfriamento é limitada pela temperatura de bulbo úmido do ambiente. Sendo assim, no melhor caso a temperatura da água de saída da torre será igual a temperatura de bulbo úmido (CHEMICAL ENGINEERING SITE, 2018). Desta forma, a eficiência é definida como a razão entre o range operacional ( $T_{in} - T_{out}$ ) e o range ideal ( $T_{in} - T_{wet\ bulb}$ ) (BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY, 2007), de acordo com a equação 15. Como pode ser visto na Figura 2-8 estes parâmetros são fundamentais para o monitoramento de uma torre de resfriamento.

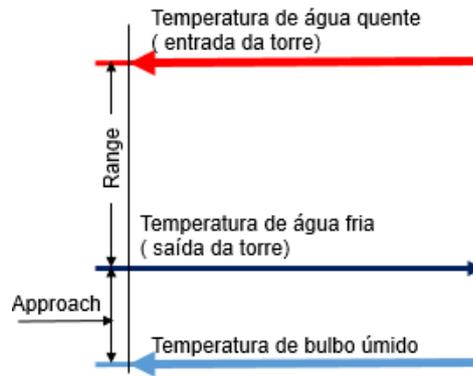


Figura 2-8 Relação entre *range* e *approach* ( adaptado de BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY, 2007).

$$Eficiência [\%] = \frac{Range}{(Range + Approach)} * 100 = \frac{T_{in} - T_{out}}{(T_{in} - T_{wet\ bulb})} * 100 \quad (15)$$

### 2.3.3 Modelo de efetividade

A efetividade está correlacionada à eficiência da troca térmica realizada na torre de resfriamento. A efetividade  $\epsilon_a$  da torre de resfriamento é definida como sendo a eficiência operacional da torre, sendo diretamente relacionada a troca térmica entre a corrente quente, proveniente do processo, e a massa de ar induzida na torre em contracorrente, por meio de ventiladores (LIZARAZU, 2016).

Este método é apresentado por BRAUN; KLEIN; MITCHEL (1989), sendo aproximado como uma função de segunda ordem por LU; CAI (2002), que se baseia nos modelos apresentados por Merkel e Braun e nas leis básicas de transferência de calor e massa. Como pode ser visto na Figura 2-9, o método apresentado por LU; CAI (2002) é baseado na relação entre a variação da entalpia do ar saturado, e na variação da temperatura da água.

Após a realização da modelagem matemática, que leva em consideração parâmetros como a TBU, temperaturas de entrada e saída da água, massa de água na entrada, saída e reposição, é realizada uma aproximação por série de Taylor e definida a efetividade como o seguinte parâmetro:

$$\epsilon_a = \frac{\dot{m}_{\text{água}_{ent}} T_{\text{água}_{ent}} + \dot{m}_{\text{água}_{reposição}} T_{\text{água}_{reposição}} - \dot{m}_{\text{água}_{sai}} T_{\text{água}_{sai}}}{\dot{m}_{\text{água}_{sai}} (T_{\text{água}_{ent}} - T_{BU})} \quad (16)$$

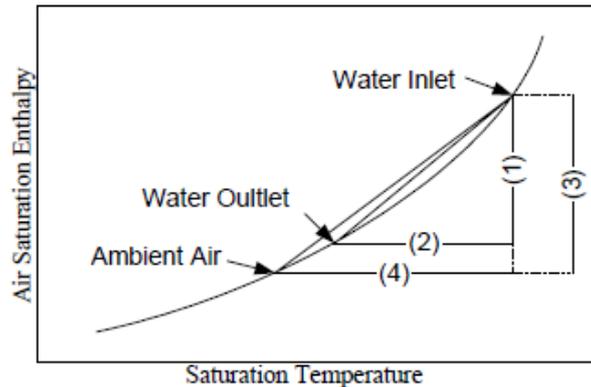


Figura 2-9 Entalpia do ar saturado vs. Temperatura (Fonte: LU; CAI, 2002).

Esta abordagem apresenta algumas vantagens quando comparada ao método de Merkel, uma vez que todas as variáveis são mensuráveis e normalmente monitoradas em uma torre de resfriamento (LIZARAZU, 2016).

### 2.3.4 Método do CTI

O CTI apresenta um método de determinação do termo  $\frac{KaV}{L}$ , denominado de característica da torre (CT), para torres de resfriamento industriais. O mesmo baseia-se na Teoria de Merkel, conforme a equação 14. Normalmente, este procedimento é utilizado somente na partida na torre ou realizado no caso de alguma grande mudança, como troca do recheio. Logo, são poucas as vezes que é realizada esta avaliação da torre.

O termo da característica da torre, expresso pelo termo  $\frac{KaV}{L}$ , está relacionado diretamente com as vazões de água e ar. Este modelo pode ser aplicado tanto para torres de fluxo cruzado como contracorrente. (COOLING TECHNOLOGY INSTITUTE, 2000). Além disso, quando já se conhece o comportamento da relação entre a característica da torre e a razão L/G, pode-se determinar a característica da torre pela equação que correlaciona diretamente estes dois parâmetros, podendo ser expressa de forma genérica pelo seguinte modelo

$$\frac{KaV}{L} = \alpha \left(\frac{L}{G}\right)^\beta \quad (17)$$

Normalmente, os parâmetros da equação 17 são fornecidas pelo fabricante em conjunto com a curva característica (CHERMISINOFF; CHERMISINOFF, 1981).

### 3 ESTUDO DE CASO

A unidade estudada neste trabalho possui quatro torres de resfriamento. A torre estudada é responsável pelo fornecimento de água de resfriamento para uma planta de craqueamento de nafta, para equipamentos auxiliares da unidade de Utilidades e para a planta de purificação de Aromáticos.

A torre de resfriamento é um torre de fluxo duplo cruzado e tiragem mecânica induzida, com 12 células, 12 ventiladores e 7 bombas de distribuição de água de resfriamento. A capacidade nominal da torre é de 35000 m<sup>3</sup>/h, sendo a carga térmica de 504.810 Mcal/h (BRASKEM, 2016). Uma foto do sistema estudado pode ser visto na Figura 3-1.



Figura 3-1 Torre de resfriamento estudada (Fonte: BRASKEM, 2016)

Este equipamento foi projetado para as condições de partida da planta, considerando um *approach* de 15°C. Porém, desde a partida da unidade, ocorreram diversas expansões e projetos de aumento de capacidade, sobrecarregando a carga térmica aplicada nesta torre. Um esquema da construção da torre pode ser visto na Figura 3-2. A torre conta com dois sistemas que abastecem a bacia superior da torre. Cada um destes sistemas possui um medidor de vazão e temperatura. A distribuição de água resfriada é feita por duas linhas, cada uma fornecendo água de resfriamento para unidades diferentes. Cada uma destas linhas possui medidores de vazão e temperatura.

Com o passar dos anos e o aumento da temperatura ambiente, ocorreram vários casos no qual era necessário reduzir a produção das plantas, em virtude da limitação da capacidade de resfriamento fornecida pela água de resfriamento. Esta diminuição de carga, denominada de *slowdown*, ocorre em virtude da existência de equipamentos

cruciais para a produção que necessitam controle rígido de temperatura como, por exemplo, para os condensadores de colunas de destilação. O *slowdown* (SD) acarreta perdas para a unidade, uma vez que não é possível alcançar a capacidade planejada de olefinas, tendo efeitos nos processos seguintes, de segunda e terceira geração.

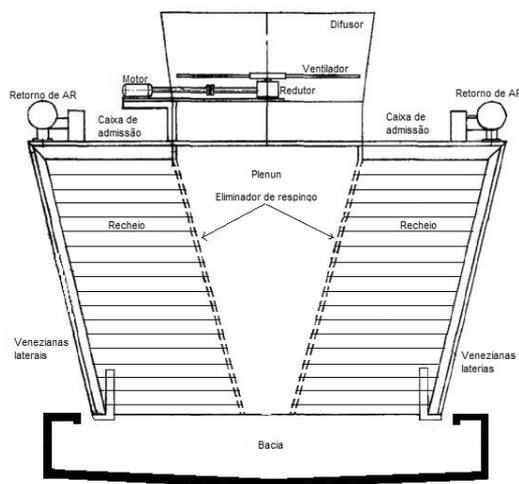


Figura 3-2 Esquema representativo da torre de resfriamento (Fonte: BRASKEM, 2016) .

Uma das soluções mais eficazes para evitar a ocorrência de *slowdown* seria o aumento da capacidade de troca térmica da torre. Para isto, é recomendada a troca do recheio. Na partida da unidade, a torre contava com recheio de ripas de madeira. Com o passar dos anos, foi realizado um projeto de substituição, que substituiu as ripas de madeiras por ripas de PVC. Este recheio, apesar de apresentar maior eficiência quando comparado ao anterior, atualmente apresenta uma ineficiência em virtude da degradação da estrutura e incrustações advindas da qualidade da água utilizada.

Tendo em vista estes problemas em 2017 os recheios de 3 células foram substituídos. Este projeto substituiu as ripas de PVC (tipo *splash*) por um recheio estruturado de PP (tipo gotejamento). Após a implementação deste projeto, não foi notada uma melhoria do desempenho da torre, pois em períodos de temperatura elevada ainda ocorria SD na planta da mesma ordem aos que ocorriam antes da troca do recheio, possivelmente em virtude da troca ter ocorrido em somente 3 das 12 células. Como os *headers* (sistemas gerais de distribuição) de alimentação e descarga da torre são conjuntos para todas as células, a possível melhoria da performance local (nas 3 células substituídas), provavelmente acabou sendo mascarada pela performance das células antigas.

Sendo assim, este trabalho visa analisar qual o melhor método de avaliação da troca do recheio em torres de resfriamento.

## 4 METODOLOGIA

Conforme descrito no capítulo anterior, o presente trabalho tem como objetivo analisar as condições de operação da torre de resfriamento e avaliar as prováveis melhorias causadas pela aplicação do novo recheio. Além disso, o presente trabalho visa comparar os métodos de análise utilizados e definir o melhor método para analisar as variações realizadas com a troca do recheio.

### 4.1 Coleta de dados

Para a análise e estudo do caso, foram utilizados dados obtidos a partir do historiador *Aspen Explorer* disponibilizados pela empresa.

A análise pré-troca de recheio foi feita com dados de junho de 2016 até junho de 2017, importados como a média de 1 hora. Para a análise de dados pós-troca de recheio, foram utilizados dados de 01/08/2018 até 01/10/2018, importados como a média de 12 minutos. Os dados foram tratados excluindo os pontos quando alguma das informações necessárias para o cálculos dos parâmetros não estava disponível.

Para ser analisada a situação pós-troca de recheio, foi avaliada a situação atual da torre, com 12 células, sendo somente 3 destas com o novo recheio. Esta consideração precisou ser realizada em virtude da inexistência de medidores individuais para cada célula, sendo somente disponíveis dados gerais da torre.

Uma amostra dos dados utilizados e importados do historiador InfoPlus para utilização nos testes se encontra na Tabela 1.

Tabela 1- Subconjunto de dados coletados no historiador da unidade.

Data	Temperatura de retorno (°C)	TBS (°C)	TBU (°C)	L (kg/s)	Temperatura de saída (°C)
1/6/16 0:00	44,35	20,39	15,71	7140,31	26,99
1/6/16 1:00	44,93	21,13	15,74	7148,39	27,20
1/6/16 2:00	43,62	19,30	14,66	7147,66	26,13
1/6/16 3:00	44,93	22,24	13,14	7127,00	27,32
1/6/16 4:00	45,37	23,54	15,50	7168,61	28,93

## **4.2 Análise da Capabilidade**

Conforme descrito na subseção 2.3.1, para a determinação da eficiência foi utilizado método da curva de performance. As curvas características da torre foram disponibilizadas pela empresa detentora da torre estudada. Para a análise da capabilidade da torre pré-troca de recheio foram utilizados dados médios de 12 minutos e utilizado o valor da capabilidade média de 1 hora. Já para a avaliação da capabilidade das células novas, foi calculada a eficiência da torre utilizando dados que foram obtidos com o auxílio da empresa fornecedora do recheio. Neste caso, as células com o novo recheio foram analisadas separadamente. Dados como temperatura de bulbo úmido, temperatura da água quente, temperatura da água fria e vazão de água foram obtidos a cada 5 minutos e para o cálculo foi utilizado a média destes valores.

## **4.3 Eficiência e Efetividade**

A avaliação da eficiência foi feita pelo método descrito na subseção 2.3.2. Já a avaliação da efetividade da torre nestes períodos foi feita através do método descrito no capítulo 2.3.3. Os dados utilizados para o cálculo da efetividade foram os mesmos que foram utilizados para o cálculo de eficiência. Como no caso estudado não há medida da temperatura da água de reposição, foi estipulado que a temperatura desta corrente seria igual a temperatura de bulbo seco.

## **4.4 Modelagem do CT (Característica da Torre)**

Para a realização da modelagem do CT, foi utilizada a equação 17, referente ao modelo proposto pelo CTI baseado na teoria de Merkel.

Para o cálculo deste parâmetro se deve conhecer a capacidade calorífica da água, as temperaturas de entrada e saída da água na torre, a entalpia do ar saturado e a entalpia da água. Para a determinação da entalpia do ar saturado foram utilizados dados tabelados retirados de KORETSKY (2003) e ajustados para uma equação de segundo grau, conforme Figura 4-1.

Considerou-se a entalpia do ar saturado como a equação que melhor correlaciona os dados da Figura 4-1, e a equação descrita por KERN (1950), que correlaciona a

variação da entalpia da fase gasosa com a variação de entalpia da água, onde  $H_a$  é a entalpia da fase gasosa

$$H_{a,o} = H_{a,i} + \frac{L}{G} C p_w (T_{w,o} - T_{w,i}) \quad (18)$$

onde  $T_{w,o}$  e  $T_{w,i}$  são as temperaturas de saída e entrada da água na torre de resfriamento, respectivamente.

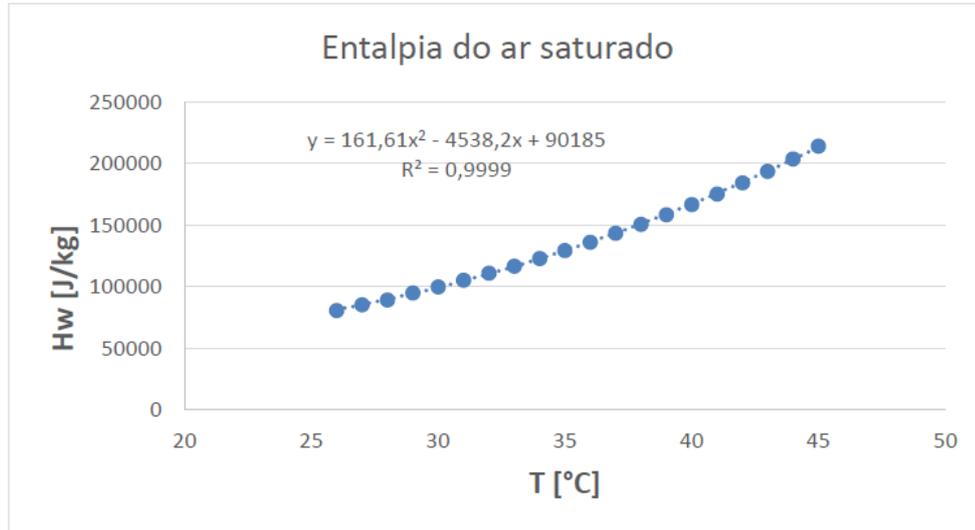


Figura 4-1. Ajuste de dados da entalpia do ar saturado (Fonte: BRUM, 2015).

Considerando a equação que ajusta os dados de entalpia do ar saturado conforme Figura 4-1 e a equação (18) para a entalpia na fase da saída da fase gasosa, a equação (14) pode ser reescrita nos seguintes termos:

$$\frac{KaV}{L} = C p_w \int_{T_{wo}}^{T_{wi}} \frac{dT}{DT^2 - ET + F} \quad (19)$$

onde

$$D = 0,1616 \text{ [kJ/kg } ^\circ\text{C}^2]$$

$$E = 4,5382 + C p_w \cdot \frac{L}{G} \text{ [kJ/kg}^\circ\text{C}]$$

$$F = 90,185 - H_{a,i} - C p_w \cdot T_{w,i} \frac{L}{G} \text{ [kJ/kg]}$$

A solução analítica desta integral pode ser expressa pela equação 20

$$\frac{KaV}{L} = C p_w \frac{2(-\arctan\left(\frac{2T_{wo}D - E}{\sqrt{4FD - E^2}}\right) + \arctan\left(\frac{2T_{wi}D - E}{\sqrt{4FD - E^2}}\right))}{\sqrt{4FD - E^2}} \quad (20)$$

Os dados de CT para cada uma das situações analisadas foram calculados pelo *software Python* conforme código descrito no APÊNDICE A.

## 5 RESULTADOS

Após a realização das análises citadas anteriormente, pôde-se analisar os diferentes métodos de análise de uma torre de resfriamento, além de avaliar as possíveis alterações geradas pela troca do recheio nas 3 células. Os resultados serão discutidos a seguir.

### 5.1 Capabilidade

Utilizando a norma do CTI, e com a realização desta análise tanto para a condição do recheio antigo como para o recheio novo, pôde-se perceber que o recheio novo apresenta uma maior capabilidade que o recheio antigo, conforme pode ser percebido na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação dos resultados de Capabilidade da torre

	Recheio Antigo	Recheio Novo
Capabilidade	68,1%	106,2%

Pela comparação da vazão real no momento do teste e a vazão teórica obtida pelo modelo das curvas de performance, pode-se notar que a torre com todas as células com o recheio antigo, apresentava somente 68,1% da capabilidade de projeto. Este pode ser justificado pelo fato do recheio apresentar grande degradação, além de apresentar sujamento que acarreta a perda de eficiência da troca térmica. Já para a análise individual das células com o recheio novo, obteve-se uma capabilidade de 106,2%. Ou seja, as células novas operam com uma eficiência maior que a de projeto.

Porém, como a capabilidade torre compara as condições de operação da torre com as condições de projeto do mesmo recheio, este resultado apenas demonstra que o recheio antigo operava muito abaixo das condições de projeto, enquanto que o recheio novo apresenta uma capabilidade maior que a projetada para este novo recheio.

Logo, para comparação efetiva de ambos os recheios, é necessário comparar indicadores com base comum para ambas as situações como, por exemplo, a efetividade, eficiência e a característica da torre, o CT, entre ambas situações, não somente com suas respectivas condições de projeto.

## 5.2 Análise da eficiência

Como citado na subseção 2.3.2, a eficiência é um indicador que leva em consideração a relação do *range* com o *approach*. Os resultados da eficiência para as situações pré- e pós-troca de recheio podem ser analisados na Figura 5-1 e Figura 5-2. A linha amarela em ambas figuras representa a média da eficiência para ambos casos.

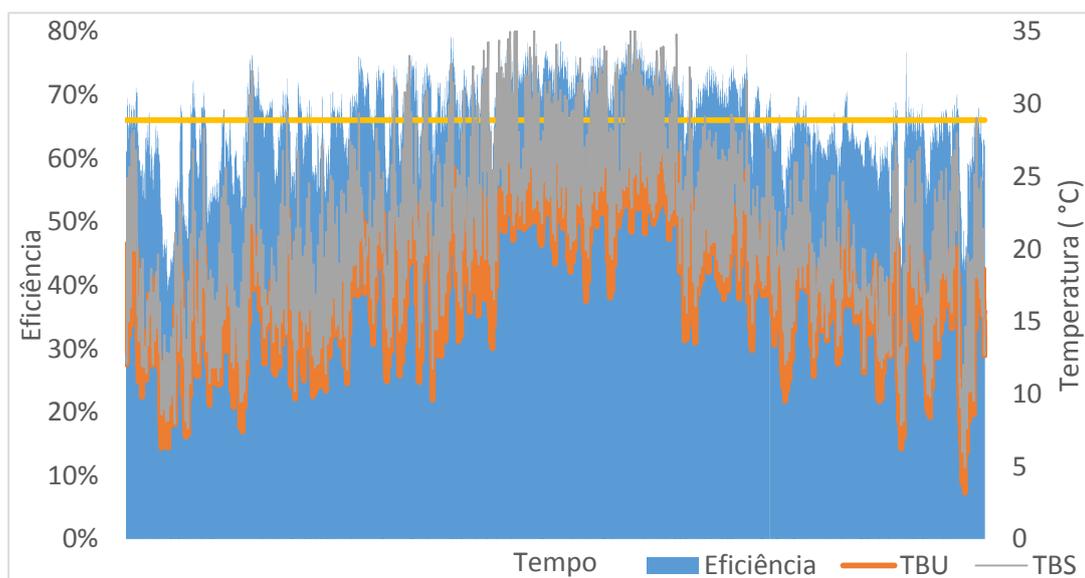


Figura 5-1. Avaliação da eficiência, TBS e TBU ao longo do tempo, pré-troca de recheio

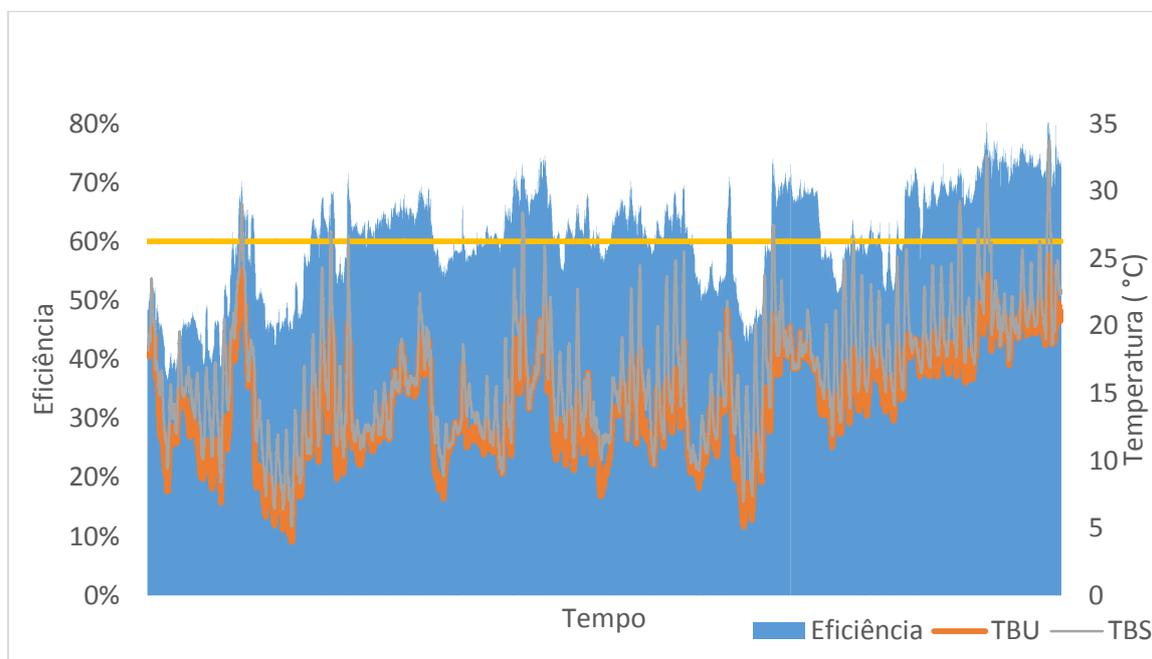


Figura 5-2. Avaliação da eficiência, TBS e TBU ao longo do tempo, pós troca de recheio.

Como pode ser visto, por ser um indicador baseado no approach, ou seja, na diferença entre a temperatura de saída e a temperatura de bulbo úmido, seu valor é diretamente influenciado pela TBU. Como pode ser visto na Tabela 3, nas campanhas analisadas pré e pós troca de recheio, percebe-se que a eficiência média pós troca de recheio foi menor que a pré-troca de recheio.

Tabela 3 - Comparação da eficiência antes e após troca de recheio

	EFICIÊNCIA		TBU	
	Pré troca	Pós troca	Pré troca	Pós troca
<b>MÉDIA</b>	66%	60%	17,51°C	14,22°C
<b>DESVIO PADRÃO</b>	7,1%	8,8%	4,45°C	3,99°C

Porém, este indicador deve ser avaliado juntamente com a variação da TBU. Como o período analisado pós-troca de recheio abrange grande parte do inverno da localidade onde a torre está instalada, o *approach* desta torre apresentava valores muito elevados, apesar de estar operando em situações satisfatórias para a operação da planta.

Logo, pode-se concluir que este indicador é efetivo para analisar se as condições da torre em conjunto com as influências do meio ambiente, atendem a necessidade operacional da planta. Porém, este não é conclusivo quando quer se comparar situações estruturais sem levar em consideração as variações climáticas.

### 5.3 Análise da efetividade

A efetividade de ambas as situações foram calculadas conforme descrito na subseção 2.3.3. Os gráficos da Figura 5-3 e Figura 5-4 apresentam a variação deste indicador nas situações pré-troca de recheio e pós troca de recheio, respectivamente. Na situação pós troca de recheio, foram utilizados os dados das 12 células em conjunto, tendo em vista a inexistência de medidores exclusivos para as 3 células com o novo recheio. A linha amarela representa a média em ambos os gráficos. Como pode ser visto em ambas análises, este indicador também sofre grande influência da temperatura de bulbo úmido. Porém, conforme exemplificado na Figura 5-4 (nas situações destacadas pela seta vermelha) existem situações nas quais apesar da temperatura de bulbo úmido estar no mesmo patamar, a efetividade apresenta valores diferentes. Isto pode ocorrer

pois este indicador leva em consideração outros fatores como, por exemplo, a vazão e temperatura da água de reposição.

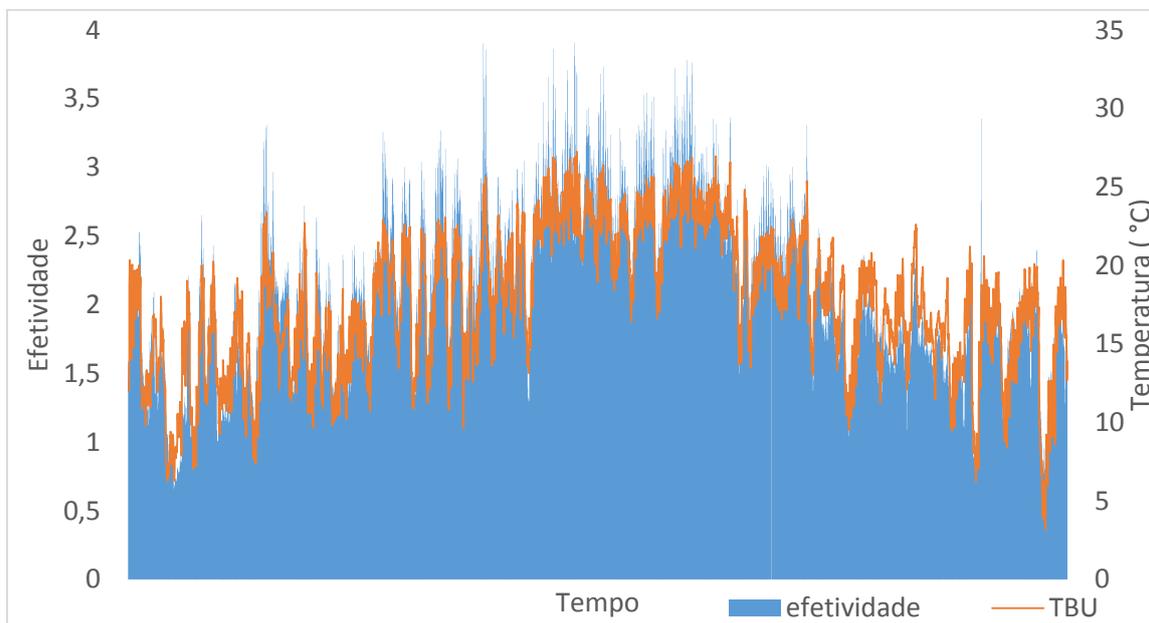


Figura 5-3. Variação da efetividade da torre ao longo do tempo, e a influência da TBU antes da troca do recheio.

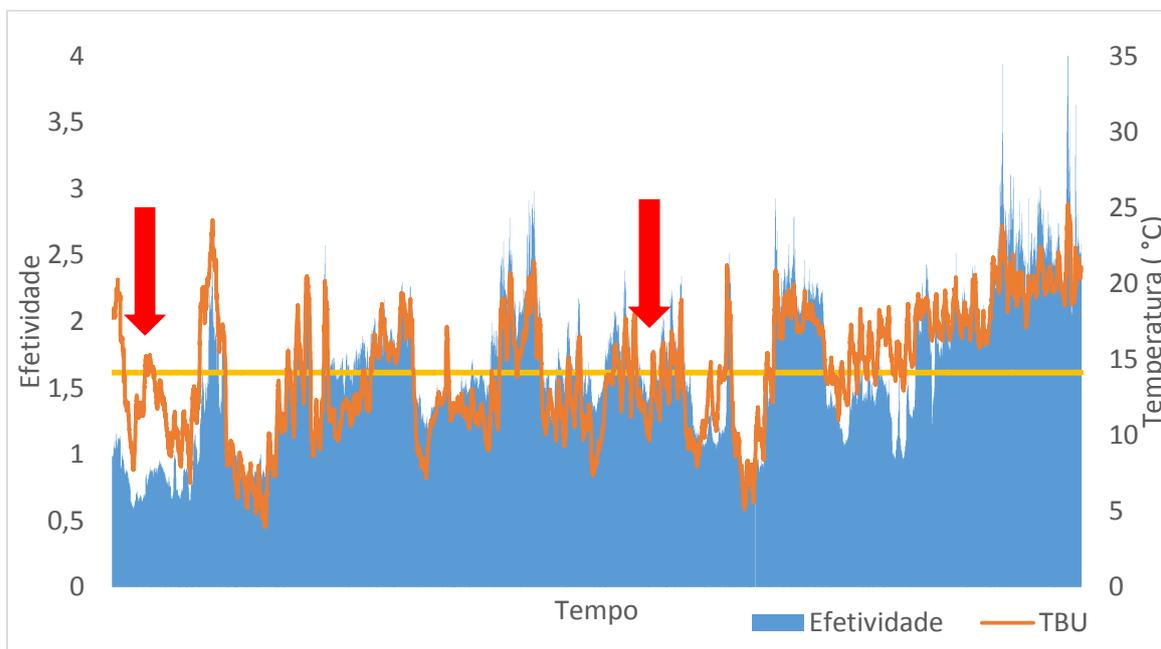


Figura 5-4. Variação da efetividade da torre ao longo do tempo, e a influência da TBU após da troca do recheio.

Com a análise bruta destes dados, se chegaria a conclusão que a troca de recheio foi prejudicial para a efetividade da torre porém, como dito anteriormente, os dados

utilizados para o cálculo da efetividade após troca de recheio foram adquiridos durante o período de inverno, com situações na qual a temperatura de bulbo úmido apresenta valores bem inferiores, influenciando nos valores demonstrados nos indicadores. O indicador de efetividade sofre influência da relação entre as vazões de água e ar dentro da torre, e também pelos fatores climáticos, como temperatura de bulbo úmido e temperatura de bulbo seco. Por estes motivos, este indicador é mais utilizado para avaliar a eficiência da torre momentaneamente e as variações da sua performance com a variação de parâmetros ambientais e operacionais, não sendo muito representativa para análises das condições do recheio.

#### 5.4 Modelagem da Característica da Torre (CT)

Ao ser analisada a característica específica do recheio das torres, foram calculados o CT para as situações pré (período de 2016 e 2017) e pós (2018) troca de recheio, usando os mesmos dados utilizados para os cálculos da eficiência e efetividade.

Tendo em vista que o CT pode variar com as condições atmosféricas, foram analisados os dados estratificados em faixas de umidade, pois conforme relatado na literatura, é notável a influência das condições ambientais na eficiência da torre (BRUM, 2015). Na Figura 5-5 é possível comparar o comportamento dos valores médios de CT pós e pré troca de recheio para as diversas faixas de umidade.

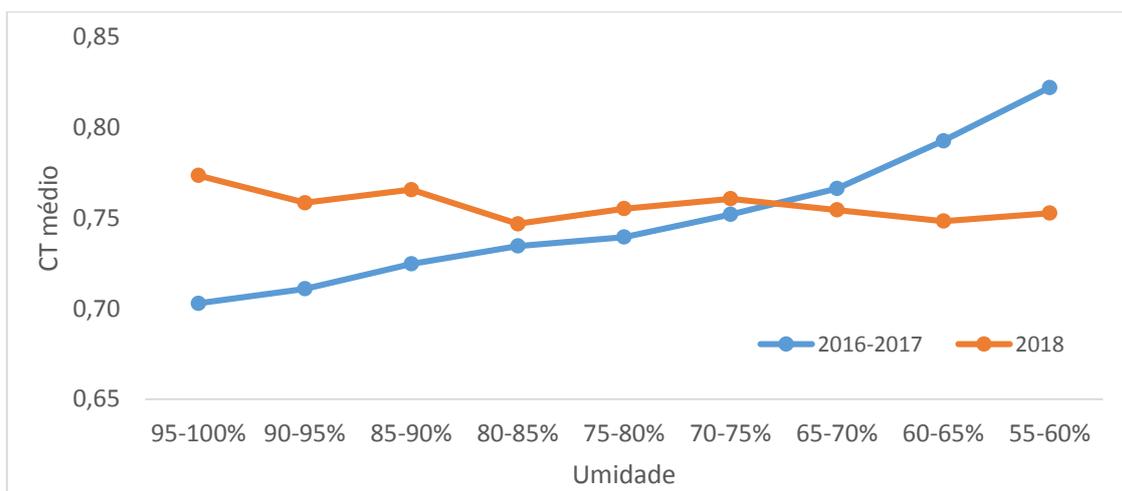


Figura 5-5 Variação dos CT's médios pré e pós troca de recheio com a faixa de umidade

Para uma análise mais correta destes dados, foi utilizado o teste T de Student. Esta análise foi realizada em *Python* pelo uso da biblioteca *scipy stats*. Este teste estatístico

pode ser utilizado para a comparação de duas médias e realiza um teste de hipótese, aceitando ou rejeitando a hipótese nula com um dado grau de confiança (ALVES, 2017). Este teste utiliza o valor p como uma quantificação da probabilidade de se rejeitar a hipótese nula. O valor p pode ser definido como a probabilidade de se encontrar um valor da estatística de teste maior que a desejada (FERREIRA; PATINO, 2015). Sendo assim, para um valor p menor que o nível de significância, conclui-se que o correto é rejeitar a hipótese nula. Para a análise dos dados, foi considerado um nível de significância de 5%, sendo assim, um valor p menor que 0,05 demonstra que os valores analisados são estatisticamente diferentes. Os valores médios, desvios padrão e valor p para os dados analisados podem ser encontrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores médios de CT e desvio padrão para cada faixa de umidade.

Faixa de umidade	2016-2017		2018		teste t p	
	média	desvio padrão	média	desvio padrão		
95-100%	0,7028	0,0651	0,7734	0,0796	4,20E-106	diferentes
90-95%	0,7109	0,0602	0,7584	0,1159	3,84E-32	diferentes
85-90%	0,7246	0,0657	0,7656	0,1071	1,16E-30	diferentes
80-85%	0,7345	0,0596	0,7468	0,1038	6,68E-04	diferentes
75-80%	0,7395	0,0680	0,7552	0,1109	6,58E-05	diferentes
70-75%	0,7520	0,0698	0,7606	0,1122	3,77E-02	diferentes
65-70%	0,7662	0,0671	0,7545	0,1117	6,61E-03	diferentes
60-65%	0,7926	0,0713	0,7483	0,1151	5,34E-18	diferentes
55-60%	0,8220	0,0824	0,7527	0,1213	1,96E-28	diferentes
50-55%	0,8648	0,1068	0,7544	0,1140	6,34E-43	diferentes

Como pode ser visto, quando o ar está mais úmido (ou seja, para aquelas faixas de maior dificuldade operacional), a torre apresentou um valor de CT maior que para a mesma faixa de umidade antes da troca de recheio. Com estes dados, pode-se concluir que existe uma influência do resultado de performance da torre com a variação da umidade.

Para uma análise mais profunda da influência das propriedades no recheio novo, foi realizada a modelagem de ambas as situações para correlacionar a influência da razão L/G com o termo  $\frac{KaV}{L}$  (CT).

Para a determinação dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , foram utilizados os valores de CT calculados para todos os pontos analisados, utilizando o método do CTI. Este cálculo foi realizado conforme descrito no APÊNDICE A. De posse destes dados, foi realizado o

ajuste dos parâmetros da equação que correlacionam a razão L/G e o termo CT, conforme equação (17). O código utilizado se encontra no APÊNDICE B. Os resultados dos ajustes podem ser vistos na Tabela 5 e na Tabela 6.

Nas tabelas estão expressos os resultados do ajuste de  $\alpha$  e  $\beta$  para faixas de umidade de 5%. Também está expresso na tabela o termo chamado de *reduced chi square*, que representa a soma de todos os resíduos da modelagem dividido pelos graus de liberdade do ajuste. Além disso, está expresso na tabela o fator de correlação de cada um dos ajustes, que é utilizado para analisar o grau de comportamento das duas variáveis modeladas (PETERNELLI, 2004). Este parâmetro mede o grau de associação entre a variável CT e a razão L/G. No APÊNDICE C e no APÊNDICE D estão os gráficos dos ajustes e os gráficos de espalhamento para ambas as situações.

Tabela 5 - Ajuste de dados para correlação entre CT e LG para dados pré-troca de recheio

Faixa de Umidade	$\alpha$	$\beta$	$\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{(N - N_{variáveis})}$	Correlação	Nº de dados
95-100%	0,6580 +/- 0,0027 (0,41%)	-0,5720 +/-0,0268	0,003	0,797	881
90-95%	0,6758 +/- 0,0029 (0,43%)	-0,3657 +/- 0,0251 (6,87%)	0,003	0,832	1002
85-90%	0,6875 +/- 0,00282(0,41%)	-0,3734 +/- 0,0229 (6,13%)	0,003	0,821	1196
80-85%	0,6960 +/- 0,0027 (0,39%)	-0,3845 +/- 0,0222 (5,77%)	0,003	0,830	1052
75-80%	0,7035 +/- 0,0024 (0,34%)	-0,4248 +/-0,01947(4,58%)	0,003	0,730	1009
70-75%	0,7069 +/- 0,0025 (0,35%)	-0,5034 +/-0,0199 (3,96%)	0,003	0,765	972
65-70%	0,7066 +/-0,0022 (0,31%)	-0,6395 +/-0,01828(2,86%)	0,002	0,808	897
60-65%	0,7132 +/- 0,00256(0,36%)	-0,7530 +/- 0,0203 (2,70%)	0,002	0,855	720
55-60%	0,7158 +/- 0,0034 (0,48%)	-0,9272 +/- 0,0267 (2,88%)	0,002	0,889	617
50-55%	0,7229 +/- 0,0052 (0,72%)	-1,1912 +/- 0,0400 (3,36%)	0,004	0,904	509

Tabela 6- Ajuste de dados para correlação entre CT e LG para dados pós-troca de recheio

Faixa de Umidade	$\alpha$	$\beta$	$\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{(N - N_{variaveis})}$	Correlação	Nº de dados
95-100%	0,6856 +/- 0,0040(0,58%)	-0,7212 +/- 0,03149 (4,37%)	0,005	0,933	1816
90-95%	0,6633 +/- 0,0037 (0,56%)	-0,9533 +/- 0,03042 (3,19%)	0,008	0,851	1534
85-90%	0,6761 +/- 0,0035 (0,52%)	-0,9582 +/- 0,0295 (3,08%)	0,007	0,852	1582
80-85%	0,6874 +/- 0,0027 (0,39%)	-0,8719 +/- 0,0233(2,67%)	0,006	0,739	1402
75-80%	0,6945 +/- 0,0025 (0,36%)	-0,8624 +/- 0,0212 (2,45%)	0,005	0,709	1421
70-75%	0,6914 +/- 0,0026 (0,38%)	-0,9475 +/- 0,0228 (2,40%)	0,005	0,731	1173
65-70%	0,6846 +/- 0,0030 (0,43%)	-1,0187 +/- 0,0273 (2,68%)	0,005	0,734	937
60-65%	0,6804 +/- 0,0029 (0,43%)	-1,0849 +/- 0,0269 (2,48%)	0,004	0,699	703
55-60%	0,6713 +/- 0,0034 (0,51%)	-1,2597 +/- 0,0329 (2,61%)	0,004	0,737	507
50-55%	0,6901 +/- 0,0033 (0,48%)	-1,1815 +/- 0,0330 (2,79%)	0,003	0,670	353

As comparações dos resultados nas faixas de umidade de 95-100%; 70-75% e 50-55% podem ser vistas nas figuras: Figura 5-6, Figura 5-7 e Figura 5-8 respectivamente. As figuras referentes as comparações das outras faixas de umidade podem ser vistas no APÊNDICE E.

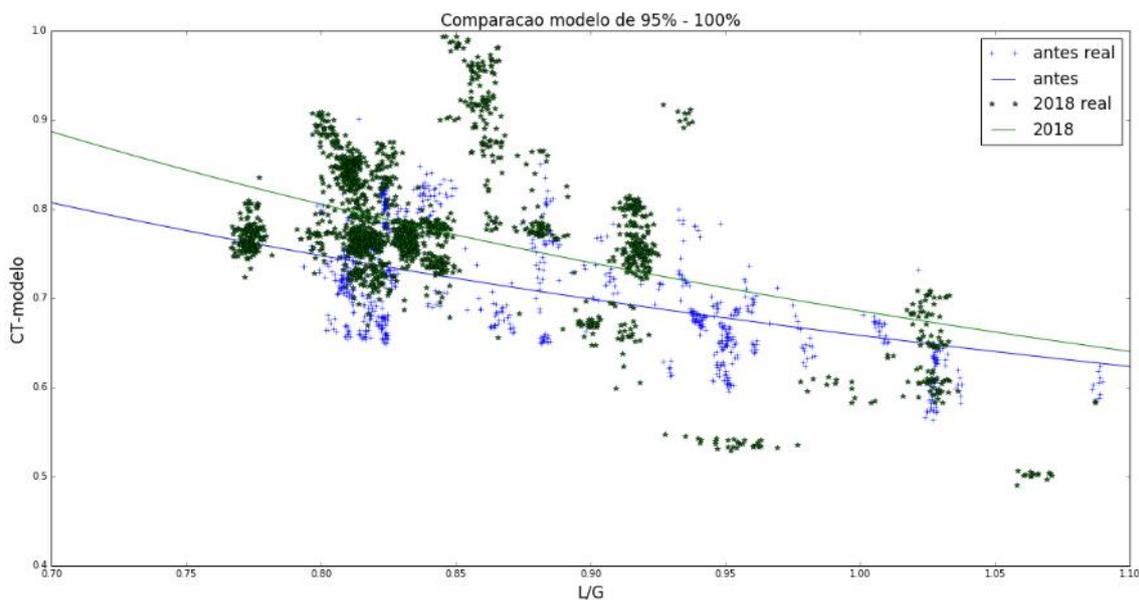


Figura 5-6. Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 95-100%.

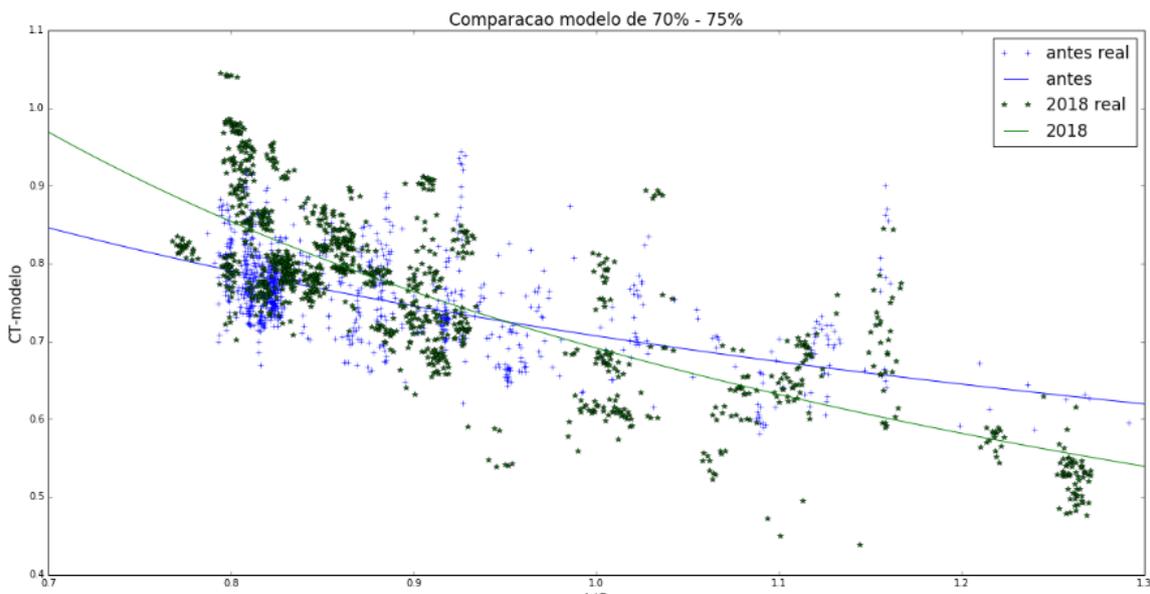


Figura 5-7. Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 70-75%.

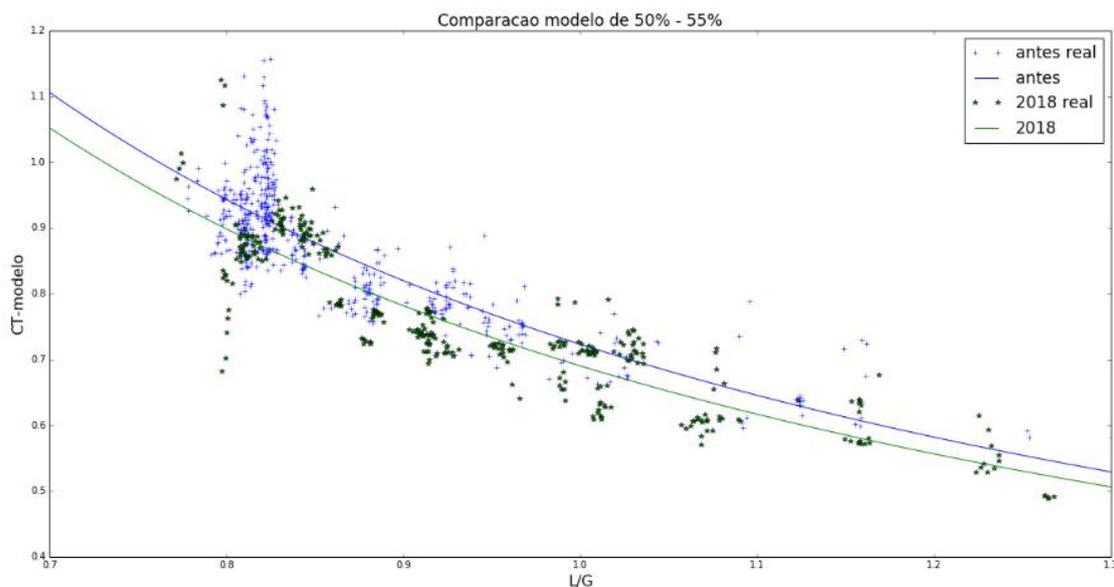


Figura 5-8. Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 50-55%.

Como os analisadores online medem os *headers* gerais do sistema, a situação “pós troca de recheio” apresenta os resultados da torre após a troca de recheio das 3 células, porém, ainda sofrem a influência do recheio antigo presente em 9 células.

Como pode ser visto na Figura 5-6, na faixa de umidade de 95-100% os resultados da torre com as 3 células contendo o novo recheio apresentaram melhores resultados de CT para todas as faixas de L/G analisadas. Já para as faixas de umidade intermediárias,

como visualizado na Figura 5-7, o comportamento é diferente. Para razões de L/G menores, ou seja, maior quantidade de ventiladores operando, a eficiência da torre com as células com o novo recheio é melhor do que a situação antiga. Porém, conforme a razão L/G aumenta, este comportamento de inverte. Já para valores de umidade menores, como visto na Figura 5-8, o comportamento é invertido para todas as faixas de L/G analisadas, ou seja, para toda a situação, a torre com todas as células possuindo o recheio antigo apresentou melhor eficiência que a torre com 3 células com o recheio novo.

Desta forma, à medida que a umidade vai diminuindo (situação mais favorável para a operação da torre), o ponto de cruzamento das curvas, em relação a L/G, vai se deslocando para a direita, se aproximando do valor médio do CT para aquela faixa. Com isto podemos concluir que a troca do recheio realmente melhorou a operação nas situações onde a operação da torre é mais crítica: umidades maiores. Se pensar em termos de efetividade, conseguimos atingir a mesma efetividade com L/G maior, isto é, para o mesmo L, com G menor (usando menos ventiladores e, conseqüentemente, menos energia).

Os dados encontrados na bibliografia sempre correlacionam o comportamento do recheio tipo *splash* (situação antiga) com o recheio tipo gotejamento (situação nova) como sendo similares (BERTRAND, 2011; SPX COOLING TECHNOLOGIES INC, 2012). Apesar disto, a situação estudada apresentou resultados diferentes para os dois tipos de recheios. Apesar da situação nova apresentar somente 3 células com o novo recheio, foi notável a variação da eficiência desta conforme a variação das faixas de umidade e da razão L/G. Uma hipótese para este fenômeno é a interferência das condições das células com o recheio anterior presente nos outros recheios. Apesar de passar por manutenções anuais, as condições do recheio das células antigas são bem deterioradas, com grandes depósitos e sujamentos na superfície do recheio. Este sujamento pode interferir nos processos de transferência de calor e massa, além de influenciar na distribuição do ar e água no decorrer do recheio. Com este sujamento, pode ocorrer a criação de caminhos preferenciais dentro do recheio, promovendo um contato mais turbulento entre a água e o ar.

## 6 CONCLUSÃO

A torre de resfriamento é um equipamento muitas vezes tratado como secundário, porém de fundamental importância para a operação da qualquer indústria. Em virtude de apresentar uma operação simples, muitas vezes sua manutenção e projeto de aumento de capacidade não são priorizados, com consequências sendo sentidas ao longo das campanhas de operação. Ao realizar o presente trabalho, foi possível notar na literatura falta de metodologias e aplicação de parâmetros para análise mais aprofundada das estruturas e efeitos dos diferentes tipos de recheio na indústria.

Pelo estudo realizado, pode-se concluir que o uso de dados como a eficiência e efetividade pode ser útil na operação diária deste equipamento, porém são indicadores que apresentam certas restrições, como influência das condições ambientais, para analisarem as condições operacionais inerentes ao equipamento. O indicador de efetividade apresenta uma funcionalidade operacional muito grande, pois apresenta resposta a parâmetros tanto ambientais quanto mudanças do processo. Já a análise realizada pelo CT se mostrou a mais confiável para analisar a situação real do equipamento, sendo possível estratificar as influências operacionais e atmosféricas. Com a comparação dos dados de capacidade, pode-se perceber que o novo recheio aplicado nas células apresenta uma eficiência maior que a do projeto deste recheio, porém não pode ser utilizado como conclusivo para decisão da troca de todos os recheios da torre.

A modelagem dos dados do CT demonstram que a troca de 3 células apresenta resultados de performance superiores somente para faixas de umidade entre 95 e 100%. Para valores de umidade intermediários, percebe-se que a performance do novo recheio apresenta valores melhores para faixas de L/G menores, apontando que o recheio novo apresenta melhor performance para maior quantidade de ventiladores operando. Este fato sustenta a necessidade de continuar a troca de recheio, tendo em vista que em momentos de maior umidade relativa é que ocorre o período de maior ineficiência de troca térmica. Apesar disto, o modelo apresenta um comportamento inverso para valores de umidade menores. Este fato pode ocorrer pela influência das outras células no resultado global da torre.

Como próximos passos deste trabalho, sugere-se uma análise separada do CT para as células com o novo recheio e com o recheio antigo, para mesmas situações atmosféricas e operacionais.

## 7 REFERÊNCIAS

- ALVES, Marcelo Corrêa. Teste t de Student. Piracicaba, p. 1–6, 2017.
- BERTRAND, Timothy Paul. Evaluation of a 1.5 x 1.5 m<sup>2</sup> counter-flow fill performance test facility with a view to contributing to a fill performance standard. [s. l.], n. March, 2011.
- BRASKEM. **Manual de Operação - Sistema Operacional da Torre de Resfriamento - A48**. [s.l: s.n.]2016.
- BRAUN, J. ..; KLEIN, S. ..; MITCHEL, J. W. Effectiveness models for cooling towers and cooling coils. In: ASHRAE TRANSACTIONS 1989, **Anais...** [s.l: s.n.]
- BRUM, Lara da Silva. **Avaliação Operacional e torres de resfriamento: estudo de caso de uma indústria petroquímica**. 2015. UFRGS, [s. l.], 2015.
- BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY. Cooling tower. **Energy Efficiency in Electrical Utilities**, [s. l.], p. 135–151, 2007.
- BURGER, R. **Cooling tower technology: maintenance, upgrading and rebuilding**. [s.l: s.n.].1995
- CASSETA, E; **Curso Teórico: torres de resfriamento de água**. São Paulo. 2003
- CHEMICAL ENGINEERING SITE. **Cooling Tower Efficiency Calculations**. 2018. Disponível em: <<http://chemicalengineeringsite.in/cooling-tower-efficiency-calculations/>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- CHEREMISINOFF, NP; CHEREMISINOFF, P. .. **Cooling Towers. Selection, Design and Practice**. [s.l.] : Ann Arbor Science Pub, 1981.
- CHEREMISINOFF, P. N. Cooling tower operations. In: **Handbook of Heat and Mass Transfer**. [s.l: s.n.]. 1986
- COOLING TECHNOLOGY INSTITUTE. Acceptance Test Code for Water Cooling Towers. In: , 2000.
- CORTINOVIS, Giorgia F. et al. Integrated analysis of cooling water systems: Modeling and experimental validation. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 14–15, p. 3124–3131, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.04.008>>
- CTI. Cooling Tower Operation and Maintenance is the Key for Improved Energy Efficiency. [s. l.], 2018.
- EVANS JR, F. L. Equipament desing handbook for refinaries and chemical plants. vol.2. In: Houston: Gulf Publishing, 1980.

FERNANDES, Mariana. **Proposta E Comparação De Um Modelo Fenomenológico Com Base Em Alto Transporte De Massa E Supersaturação Para Torre De Resfriamento De Água**. 2012. [s. l.], 2012.

FERREIRA, Juliana Carvalho; PATINO, Cecilia Maria. O que realmente significa o valor-p? **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, [s. l.], v. 41, n. 5, p. 3713, 2015.

GROBBELAAR, P. J.; REUTER, H. C. R.; BERTRAND, T. P. Performance characteristics of a trickle fill in cross- and counter-flow configuration in a wet-cooling tower. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 50, n. 1, p. 475–484, 2013.

GURGEL, José Maurício et al. Análise teórica da transferência de calor e de massa em sistemas evaporativos usando modelos de Merkel e de Poppe. [s. l.], p. 1–14, 2016.

JASIULIONIS, Jaqueline Andrea Espósito. “ Projeto e avaliação de desempenho de torres de resfriamento de água utilizando redes neurais artificiais ” “ Design and analysis of cooling towers using neural networks ”. [s. l.], 2012.

JUNIOR, Rafael Candido de Lima. Modelagem Fenomenológica Do Desempenho De Torres De Resfriamento De Água Acopladas E Estudo De Casos. [s. l.], p. 85, 2011.

KERN, D. Q. **Process heat transfer**. [s.l.] : New York: McGraw-Hill, 1950.

KLOPPERS, Johannes C.; KRÖGER, Detlev G. Cooling Tower Performance Evaluation: Merkel, Poppe, and e-NTU Methods of Analysis. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, [s. l.], v. 127, n. 1, p. 1, 2005. Disponível em: <<http://gasturbinespower.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1422324>>

KORETSKY, M. D. **Engineering and Chemical Thermodynamics**. [s.l: s.n.]. 2003

LIZARAZU, Marcelo Silveira Dantas. **Otimização multiobjetivo aplicada a eficiência energética de Torres de Resfriamento**. 2016. [s. l.], 2016.

LU, L. (Nanyang Technological University); CAI, W. (Nanyang Technological University). A Universal Engineering Model For Cooling Towers. **The International Compressor Engineering Conference and Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue University, USA**, [s. l.], 2002.

OIKAWA, Eduardo Hiroshi. Avaliação de sistema industrial de resfriamento de água. [s. l.], p. 101, 2012.

OLIVEIRA, Vagner F. Diagnóstico De Eficiência Energética De Uma Torre De Resfriamento De Água Da Torre De Resfriamento De Água Da Arcelormittal Inox Brasil. [s. l.], 2010. Disponível em: <<https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0a>

hUKEwiw3JXo5tXOAhVMIZAKHfAdAYUQFggTMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.bibliotecadigital.ufmg.br%2Fspace%2Fbitstream%2Fhandle%2F1843%2FBUOS-8GGP42%2Fdisserta\_\_o\_de\_mestrado\_vagner\_ferreira\_de\_>

PERRY, Robert; GREEN, Don W. **Perrys' chemical engineers' handbook**. 7° ed. [s.l.] : McGraw-Hill, 1997.

PETERNELLI, Luiz Alexandre. Regressão linear e correlação. **Inf162**, [s. l.], p. 1–11, 2004. Disponível em: <<http://www.dpi.ufv.br/~peternelli/inf162.www.16032004/materiais/CAPITULO9.pdf>>

SPX COOLING TECHNOLOGIES INC. Purposes and Types of Fill. **SPX Cooling Technologies INC**, [s. l.], p. 2–5, 2012. Disponível em: <<http://proofinperformance.com/pdfs/library/CTII-02A.pdf>>

TERMOPARTS. **Torre de Resfriamento**. 2018. Disponível em: <<http://www.torreresfriamento.com.br/torre-de-resfriamento/torre-de-resfriamento-02.htm>>.

## 8 APÊNDICE A

```

import pandas as pd
import os
import sys
%matplotlib inline
import xlswriter
from lmfit import minimize, Parameters, Parameter, report_fit, conf_interval, printfuncs,
conf_interval2d
import numpy as np
from scipy.optimize import fsolve
dados= pd.read_excel( 'C:/Users/Carol/Google
Drive/TCC/phyton/dadosumidade.xlsx','plan1')
Har1=dados['Harin']
twi=dados['mediaquente']
TC=[]
two=dados['mediafrio']
p1=0.16161
LG=dados['LG']
def f1(TC,two,LG,Har1,twi,p1,i):
p2=-4.5382-4.186*LG[i]
p3=90.185-Har1[i]+4.186*LG[i]*twi[i]
return TC-(4.186*-(2*((np.arctan((2*p1*two[i]+p2)/np.sqrt(-p2**2+4*p3*p1)))-
np.arctan((2*p1*twi[i]+p2)/np.sqrt(-p2**2+4*p3*p1)))/np.sqrt(-p2**2+4*p3*p1)))

TC_0=0.4

for i in range(0,len(LG)):
TC_aux=fsolve(f1,TC_0,(two,LG,Har1,twi,p1,i))
TC.append(TC_aux[0])

```

## 9 APÊNDICE B

```

import pandas as pd
import os
import sys
%matplotlib inline
import matplotlib.pyplot as plt
import xlswriter
from lmfit import minimize, Parameters, Parameter, report_fit, conf_interval, printfuncs,
conf_interval2d
import numpy as np
from scipy.optimize import fsolve
dados= pd.read_excel( 'C:/Users/Carol/Google
Drive/TCC/phyton/comparacaomodelo.xlsx','Plan1', index_col=None, na_values=['NA'])
mask = (dados['UMID'] >= 0.9) & (dados['UMID']<=0.95)
dados1 = dados[mask]
LG=dados1['novoLG']
TC=dados1['novoTC']
# definindo a função que será minimizada
def fcn1min(params, LG, TC):
    alfa = params['alfa'].value
    b = params['beta'].value
    tc1_model = alfa*(LG**b)
    return TC - tc1_model
# criando o grupo de parâmetros que serão ajustados
params = Parameters()
params.add('alfa', value= 0.55)
params.add('beta', value= -0.6)

# determinando os parâmetros ótimos pelo método leastsq
result = minimize(fcn1min, params, method='leastsq', args=(LG,TC))

# calculate final result
tc1_model = TC + result.residual

# write error report
report_fit(params)
alfa=params['alfa'].value
b = params['beta'].value
LG2= np.linspace(0.7,1.1,100)

plt.subplot(2,1,1)
plt.plot(LG,TC,'r*')
plt.xlabel('L/G',fontsize=12)
plt.ylabel('TC',fontsize=12)
plt.plot(LG2,alfa*(LG2**-beta),'b');

```

```
plt.subplot(2,1,2)
plt.plot(LG,result.residual,'r*')
plt.xlabel('L/G',fontsize=12)
plt.ylabel('Residuo',fontsize=12)

x=np.linspace(0.4,0.9,100)
y=np.linspace(0.4,0.9,100)
plt.subplot(2,1,1)
plt.plot(TC,tc1_model,'r*')
plt.xlabel('tc_modelo',fontsize=12)
plt.ylabel('TC',fontsize=12)
plt.plot(x,y,'b');
plt.title('grafico de espalhamento');
```

## 10 APÊNDICE C

Dados pré-troca do recheio

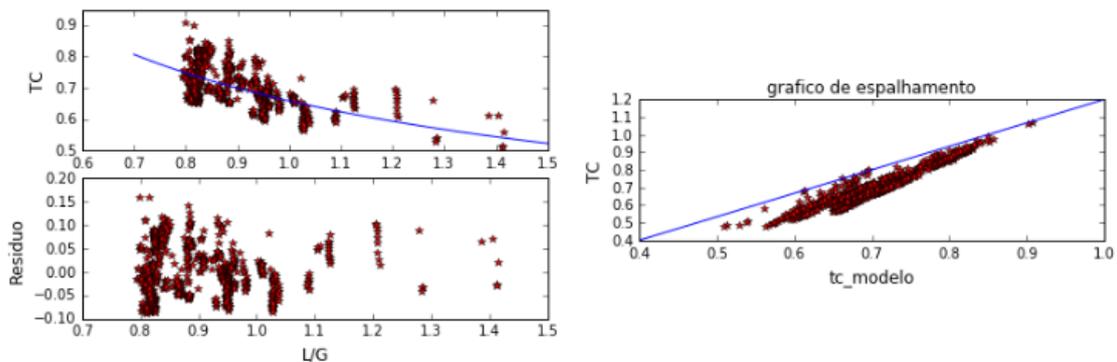


Figura 10-1 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 95 - 100%

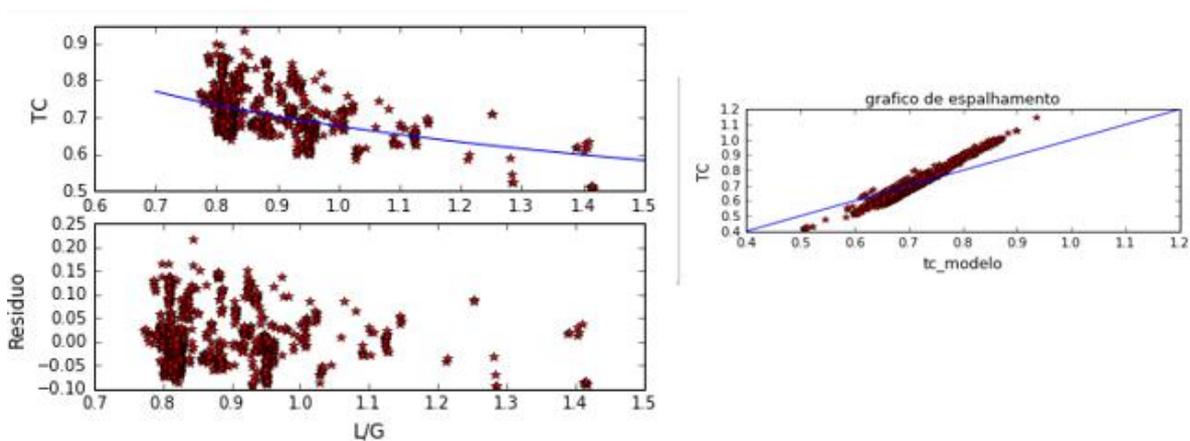


Figura 10-2 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa de 90-95%

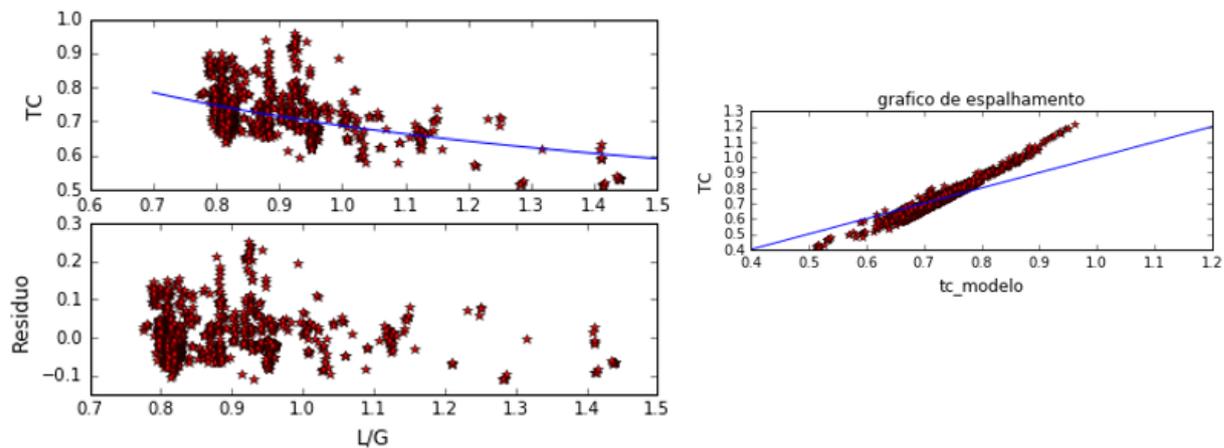


Figura 10-3 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa de 85-90%

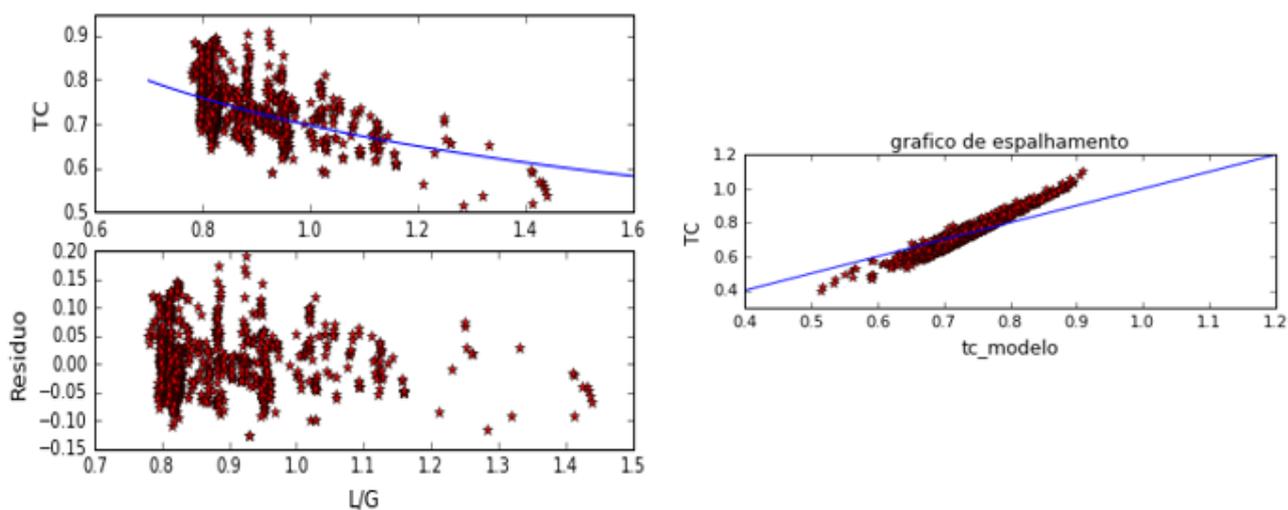


Figura 10-4 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa de 80-85%

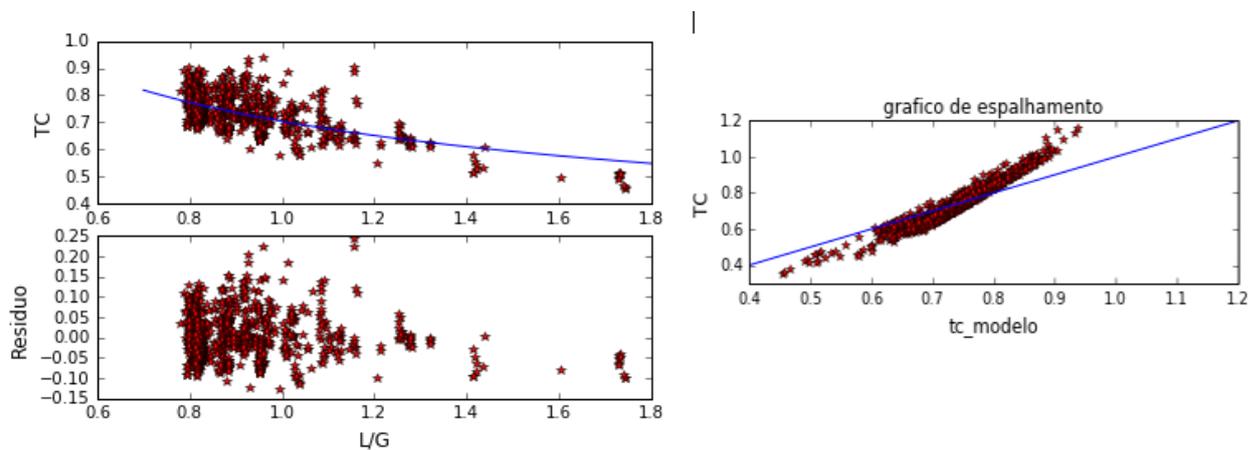


Figura 10-5 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa de 75-80%

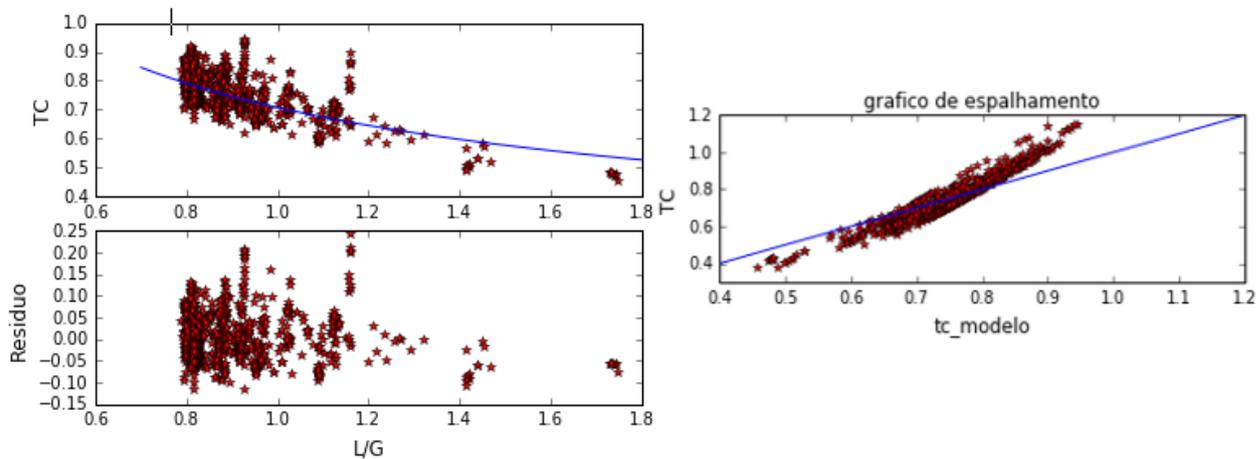


Figura 10-6 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa de 70-75%

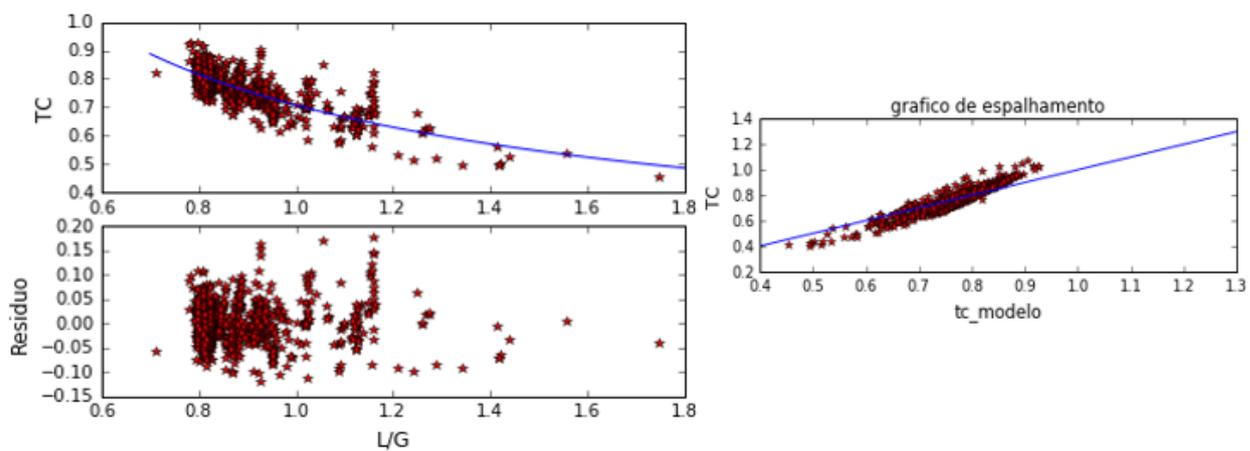


Figura 10-7 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa de 65-70%

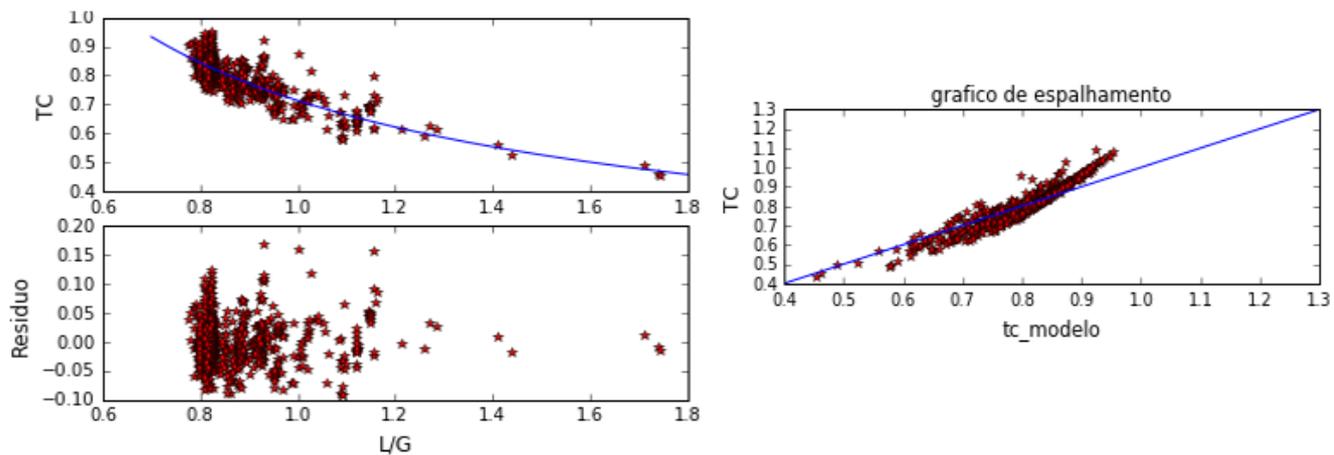


Figura 10-8 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa de 60-65%

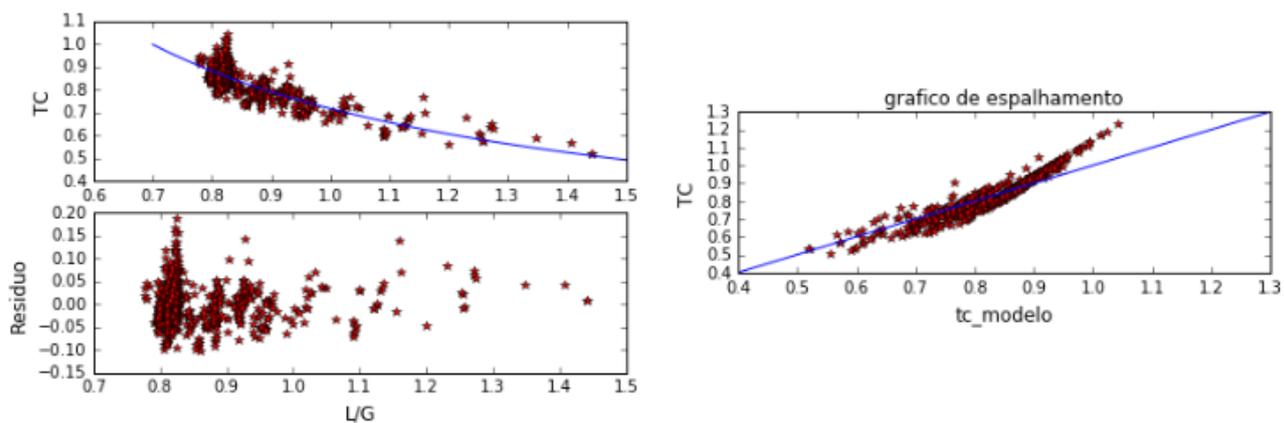


Figura 10-9 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa de 55-60%

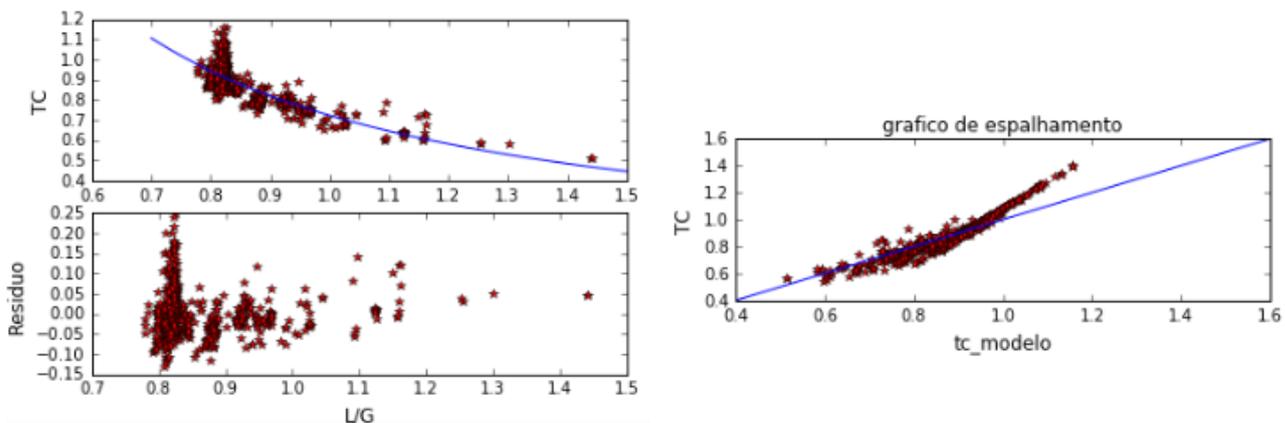


Figura 10-10 Ajuste de dados para faixa de umidade relativa de 50-55%

## 11 APÊNDICE D

Dados pós-troca do recheio

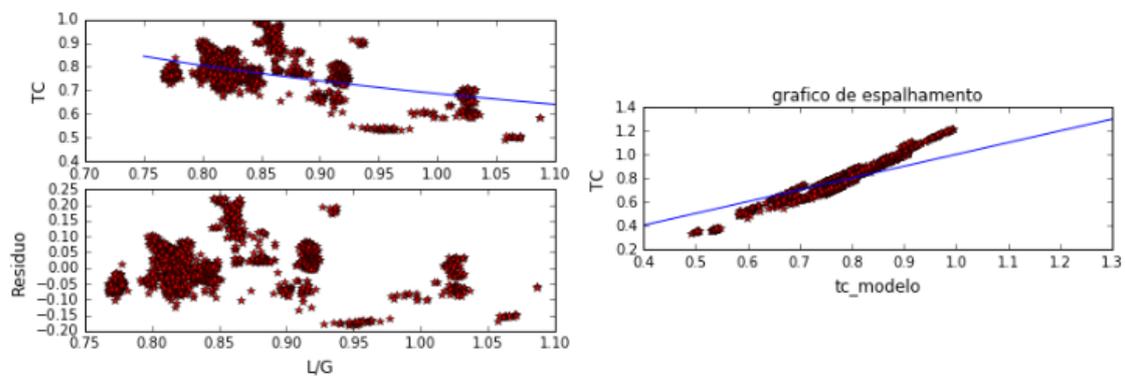


Figura 11-1 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 95 - 100%

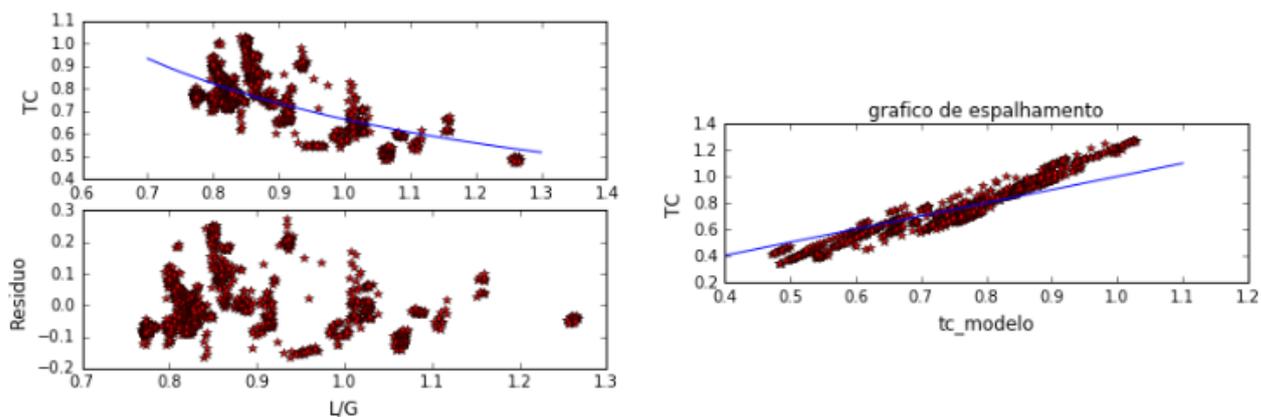


Figura 11-2 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 90-95%

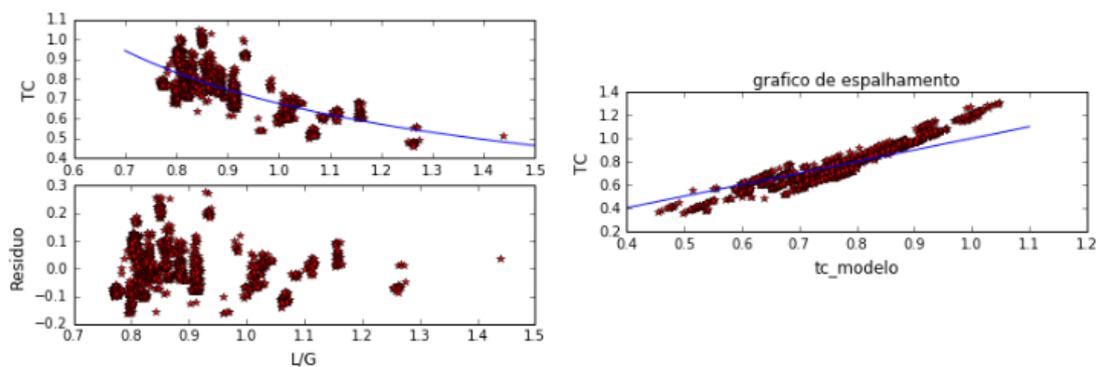


Figura 11-3 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 85-90%

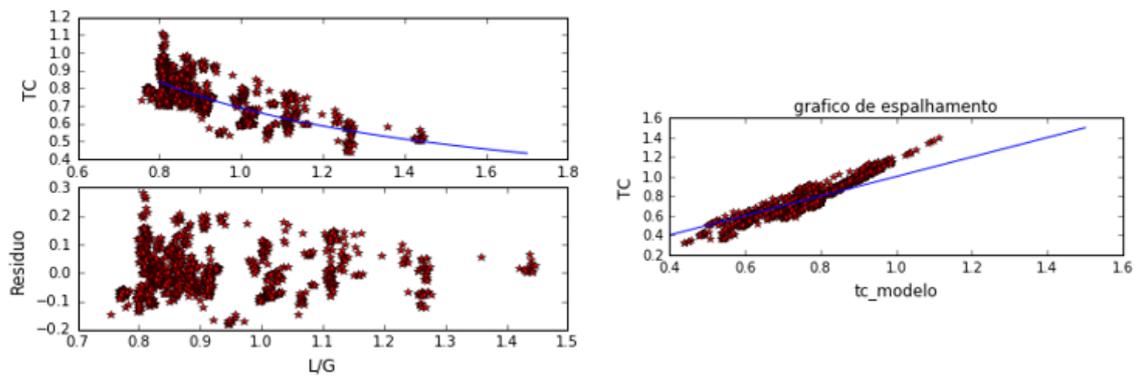


Figura 11-4 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 80-85%

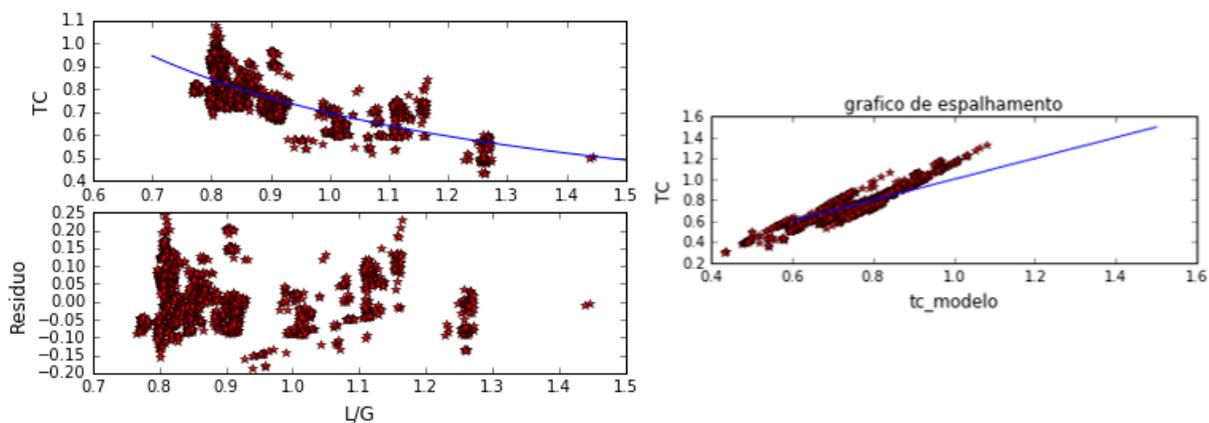


Figura 11-5 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 75-80%

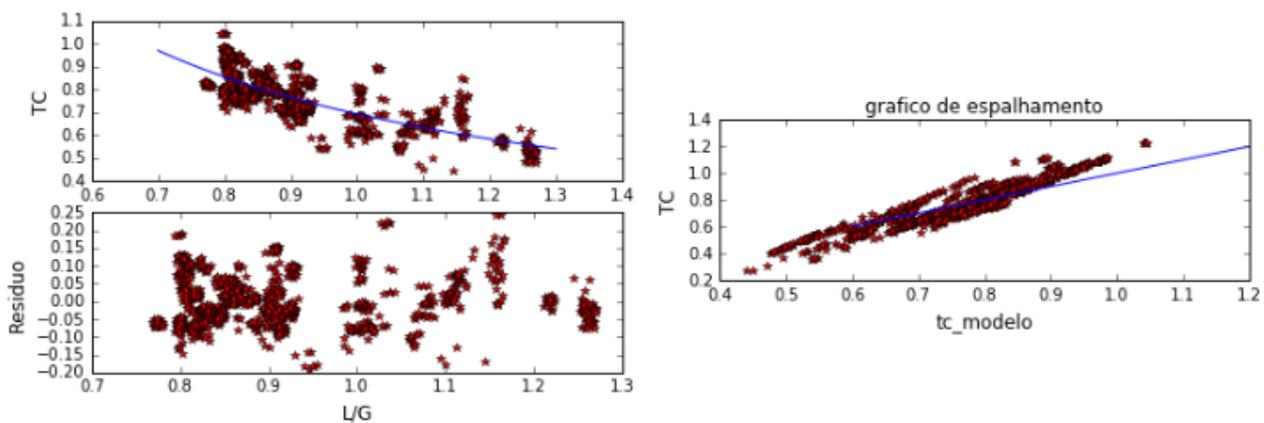


Figura 11-6 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 70-75%

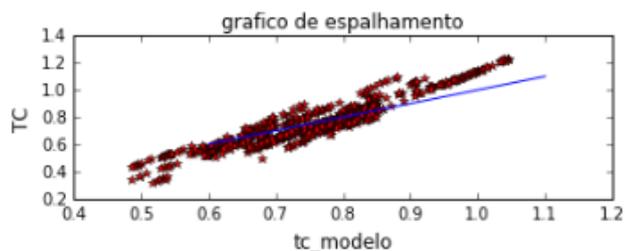
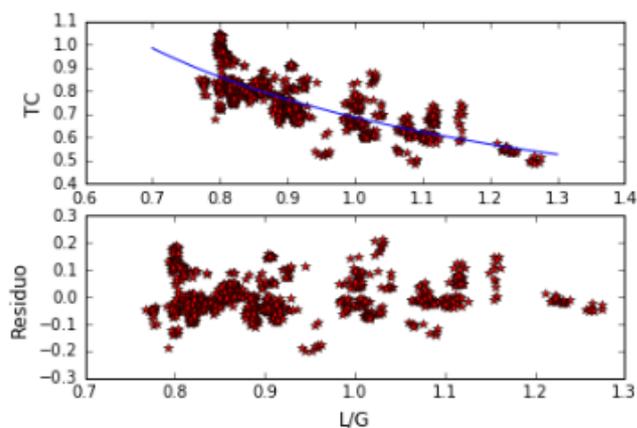


Figura 11-7 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 65-70%

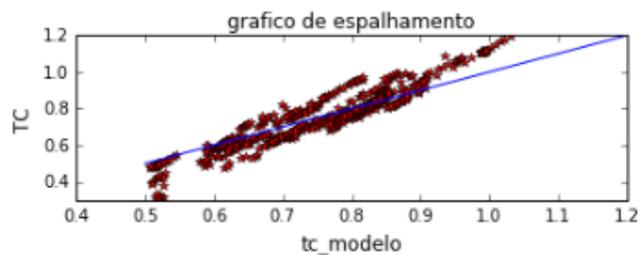
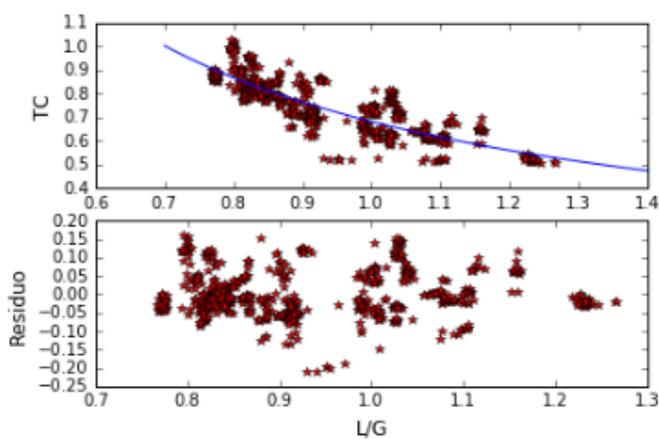


Figura 11-8 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 60-65%

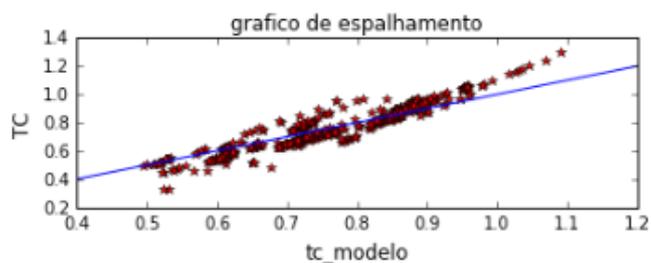
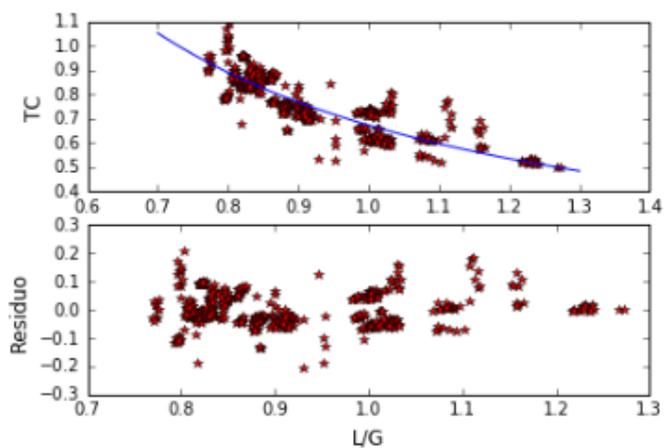


Figura 11-9 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 55-60%

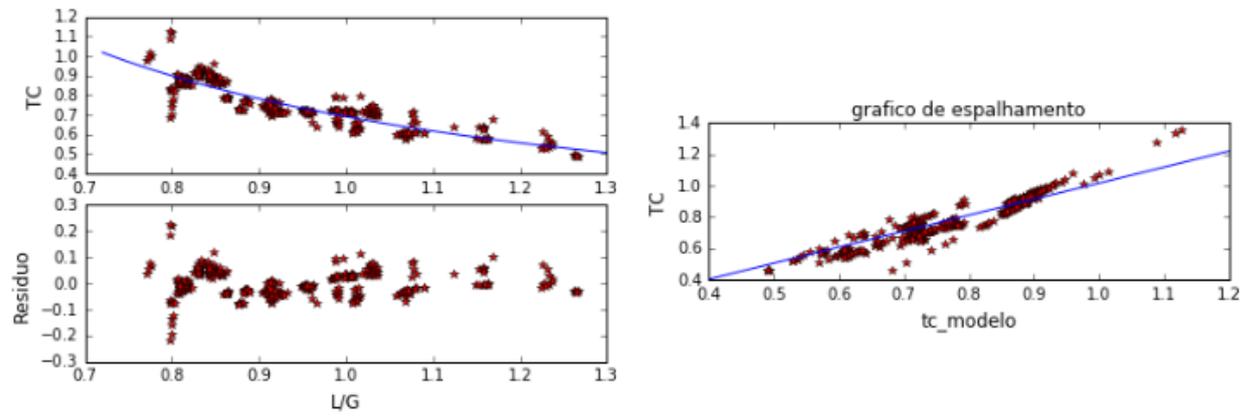


Figura 11-10 Ajuste de dados na faixa de umidade relativa entre 50-55%

## 12 APÊNDICE E

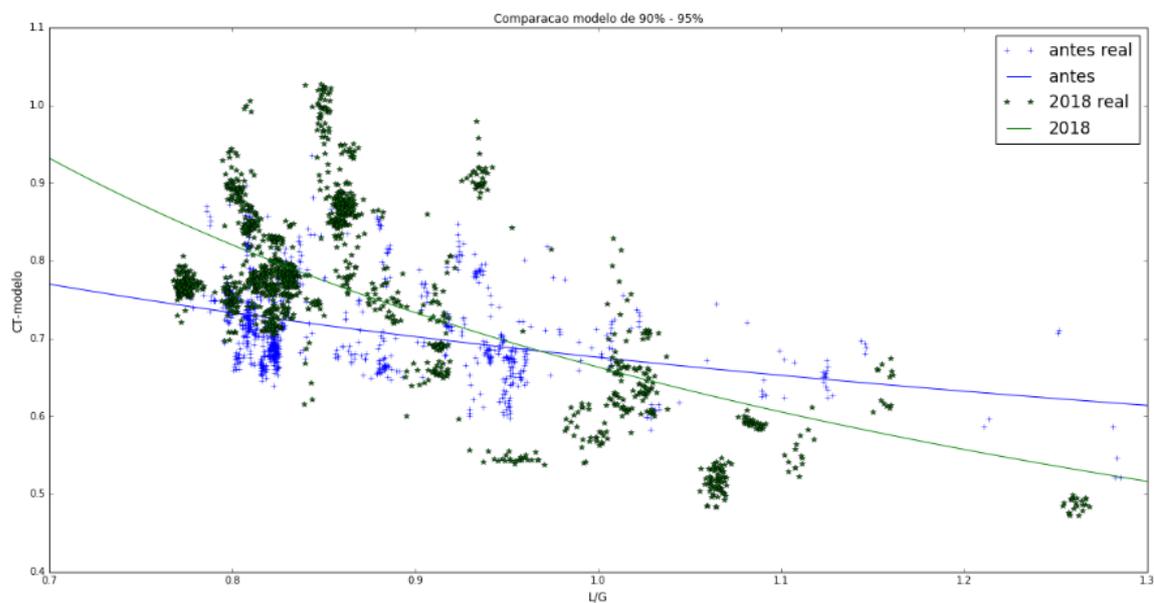


Figura 12-1 Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 90-95%

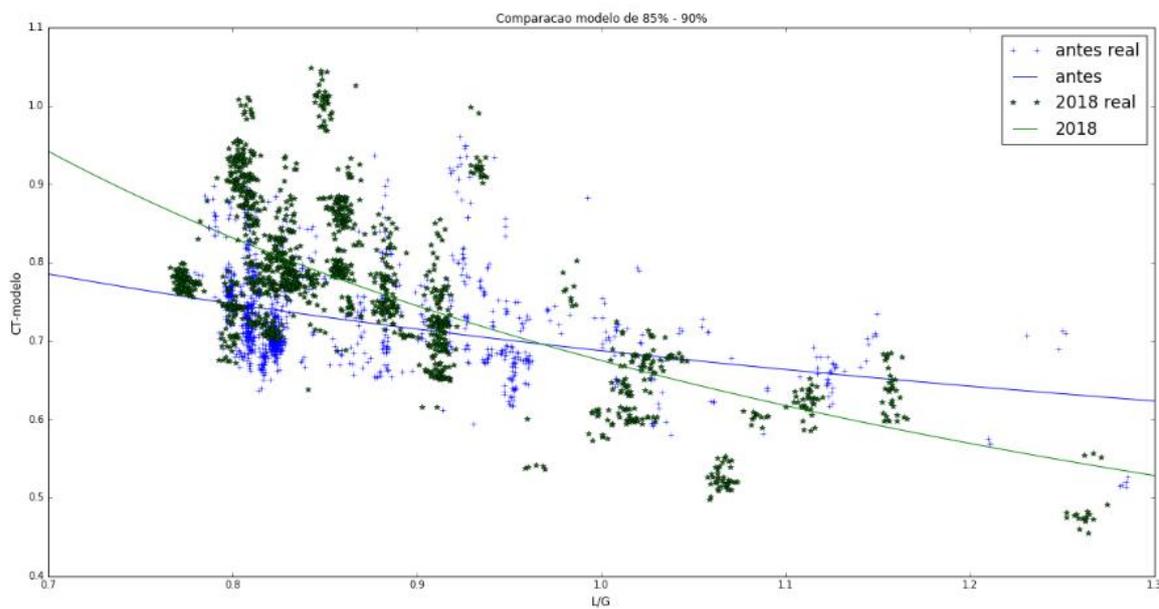


Figura 12-2 Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 85-90%

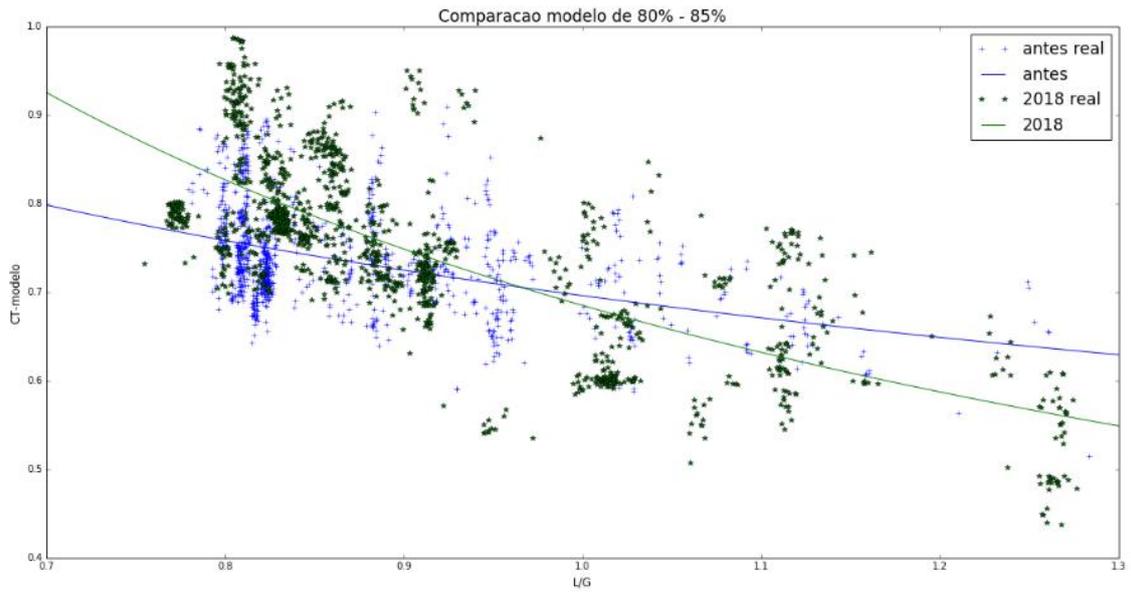


Figura 12-3. Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 80-85%

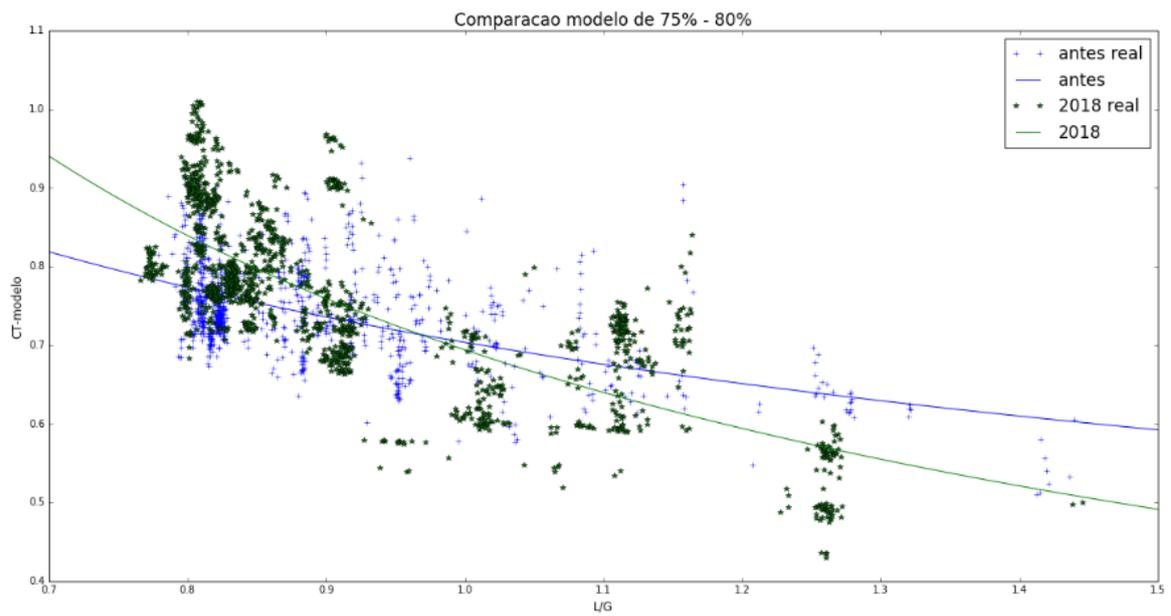


Figura 12-4. Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 75-80%

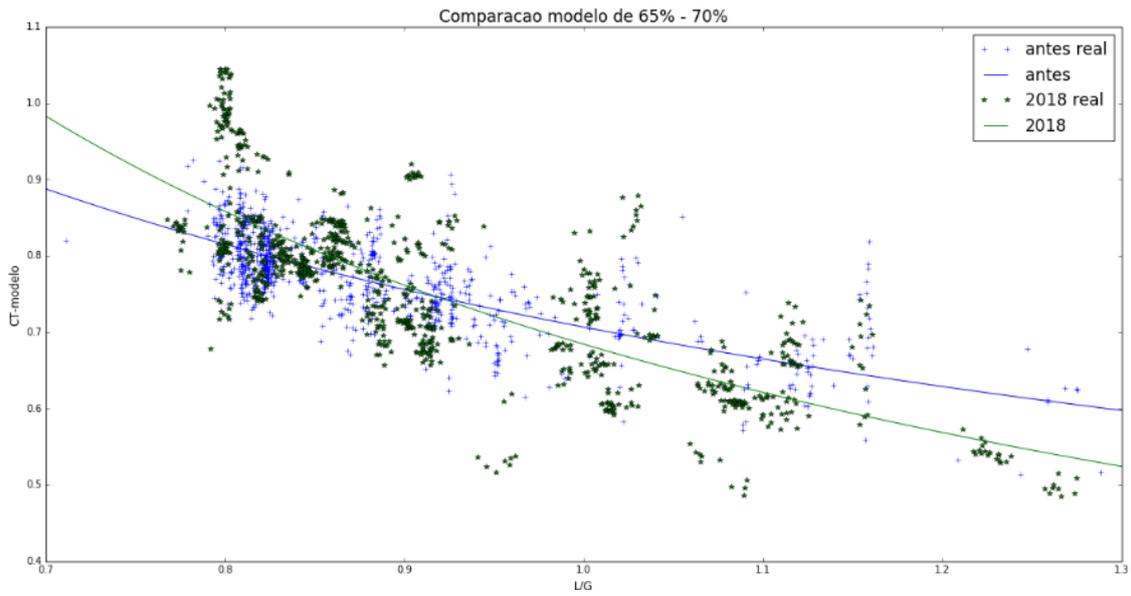


Figura 12-5 Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 65-70%

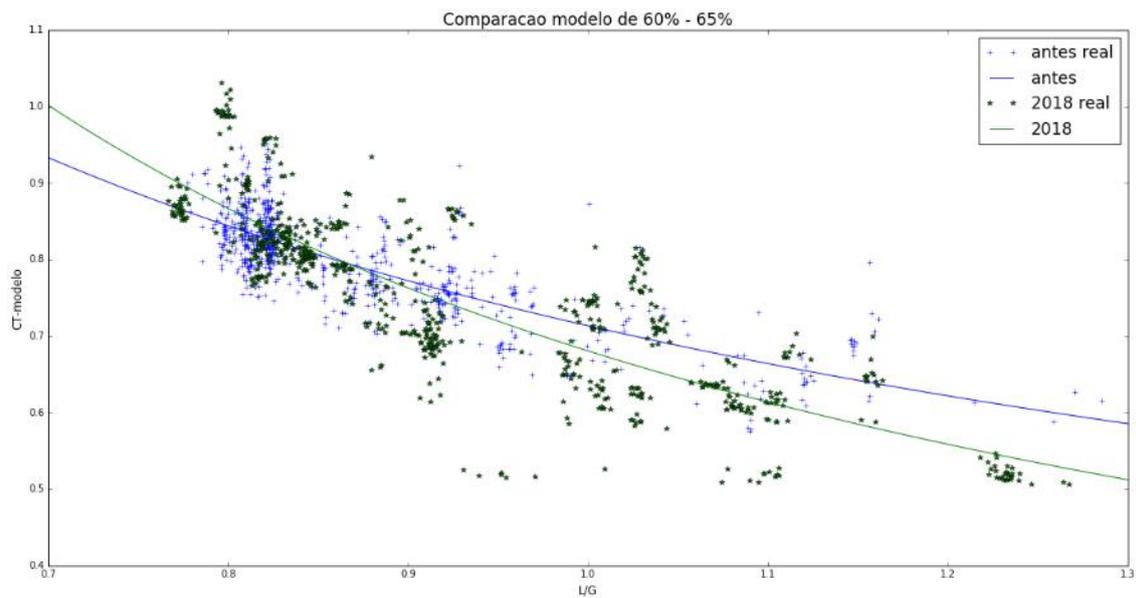


Figura 12-6. Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 60-65%

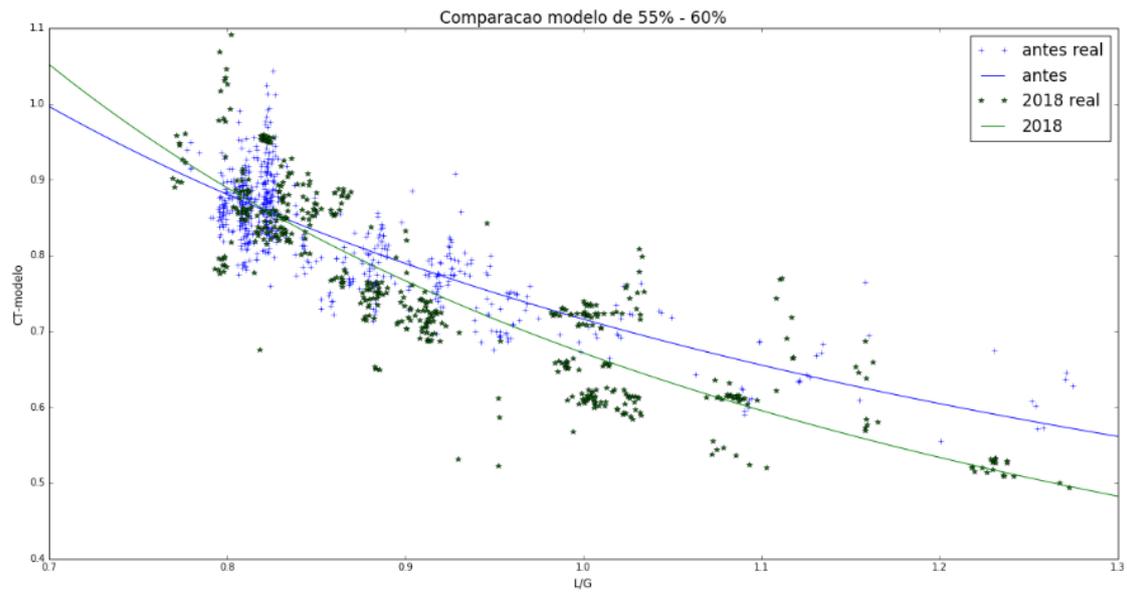


Figura 12-7. Comparação dos modelos e dados reais de CT nas de faixa de umidade relativa de 55-60%