



XVI CONBRAVA - CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DO AR

São Paulo Expo - 10 a 13 de setembro de 2019

EFEITO DA BAIXA TEMPERATURA DA ÁGUA DE CONDENSAÇÃO NA OPERAÇÃO DE UMA CAG.

VINICIUS DE AZEVEDO CRUZ

Resumo

Em sistemas com condensação a água, temos a necessidade de torres de resfriamento, para rejeitar o calor transferido pelo fluido refrigerante durante o ciclo de compressão. Pela análise do diagrama pressãoXentalpia, conclui-se que, quanto menor a temperatura da água na condensação, maior a eficiência do chiller, devido à redução do lift de compressão. Para isso, temos que reduzir o setpoint da água condensada, gerando um maior consumo elétrico da torre, porém um ganho de eficiência na URL. A partir de simulações térmicas, comprovou-se que, para as condições psicrométricas de Brasília, um sistema operando com alta demanda da torre, tem uma razão de economia elétrica entre chiller/torre, superior à 4 vezes, quando comparado à operação padrão. Desta forma, um sistema com capacidade de 500 TR, operando em horário comercial, pode gerar uma economia elétrica de até R\$ 96 mil reais/ano, atendendo as condições de conforto térmico. Ou seja, comprova-se que, o aumento da demanda da torre garante uma economia de energia na operação, já que o chiller é o principal consumidor de energia em uma CAG. Avaliando a simulação em outras regiões, teremos diferentes resultados, garantido pelas diferentes condições psicrométricas locais.

Palavras-chave: Eficiência. Psicrometria. Central de água gelada. Lift. Torres de resfriamento.

ABSTRACT

In water condenser systems, we need cooling towers to reject the heat transferred to the condensed water. By analyzing the diagram P_xH, tells that lower the temperature of the water in the condensation, generate greater efficiency of the chiller due to the reduction in the lift of compression. But, to reduce the temperature of condensed water, the tower needs a higher electric consumption, however, an efficiency gains in the Chiller. From thermal simulations, proven that for psychometric conditions of Brasilia, a system operating with high energy demand in the tower, saving electricity, can be superior to 4 times, when compared to the standard operation. In this way, a system with a capacity of 500 TR, operating during business hours, can become an electric economy of up to R \$ 96 thousand reais/year, taking into account the thermal comfort conditions. In other words, the higher demand for the tower sustainable energy, because the chiller is grater consumer in a in a CAG. By evaluating the simulation in other regions, it selects results and guarantees the different local psychometric conditions.

Keywords: Efficiency. Psychometric. Central chilled plant. Lift. Cooling towers.

1 INTRODUÇÃO

Sistemas de expansão indireta, tem como característica a circulação de água (ou outro fluido), em circuito fechado, ao longo da edificação, com o objetivo de climatizar os ambientes. A função desse sistema é transferir a carga térmica do ambiente para a água, que ao retornar ao evaporador da URL sede o calor absorvido, se resfriando e retornando ao loop. O fluido refrigerante, ao absorver o calor no evaporador, passa pelo processo de compressão e em seguida, rejeita o calor admitido no condensador. Por fim, o condensador rejeita o calor transferido pelo refrigerante à atmosfera.

Chillers podem ser classificados de acordo com o modo de rejeição de calor para a atmosfera, podendo ser condensados a ar ou a água. Sistemas com condensação a água são mais eficientes, possuem maior capacidade térmica, instalação mais versátil e menores níveis de ruído, quando comparados aos de mesma capacidade condensados a ar. A alta capacidade da água de absorver o calor advindo do ciclo de compressão a vapor do refrigerante, garante aos equipamentos condensados a água um ganho de eficiência superior, quando comparados aos de mesma capacidade, mas com outra forma de condensação. Ou seja, sistemas condensados a água consomem menos energia elétrica do que os de mesma capacidade condensados a ar.

Pela análise do diagrama pressão entalpia sabe-se que, reduzir as temperaturas da água na condensação, garante ao chiller um aumento considerável de eficiência devido a redução do lift de compressão, ou seja, do trabalho do compressor. Uma central de água gelada com condensação a água é composta por chillers, bombas e torres de condensação. Dentre esses componentes, sabe-se que a URL é a principal fonte de consumo de energia, já que é a responsável por todo o ciclo de compressão a vapor.

O trabalho da torre de condensação, é rejeitar o calor absorvido pela água no condensador. Em sistemas termodinâmicos, pressão e temperatura se correlacionam, e após a compressão do fluido refrigerante, este é descarregado no condensador a alta pressão e temperatura. Desta forma, reduzir a temperatura da água condensada garante um aumento de eficiência do chiller, principal consumidor de energia em uma CAG. Porém, existe uma falsa interpretação que o aumento do set-point da água condensada garante uma economia de energia no sistema. Nesses casos, a redução de consumo é exclusiva da torre, enquanto que no chiller ocorre um aumento, gerado pela maior demanda do compressor.

O foco deste trabalho é demonstrar que chillers com condensação a água utilizando torres de resfriamento, como método de rejeição de calor, podem ter sua operação otimizada de acordo com as condições psicrométricas locais, e assim reduzir os custos elétricos operacionais da CAG.

2 TORRES DE CONDENSAÇÃO

Torres de condensação são equipamentos mecânicos responsáveis pela rejeição do calor absorvido no condensador, para a atmosfera. Para isso, contam com uma transferência de calor e massa garantida pelo contato direto do ar externo e a água advinda do circuito. Esse processo depende de alguns fatores, como as condições psicrométricas do ar externo, dimensões e capacidade da torre, set-point de temperaturas de trabalho e a potência do ventilador.

2.1 Tipos de torres

Atualmente, existem alguns tipos de torres disponíveis no mercado. A mais utilizada em sistemas de climatização são as do tipo com tiragem induzida, conhecidas por possuírem ventiladores axiais posicionados na parte superior da torre. A vantagem dessa configuração é permitir uma alta velocidade da descarga do ar, dificultando a recirculação do ar quente rejeitado. O escoamento do ar é induzido pelo ventilador, que ao criar uma zona de baixa pressão internamente na torre, facilita a circulação e renovação do ar externo, na parte inferior, garantindo assim a transferência de calor entre o ar e a água. Quanto aos componentes, uma torre é composta basicamente por: uma carcaça, separador de gotas, sistema de diluição, enchimento e bacia (Gomes, 1997).

2.2 Dimensionamento

A capacidade térmica de qualquer torre depende do diferencial de temperatura requisitado pelo sistema de condensação, da vazão de água e da temperatura de bulbo úmido local. Para o correto dimensionamento de uma torre de condensação, deve ser levado em conta não só o calor absorvido pelo refrigerante no evaporador, mas também o resultante do processo de compressão. Desta forma, a capacidade térmica de uma torre de condensação utilizada em sistemas de climatização, deve ter sua capacidade térmica baseada em 1.25 kW por Kilowatt dissipado no evaporador. A condição padrão define que, para o resfriamento de 54 mL/s de água de 35°C para 29.4°C com uma temperatura de bulbo úmido de 25.6°C, uma torre rejeita 1.25 kW por kilowatt do evaporador (ASHRAE Handbooks HVAC Systems, 2012).

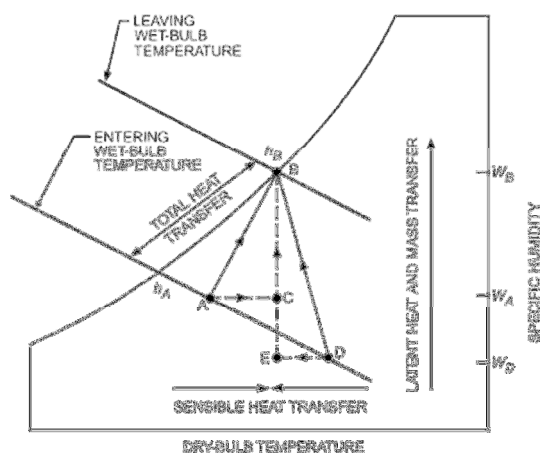
Outros parâmetros importantes no dimensionamento de torres, são a vazão de água, o range e o approach. A vazão de água, seguindo o princípio de conservação de massa, deve ser a mesma do condensador do chiller. Mas, como temos perdas durante o processo de troca latente, precisamos de um circuito adicional de reposição da água na bacia. O Range é o diferencial de temperatura gerado pela torre. E por fim, o approach é definido como a diferença entre a temperatura de saída da água da torre e a TBU ambiente. Ou seja, quanto menor approach, maior a efetividade da torre. Vale salientar que, como esse tipo de equipamento trabalha com transferência de calor por contato direto, quanto maiores as dimensões e

consequentemente, a área de contato, maior será a efetividade das trocas térmicas, porém o aumento das dimensões pode acarretar num investimento inicial superior para a instalação.

2.3 Análise Psicrométrica

Sobre as condições psicrométricas, temos uma transferência de calor combinada, formada por uma parcela sensível, garantida pela diferença de temperatura entre o ar e água, e outra latente, gerada pela evaporação da água. Uma análise psicrométrica do processo segue abaixo:

Figura 1 – Análise Psicrométrica torre condensação



Fonte: ASHRAE, HVAC Systems 2012.

Em "A" temos o ar na entrada da torre sobre condições CNTP, em "B" o ar saturado na saída da torre. Desta forma, a quantidade de calor transferida da água para o ar durante o processo é proporcional à diferença entálpica entre os pontos "A e B". Além disso, como as linhas de entalpia constante são muito próximas, a variação entálpica pode ser facilmente calculada pela variação da temperatura de bulbo úmido (ASHRAE Handbooks HVAC Systems, 2012).

Para o bom funcionamento do processo algumas condições psicrométricas podem favorecer ou dificultar essa etapa. Condições climáticas com baixa umidade relativa, em geral, garantem grandes variações na temperatura da água na torre, devido à alta taxa de troca latente, característico do resfriamento evaporativo. Climas com baixa TBU também favorecem a operação, pois sabemos que a mínima temperatura que a torre pode atingir é a TBU ambiente, garantido pelo limite físico de água presente no ar. Porém, regiões climáticas de alta umidade relativa e temperatura externa, dificultam a operação da torre devido à baixa disponibilidade de trocas térmicas entre o ar e a água condensada. Além disso, sabe-se que as condições psicrométricas do ar externo estão constantemente variando, principalmente num país com clima tropical como o Brasil. Assim, com o advento da simulação termo energética, pode-se comprovar em quais

regiões e condições a operação dos sistemas condensados a água será mais favorável.

2.4 Perda de água no processo

As torres de resfriamento surgiram para atender a necessidade de reaproveitamento da água utilizada em processos de resfriamento. Antes do seu surgimento, a água utilizada em processos era simplesmente descartada, o que é contrário aos pontos de vista econômico e ecológico. Assim, a reutilização da água advinda dos processos se deu de maneira quase mandatória, e para isso, essa deveria operar em circuito fechado. A perda de água presente nesses sistemas se dá por três meios: evaporação, purga e arraste.

Com a crescente demanda de água e para que o processo ocorra de maneira sustentável, ao longo dos anos, os processos foram cada vez mais otimizados de forma que atualmente, as perdas de água em novos equipamentos são pequenas e, via de regra, não superam 2% da vazão da água em circulação, supondo as condições citadas no item 2.3. A perda por arraste é decorrente do modo de funcionamento, com o escoamento induzido, na qual ocorre o arraste de gotículas durante a operação. Mas, essa perda pode ser reduzida utilizando alguns métodos construtivos como eliminadores de gotas. O processo de purga é necessário para controlar a concentração de sais e drenagem de óleos na água condensada, reduzindo assim a possibilidade de incrustações nas tubulações. Por fim, temos a perda por evaporação, responsável pela maior parcela, devido principalmente às condições climáticas locais, já que estão sujeitas as leis físicas (Gomes, 1997).

Existem atualmente, algumas equações empíricas que permitem estimar a perda de água decorrente do processo de resfriamento nas torres. Para a perda por evaporação temos a formulação do fator de perda que estima uma fração da água perdida de acordo com a umidade relativa e a TBU local (Qureshi and Zubair, 2007):

$$\text{Fator Perda} = (113 - 8.417\Phi + 1.6147T_{bd}) \quad (1)$$

Onde, Φ representa a umidade relativa do ar, e T_{bd} a temperatura de bulbo úmido na entrada da torre. E a vazão volumétrica de água perdida na evaporação, pode ser estimada por:

$$\dot{V}_{\text{evaporação}} = \text{Fator Perda} * \dot{Q}_{\text{água}} * \Delta T_{\text{Torre}} \quad (2)$$

Onde, $\dot{V}_{\text{evaporação}}$ representa a vazão volumétrica perdida por evaporação [m^3/h], o $\dot{Q}_{\text{água}}$ a vazão volumétrica da torre [m^3/h] e ΔT_{Torre} o range da torre [$^{\circ}\text{C}$]. Já para o processo de arraste, temos a seguinte formulação:

$$\dot{V}_{\text{arraste}} = \dot{Q}_{\text{água}} * (\% \text{água arraste}) * FR_{ar} \quad (3)$$

Onde, “%água arraste” representa o percentual de água perdida por arraste, e FR_{ar} a taxa de vazão do ventilador da torre de acordo com as condições padrões de seleção da torre. E por último, temos a formulação para o cálculo da perda de água por purga:

$$\dot{V}_{purga} = \frac{\dot{V}_{evaporação}}{R_{concentração} - 1} - \dot{V}_{arraste} \quad (4)$$

Onde, $R_{concentração}$ representa a razão de concentração de impurezas na água da purga em comparação com a água em circulação na bacia da torre.

Mesmo existindo a perda de água, consequente do processo de resfriamento evaporativo, sistemas com condensação a água são mais recomendados em plantas com carga térmica superior a 300 TR devido a alta eficiência e menor consumo elétrico. Além disso, esses tipos de chillers tem seus níveis de eficiência tomados como referencia para edificações acima de 5 pavimentos, ou área próxima a 14.000 m²(ASHRAE Std 90.1).

Existe uma correlação direta e complexa entre a água e a produção de energia. Por exemplo, em países como o Brasil, temos a maior parcela da matriz energética advinda das hidrelétricas, utilizando grande quantidade de água para a produção de energia. Mas, para o tratamento e reaproveitamento da água usada para consumo, é necessária a utilização de energia elétrica. Nos Estados Unidos, aproximadamente 86% da energia produzida é advinda das termoelétricas, segundo o U.S Energy Information Administration. Ou seja, também necessitam de um grande volume de água no processo de produção energética. Estudos estimam que em 2008, 189 trilhões de litros de água foram utilizados nas plantas de energia, enquanto que apenas 6 trilhões de litros foram consumidos. A partir do montante de energia produzida, pode-se estimar a quantidade de água necessária para a produção, que nesse caso representa 1.624 litros/MWh produzido, no caso americano. (EIA, 2016)

Quando comparamos o consumo de energia e o montante de água para gerá-la, nos dois tipos de sistemas, com condensações distintas, chillers com condensação a ar são responsáveis por aproximadamente o dobro do consumo de água. Mas, quando o consumo direto de água é avaliado, no mesmo tipo de sistema, os chillers condensados a ar tem a vantagem de menor consumo de água. Ou seja, esses tipos de sistemas usam mais energia elétrica, e ao mesmo tempo possuem um consumo direto de água inferior. Desta forma, conclui-se que sistemas com condensação a água são preferíveis em locais onde a redução no consumo elétrico é uma prioridade, e os condensados a ar onde a conservação da água é preferível (Poole, Lessans, 2019).

3.0 OTIMIZANDO CHILLERS E TORRES

Atualmente, um dos grandes desafios da engenharia é constantemente

otimizar e melhorar processos, para reduzir gastos, aumentar a produtividade e atender aos critérios sustentáveis. Centrais de água gelada possuem uma operação complexa e sequencial, desta forma existem algumas estratégias de controle e operação que podem otimizar o processo. Um dos modos operativos mais comuns atualmente, é pelo set-point de temperaturas. A partir do cálculo de carga térmica máxima da edificação ou do processo, é definida a temperatura de saída de água gelada da URL que atenderá a demanda de climatização do sistema. O resto do sistema é dimensionado e tem sua operação definida de acordo com a operação do chiller.

Projetistas menos experientes costumam dimensionar sistemas com uma margem de segurança alta, para atender condições mais críticas de operação. Desta forma, tem-se a certeza, que durante os períodos de cargas térmicas e demandas parciais, o sistema de climatização atenderá a capacidade requerida. Porém, em alguns casos, pode ocorrer o superdimensionamento de componentes, pois para atingir a carga térmica de pico de uma edificação comercial, por exemplo, devemos contar com diversos fatores como: ocupação máxima, alta taxa de dissipação térmica dos componentes eletrônicos, condições climáticas extremas entre outras. Além disso, normativos atuais indicam que os sistemas permanecem 99% do tempo de funcionamento sobre cargas parciais, distantes da plena capacidade, favorecendo assim configurações de equipamentos mais eficientes em médias cargas (AHRI Std 551/591).

Alguns sistemas e equipamentos atuais, contam com alguns dispositivos que permitem uma operação mais vantajosa. Um exemplo é o variador de frequência presente nos compressores dos chillers. Com a variação da frequência e conseqüentemente da velocidade de operação, compressores com essa tecnologia permitem a modulação de capacidade de acordo com vazão de refrigerante demandada pelo evaporador. Assim, possuem uma eficiência superior quando comparados aos de mesma capacidade modulados por controles geométricos. Esse ganho de eficiência pode ser traduzido em redução do custo elétrico operacional do sistema de climatização, um dos maiores consumidores em edifícios comerciais. A tecnologia da velocidade variável está presente não só nos chillers, mas também em bombas, ventiladores de torres e fan coils, de modo que atualmente, já existem plantas operando em sua totalidade com velocidade variável, visando otimizar a operação.

Por muitos anos, sistemas com condensação a água são projetados e dimensionados seguindo condições padrões como uma temperatura de entrada da água de condensação fixa em 29.4°C, e a temperatura de saída em 35°C, com uma vazão de $5.4 \cdot 10^{-5}$ m³/s/kW (3 GPM/TR) porém, existem alguns estudos atuais que visam otimizar essa operação introduzindo modificações, como por exemplo, redução da vazão ou mudança nos set-points de temperatura de água. Alguns estudos apontam que a utilização de sistemas com vazão de condensação igual a $3.6 \cdot 10^{-5}$ m³/s/kW (2 GPM/TR), pode reduzir o investimento inicial já que ocorre a redução da capacidade das bombas e ventiladores das torres. Desta forma, a economia inicial seria

superior ao aumento do gasto gerado por uma maior demanda do compressor, característica do aumento do lift de compressão das altas temperaturas de condensação. (Kirsner, 2002).

Segundo Furlong e Morrison (2005), quanto maior a temperatura de bulbo úmido, maior a demanda necessária na vazão de condensação e menor o approach para atingir uma operação otimizada. Já para baixas temperaturas de bulbo úmido, por exemplo 19°C baixas vazões de água condensada se mostram energeticamente eficientes, já que nessas condições a umidade relativa do ar geralmente é elevada. Por fim, nas temperaturas de 25,5°C e 28,9°C a vazão padrão de 3 GPM/TR e médios approaches demonstraram um ponto ótimo na curva operacional.

O foco desse trabalho é demonstrar, através de simulações termo energéticas, que a mudança no modo operacional pode reduzir o custo e consumo elétrico. Desta forma, plantas atuais podem modificar sua operação, sem haver custo inicial aos responsáveis. Para demonstrar que o aumento da demanda na torre garante um ganho considerável de eficiência na URL, foi simulada uma CAG padrão com um chiller centrífugo de 500TR de capacidade, com uma bomba primária, uma de condensação e uma torres operando nas duas condições de operação, ou seja, com diferentes set-points de água condensadas, para analisar a diferença nas operações.

4.0 PARÂMETROS E RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

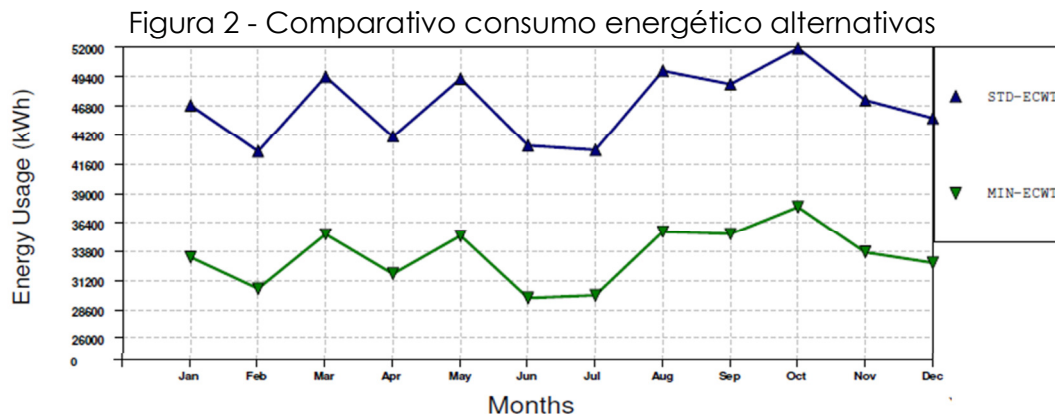
Para que os comparativos apresentados nesse estudo apresentassem um padrão real de funcionamento dos equipamentos atuais, optou-se pela seleção de chillers e torres com certificação de performance internacionais, mantendo assim o padrão de eficiência definido por normas.

A fim de padronizar a simulação térmica foram definidos alguns parâmetros de operação dos equipamentos da CAG, sendo eles:

- Temperaturas de entrada e saída de água gelada no chiller fixas em 12,2°C e 6,7°C respectivamente, com uma máxima perda de carga de 60 kPa tanto na evaporação quanto na condensação.
- Alternativa 1: temperatura de condensação elevada com set-point de 29,5°C, reduzindo a demanda da torre.
- Alternativa 2: menor temperatura de condensação possível de acordo com as condições climáticas, ou seja, alta demanda da torre.
- Condição de operação seguindo horário comercial das 08:00 às 18:00 totalizando 2600 horas por ano.

Vale salientar que as configurações de CAG possuem as mesmas características físicas e construtivas, já que os componentes são idênticos. As alterações que foram propostas se restringem ao modo operacional dos equipamentos, com o objetivo de atingir uma maior eficiência global do sistema. No sistema avaliado por exemplo, a URL é responsável por um

consumo próximo a 70% do total do sistema, ou seja, uma fonte viável para otimizações. Assim, a partir da simulação das alternativas propostas, temos os seguintes resultados na operação dos chillers:



Fonte: Software simulação YCALC

Em azul temos o sistema operando de acordo com a alternativa 1, e em verde a alternativa 2. A partir do gráfico apresentado acima, comprova-se que a partir da redução da temperatura de condensação, tem-se um ganho considerável na eficiência do chiller. Essa otimização do equipamento se traduz para a edificação como redução do consumo elétrico operacional médio de 28%, como pode ser avaliado no gráfico acima. Para uma análise financeira de investimentos e potencial redução no custo com energia elétrica, podemos considerar o custo do kWh padrão atual no Brasil de R\$0,5/kWh, tendo os seguintes resultados com o custo de operação dos equipamentos.

Tabela 1: custo energético Brasília

Custo Operacional	Torre	Chiller	Planta	Razão Economia
Alternativa 1	R\$18,193.00	R\$430,125.00	R\$539,711.00	Chiller / Torre
Alternativa 2	R\$43,931.00	R\$308,310.00	R\$443,635.00	
Resultado Operação	-R\$25,738.00	R\$121,815.00	R\$96,076.00	4.73

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos resultados da simulação, comprova-se que, segundo as condições climáticas e psicrométricas de Brasília, uma dada torre operando com maior demanda possuirá um consumo elétrico superior em cerca de R\$ 25 mil reais/ano. Mas, esse aumento da demanda da torre trará um benefício superior na operação do chiller, de forma que a razão de economia operacional entre os equipamentos é de 4,73. Ou seja, garantirá uma economia considerável para a operação da CAG chegando anualmente numa redução de energia aproximada em R\$ 96 mil reais/ano. Avaliando a simulação sobre outras condições climáticas, teremos diferentes resultados garantido pelas diferenças psicrométricas locais. Como exemplo temos as seguintes cidades como resultado:

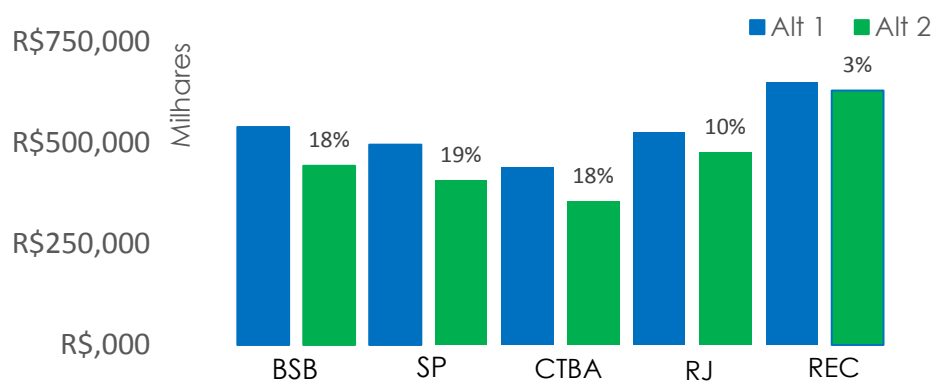
Tabela 2:custo energético capitais

Custo Operacional	Torre	Chiller	Planta	Razão Economia
SÃO PAULO				
Alternativa 1	R\$16,954.00	R\$387,590.00	R\$495,938.00	Chiller / Torre
Alternativa 2	R\$43,931.00	R\$270,797.00	R\$406,121.00	
Resultado Operação	-R\$26,977.00	R\$116,793.00	R\$89,817.00	4.33
Curitiba				
Alternativa 1	R\$15,006.00	R\$340,721.00	R\$440,658.00	Chiller / Torre
Alternativa 2	R\$40,825.00	R\$229,122.00	R\$354,877.00	
Resultado Operação	-R\$25,819.00	R\$111,599.00	R\$85,781.00	4.32
RIO DE JANEIRO				
Alternativa 1	R\$23,407.00	R\$411,581.00	R\$526,382.00	Chiller / Torre
Alternativa 2	R\$43,931.00	R\$340,484.00	R\$475,808.00	
Resultado Operação	-R\$20,524.00	R\$71,097.00	R\$50,574.00	3.46
RECIFE				
Alternativa 1	R\$34,132.00	R\$524,551.00	R\$650,076.00	Chiller / Torre
Alternativa 2	R\$43,931.00	R\$494,646.00	R\$629,970.00	
Resultado Operação	-R\$9,799.00	R\$29,905.00	R\$20,106.00	3.05

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim como já era esperado, em regiões de altas temperaturas de bulbo seco e úmido como Recife, temos uma economia global menor, já que a torre tem sua operação limitada pelas condições climáticas externas. Mas, pela análise dos dados apresentados acima, conclui-se que em todas as regiões a operação da torre sobre alta demanda garante uma operação otimizada do chiller e da CAG global. Parte da economia de todo o sistema pode ser seguidos nos gráficos abaixo:

Figura 3 - Consumo Global CAG



Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa forma, comprova-se que as regiões climáticas de baixas temperaturas de bulbo úmido, e umidade relativa, garantem uma operação otimizada segundo a alternativa de alta demanda da torre de condensação. Avaliando a CAG por completo, tem-se reduções de até 19% no consumo elétrico/ano, demonstrando assim o potencial de otimização nesses sistemas.

Porém, a alta disponibilidade da torre de condensação, garante um maior consumo de água no processo, e a partir das equações apresentadas no tópico 2.4, pode-se calcular o aumento do consumo de água de acordo com cada condição climática durante as 2600 horas de operação anual. Aplicando um valor médio de R\$ 20,00/m³ de água, teremos o aumento do custo para o maior fornecimento hídrico.

Tabela 3-Consumo de água das alternativas

Capital	Alternativa 1 (m ³ /ano)	Alternativa 2 (m ³ /ano)	Consumo de água na torre	
			Aumento %	Custo (R\$)
Brasília	11,809.20	12,296.84	4%	R\$9,752.97
São Paulo	14,319.71	14,973.99	4%	R\$13,085.49
Curitiba	14,705.07	15,231.49	3%	R\$10,528.35
Rio de Janeiro	17,641.33	18,080.25	2%	R\$8,778.49
Recife	11,215.93	11,309.22	1%	R\$1,865.66

Fonte: Elaborado pelo autor

Pela análise dos dados apresentados na tabela acima, conclui-se que o aumento de consumo de água na alternativa 2 é pequeno, e tem o custo operacional inferior à redução de energia. Desta forma, considerando o aumento do consumo hídrico e a redução de energia, estima-se uma economia operacional de até R\$ 86 mil reais/ano para a operação em Brasília, validando a alternativa com alta demanda da torre.

5.0 CONCLUSÕES

A partir dos dados e estudos apresentados, conclui-se que, a operação da CAG se manteve otimizada seguindo o modelo de menor temperatura de condensação. Isso se deve, pela redução no lift de compressão apresentado nos chillers, e conseqüentemente, na economia de energia da principal fonte consumidora em sistemas de expansão indireta.

Por fim, demonstrou-se a partir de simulações térmicas que o aumento de demanda da torre de condensação em detrimento do chiller, garante uma operação otimizada, atingindo a redução do consumo elétrico, superior ao aumento da demanda hídrica. Vale salientar que, como esperado, os resultados das simulações variaram de acordo com as condições psicrométricas de cada capital, mas em todas elas o custo operacional teve um saldo positivo seguindo a alternativa de alta demanda da torre. Porém, entende-se que o modo de controle apenas pelo set-point de temperatura é simples, e não leva em conta as condições climáticas locais instantâneas ao

longo da operação. Desta forma, uma automação que pudesse alterar o modo de controle da CAG a partir das condições climáticas locais, e da demanda térmica instantânea, possivelmente garantiria uma maior eficiência operacional.

AGRADECIMENTOS

REFERÊNCIAS

AHRI Standart 551/591, 2015. Performance rating of water- chilling packages using the vapor compression cycle.

ASHRAE, 2012. HVAC systems Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., SI Edition, Chapter 40 Cooling Towers.

ASHRAE, 2013. Standard 90.1. ANSI/ASHRAE/IESNA. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, 2013.

EIA. 2016. Electrical Power Annual 2016, table 3.1.A "Net Generation by Energy Source: Total (All Sectors), 2006-2016"

Furlong, W, J. Morrison, T, F. 2005. "Optimization of Water – Cooler Chiller – Cooling Tower Combinations", Cooling tower Institute Journal, Vol 26 (1).

Gomes, C. C. G. Torres de resfriamento de água. In: REVISTA OFICINA DO FRIO n°25, 1997, São Paulo.

Kirsner, C. E. 2002. "2 GPM/Ton Condenser Water Flow Rate – Does It Save Energy?", February 6, 2002.

Quereshi, B.A. and S.M.Zubair. 2007. Prediction of evaporation losses in evaporative fluid coolers, Applied Thermal Engineering 27 pp. 520-527. 2007.

Poole, J. Lessans, M. 2019. "A Balanced System Approach to the Water-Energy Nexus" ASHRAE Journal 61(1).