

AValiação DO USO DE RESfriamento EVAPORATIVO INDIRETO EM SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO DE EDIFICAÇÕES COMERCIAIS

Alexandre Issao Une Bastos

issao.une@gmail.com

Resumo. Os processos convencionais de climatização ainda são largamente empregados no mundo, no entanto, questões econômicas e a maior preocupação com o meio ambiente estão exigindo processos mais eficientes. O resfriamento evaporativo indireto (REI) é um processo que consome menos energia que outros processos e possibilita climatizar o ambiente. O REI utiliza duas correntes de ar que passam pelo trocador de calor, em que o ar secundário umidificado resfria as paredes do trocador, que resfriam o ar principal. Este trabalho tem como objetivo analisar o impacto no consumo energético de uma edificação comercial climatizada, utilizando o sistema REI anterior a um sistema de resfriamento convencional. Utilizando o Energy Plus como ferramenta de simulação, serão analisados os dois sistemas (convencional e convencional com sistema de REI) para cinco cidades brasileiras e será feito um estudo de viabilidade econômica para a nova configuração. Resultados indicaram reduções de até 3,7% no consumo total do edifício para a cidade de São Paulo, e reduções semelhantes para outras cidades. No entanto, o consumo adicional de água do REI inviabiliza o seu uso para as cidades analisadas.

Palavras chave: Refrigeração, Consumo de energia elétrica, Edifícios climatizados

1. Introdução

A climatização dos ambientes permitiu que houvesse maior conforto térmico em locais antes considerados demasiados quente, frio, úmido ou seco. Em indústrias, casas ou escritórios, as condições de temperatura e umidade são alteradas para que a pessoa presente no ambiente não se sinta desconfortável ao gastar energia para se adaptar, podendo se concentrar em suas atividades principais.

Para condicionar o ambiente, é necessário um gasto de energia, que aumenta conforme a condição desejada se distancia da condição natural. Esse consumo energético pode variar, já que as condições do ambiente mudam no decorrer do dia e também no decorrer do ano.

O Brasil, pela sua grande extensão territorial, possui cidades com condições climáticas variadas, e o mesmo sistema de climatização pode gastar mais ou menos energia dependendo da localização da cidade.

O resfriamento evaporativo é um processo que possui ótima eficiência energética em regiões quentes e áridas, porém essa eficiência se reduz em regiões mais úmidas. O resfriamento evaporativo indireto permitiu que padrões de eficiência aceitáveis fossem atingidos mesmo nessas regiões, utilizando-o em ciclos regenerativos ou como uma unidade de pré-resfriamento em sistemas convencionais de climatização.

Swadispan et al (2008) observaram o aumento no desempenho de um ar condicionado de janela ao borrifar água no ar externo, antes que este passasse pelo condensador. O ar mais úmido e de menor temperatura aumenta a troca de calor com o fluido refrigerante, portanto possibilita absorver mais calor no evaporador, aumentando o COP e a eficiência do ar condicionado.

Heidarinejad (2009) realizou experiências utilizando uma combinação dos sistemas evaporativos direto e indireto mostraram uma redução de até 60% de redução no consumo energético para diversos climas no Irã.

Delfani et al (2010) realizaram experimentos utilizando o uma unidade de resfriamento evaporativo indireto anterior a uma unidade de resfriamento mecânico. Ao realizar testes simulando condições para diferentes cidades do Irã, verificaram uma redução de 55% no consumo de energia elétrica do sistema convencional.

No Brasil não há registro de utilização do resfriamento indireto como unidade de pré-resfriamento. O uso desta técnica será simulado utilizando-se dados climáticos de algumas cidades brasileiras de climas variados, avaliando a sua eficiência em cada cidade. Em seguida será feita uma comparação dos gastos energéticos com e sem o sistema indireto, terminando numa análise econômica de viabilidade e retorno financeiro.

O objetivo deste trabalho é analisar o impacto no consumo energético de uma edificação climatizada utilizando-se um sistema evaporativo indireto em conjunto com um sistema de resfriamento convencional.

A análise será feita simulando os dois sistemas (convencional e convencional com sistema de resfriamento evaporativo indireto) para diversas cidades brasileiras, no período de um ano, já que as condições climáticas locais podem influenciar significativamente os sistemas de refrigeração.

Pretende-se também estudar a viabilidade econômica do sistema evaporativo indireto, mudando o seu ciclo de uso durante o dia e durante as estações do ano.

2. Resfriamento evaporativo

O resfriamento evaporativo faz uso dos fenômenos que ocorrem quando água e ar úmido insaturado entram em contato. Calor é transferido do fluido de maior temperatura para o de menor temperatura, e vapor d'água vai da região de maior pressão de vapor para a região de menor pressão.

O processo de resfriamento só é possível graças à interação que há entre a transferência de calor e a transferência de massa. A água absorve calor do ar na evaporação e calor é retirado do vapor d'água na condensação. O contato livre e

prolongado entre a água e o ar resulta num estado de equilíbrio em que normalmente o ar estará saturado. Quanto maior a temperatura do ar, maior é a quantidade de vapor d'água no ar necessária para saturá-lo.

2.1. Resfriamento evaporativo direto

O processo de resfriamento evaporativo direto ocorre quando água líquida entra em contato com o ar de alimentação a ser inserida no ambiente a ser climatizado. O calor sensível presente no ar de alimentação evapora a água líquida, e como resultado tem-se a redução da temperatura do ar e aumento da sua umidade. O processo de evaporação continua até que o ar esteja saturado e a mistura ar vapor entre em equilíbrio.

Um resfriamento evaporativo ideal é adiabático, ou seja, nenhum calor entra ou sai do sistema, e ocorre somente quando a água de resfriamento está na temperatura de bulbo úmido (TBU) do ar.

O processo real diferencia-se do ideal, em muitos casos, pois a água de resfriamento introduz uma parcela de calor sensível ao sistema. Ou seja, o processo não é adiabático, e o ar não é resfriado a uma entalpia e TBU constantes. O caso em que a temperatura da água está entre a TBU e TBS do ar de entrada é apresentado na Fig (1).

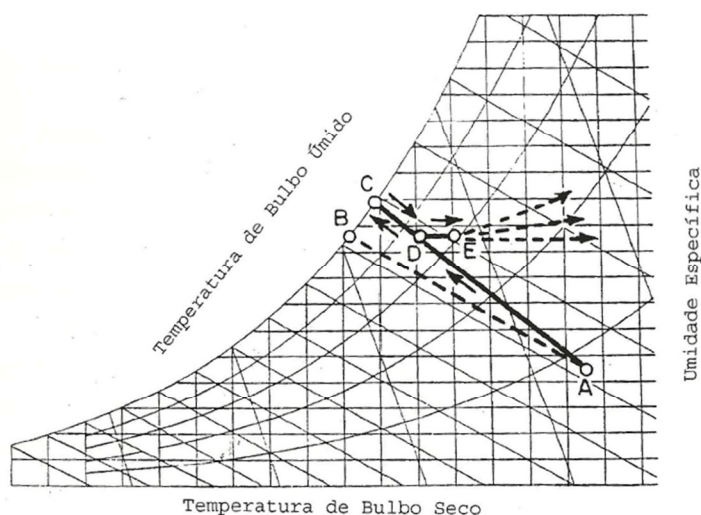


Figura 1. Carta psicrométrica representando o resfriamento evaporativo real (Adaptado de Watt&Brown,1997).

Calor pode ser transferido no sistema por outras fontes, como por exemplo, radiação solar incidindo do resfriador. O ponto A representa o ar externo entrando no resfriador. O ponto B é a TBU do ar externo. A linha AB corresponde ao processo de saturação adiabática. A linha BC representa o calor ganho pelo ar ao resfriar a água até a temperatura de saturação ou calor ganho por outras fontes. Grande parte do ar é umidificado e resfriado a uma entalpia crescente até o ponto C, mas uma fração acaba permanecendo no estado A. As duas frações se misturam atingido o estado D, e posteriormente prosseguem para ventilador e dutos, absorvendo calor, e entram no estado E para resfriar o ambiente.

O modelo evaporativo direto possui limitações, pois a quantidade de calor sensível removido não pode ser maior que o calor latente necessário para saturar o ar com vapor d'água. Outro fator limitante decorre do seu próprio processo: uma vez que utiliza o ar externo diretamente para a climatização, este modelo evaporativo é mais sensível às condições externas, sendo mais eficiente em locais de maior temperatura e menor umidade. Ao utilizar este processo, é preciso ser cauteloso para não elevar em excesso a umidade do ambiente, o que pode levar a um desconforto maior em alguns casos.

2.2. Resfriamento evaporativo indireto (REI)

O resfriamento evaporativo indireto envolve duas correntes de ar que passam pelo trocador de calor simultaneamente, mas sem entrar em contato um com o outro. A Fig. (2) ilustra a diferença entre o resfriamento evaporativo direto e indireto. No evaporativo indireto, o ar de principal e o ar secundário entram nas mesmas condições, porém seguem caminhos diferentes. O ar principal é resfriado e entra nos ambientes que necessitam de climatização. Este ar principal pode ser o ar de retorno do ambiente interno, ou se misturar com uma parcela do ar externo e ser resfriado logo em seguida.

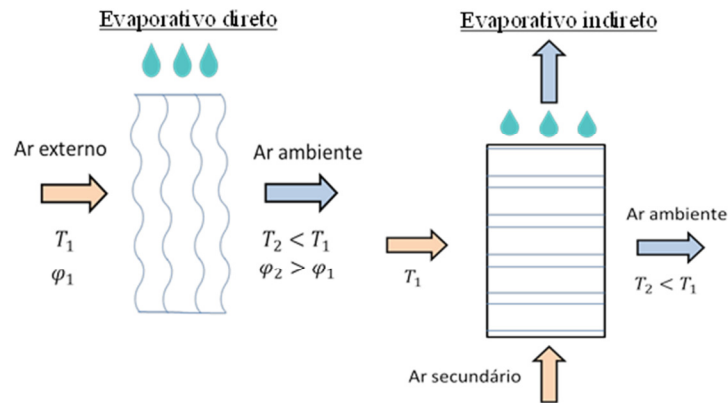


Figura. 2. Sistemas de resfriamento evaporativo.

O ar secundário é o ar que entra em contato com a água e que ajuda na evaporação, resfriando as superfícies do trocador de calor, que efetivamente resfriam o ar primário. O ar secundário normalmente é proveniente do ambiente externo ao edifício e é descartado após o seu uso, como pode ser observado na Fig (2), em que este ar entra na parte inferior, e após trocar calor com a superfície externa do tubo, ele é descartado na parte superior através do uso de um ventilador secundário.

Os elementos de maior importância dos sistemas evaporativos indiretos são as superfícies do trocador de calor que separam o ar de alimentação do ar secundário e da água em que este último ar está evaporando. As superfícies absorvem calor do ar de alimentação e transferem para o ar secundário úmido, que é descartado. As superfícies podem ser placas ou tubos, de metal ou de plástico, ou outras configurações. São exigidos das superfícies uma boa condutividade térmica, separação das duas correntes de ar e resistência à corrosão.

3. Simulação

3.1. Modelo do sistema

As simulações deste trabalho têm como objetivo identificar a possível diferença no consumo de energia e em outros aspectos, comparando os resultados obtidos com e sem a utilização do equipamento de resfriamento indireto. Um esquema da configuração do sistema de climatização utilizando o resfriamento evaporativo indireto é apresentado na Fig (3). Na configuração sem o equipamento evaporativo, o ar proveniente do misturador é encaminhado diretamente para a serpentina de resfriamento. Espera-se que ao fornecer um ar a uma temperatura mais baixa na serpentina de resfriamento utilizando a configuração da Fig. (3) haja uma diminuição no gasto de energia para a climatização.

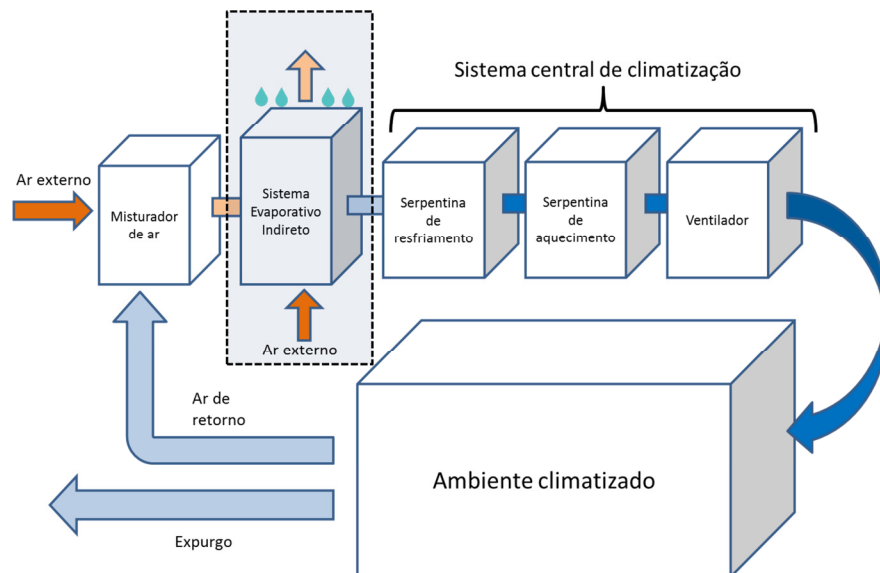


Figura 3. Configuração proposta com o uso do sistema de resfriamento evaporativo indireto

No banco de dados da ferramenta de simulação Energy Plus (2010) há diversos dados de equipamentos AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado), assim como rotinas de uso e arquivos de exemplo. Tanto os equipamentos quanto os arquivos de exemplo podem ser modificados conforme a necessidade. O modelo do sistema a servir de base para análise e simulação é o Modelo Especial de Pesquisa de Resfriamento Evaporativo Indireto. Para cada zona há um conjunto de equipamentos e nós apresentados na Fig (4).

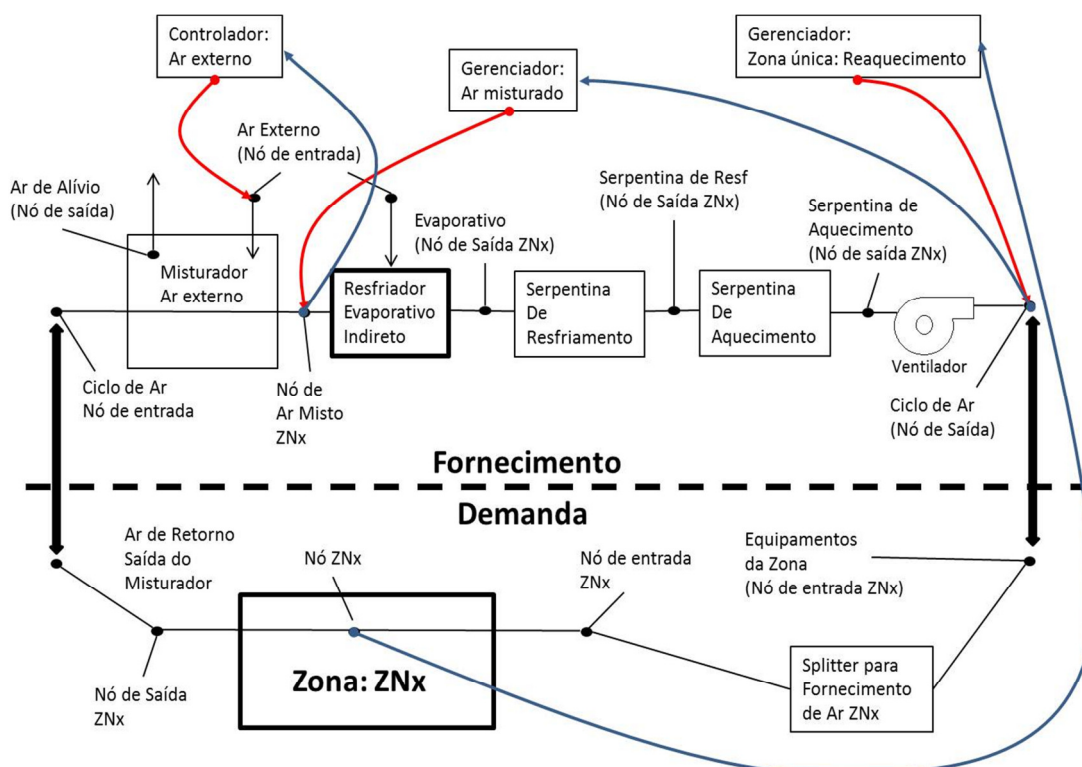


Figura 4. Modelo Especial de Pesquisa de Resfriamento Evaporativo Indireto (Adaptado de U S Department of Energy, 2010)

O modelo da Fig (4) foi escolhido por ser o mais adequado ao uso do sistema evaporativo indireto proposto. Nele é possível especificar a fonte de ar secundária, que resfria o ar primário sem aumentar a sua umidade. A efetividade relacionada à depressão da temperatura de bulbo úmido (TBU) pode vir a ser maior que 1.0.

Durante a simulação, é possível controlar a carga de resfriamento baseando-se nas descrições dos nós entre os equipamentos. Desta forma evita-se que o ar seja resfriado em excesso, quando as condições são tais que a carga para resfriar é pequena e a potência de resfriamento é alta.

No modelo da Fig (4), um nó de ar é associado a cada entrada e saída de equipamento. Percebe-se que frequentemente o nó de saída de um equipamento é a entrada para outro, assim como é o fluxo de ar nos equipamentos reais. Há uma divisão entre o lado da demanda e o lado de suprimento para melhor entendimento.

Do lado da demanda estão as zonas a serem climatizadas. O ar de alimentação de cada zona é proveniente do separador de ar, e o ar de saída delas corresponderá ao ar de entrada para o misturador de ar do lado de suprimento. Do lado do suprimento tem-se o misturador de ar, o refrigerador evaporativo indireto, a serpentina de refrigeração, a serpentina de aquecimento e o ventilador de suprimento.

O misturador de ar tem como entrada os nós do ar de retorno da zona climatizada e o ar externo, e tem como saída os nós do ar de alívio e do ar misturado. Este último é analisado pelo controlador de ar, que determinará a quantidade de ar a ser introduzida no misturador. O ar misturado entra como ar principal de alimentação no resfriador evaporativo indireto, e o ar secundário que o resfriará corresponde ao ar externo. O ar resfriado passa pela serpentina de resfriamento, serpentina de aquecimento e pelo ventilador, para finalmente ser separado e enviado para a zona a ser climatizada.

3.2. Modelo da edificação

O modelo da Fig (4) da sessão 3.1 faz a simulação para um edifício comercial de dois andares. Fez-se uma modificação no edifício utilizando-se uma ferramenta gráfica para incluir um andar intermediário, e o resultado é apresentado na Fig (5). A modificação teve como objetivo possibilitar a simulação de um prédio comercial de vinte andares. Para tanto, considerou-se três andares distintos. Um dos andares corresponde ao térreo, em que o piso está em contato com o solo, o outro andar diferenciado corresponde ao teto, em que não há contato com um andar superior, e ao andar intermediário foi aplicado um fator multiplicativo de 18, já que a sua configuração (entre um andar superior e um inferior) é o mesmo para todos os andares intermediários, resultando num edifício de 20 andares para simulação.

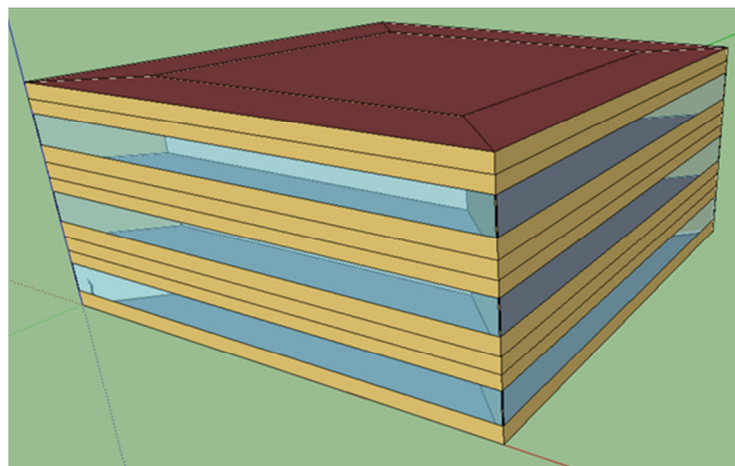


Figura 5. Edificação para simulação

O edifício da Fig. (5) possui 37171m^2 de área total, com cinco zonas climatizadas (uma zona central cercada por outras quatro) por andar, com zonas de retorno de ar associadas a cada zona climatizada. As janelas ocupam um total de 40% das paredes e situam-se a um metro do piso. As propriedades de isolamento do teto, paredes e das janelas obedecem a ASHRAE 90.1-2007 (ASHRAE, 2007).

Os sistemas de AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) são unidades *roof top*, e há uma para cada zona ocupada. Cada unidade é composta por um sistema de resfriamento evaporativo indireto localizado antes da serpentina de resfriamento, serpentina de aquecimento do gás, e misturadores do ar externo. O sistema evaporativo é controlado para evitar excesso de resfriamento.

Utilizando-se os valores recomendados pela ABNT (2008), considerou-se uma carga média para a densidade de equipamentos do escritório num valor de $10,7\text{W/m}^2$ e foi adotado o valor de $11,2\text{m}^2$ para cada posto de trabalho. A densidade da potência luminosa, adotada foi a recomendada pela norma ASHRAE 90.1 (2007), de 11W/m^2 . Além disso, foram utilizados cronogramas de ocupação e iluminação do edifício, sugeridos pela norma 90.1 (ASHRAE, 2007), o que representa uma variação da quantidade de pessoas e da iluminação conforme o horário do dia. A adoção dos perfis tem por objetivo representar o comportamento médio destas cargas ao longo de um dia típico de operação da edificação. Estas cargas (iluminação, pessoas e equipamentos) representam uma parcela significativa do consumo de energia de um edifício comercial.

4. Resultados e análise para cidade de São Paulo

As simulações foram realizadas com a ferramenta Energy Plus baseando-se em dados climáticos da cidade de São Paulo, para o período de um ano.

As cargas térmicas introduzidas pela ocupação do edifício, equipamentos internos, luminosidade e variação da condição climática do lado externo do edifício causam mudanças no ambiente a ser climatizado. A Fig. (6) apresenta a variação da temperatura num dia típico para cada uma das zonas de um andar intermediário, utilizando o sistema evaporativo indireto.

Durante a madrugada há uma queda na temperatura das zonas externas, pois estas acompanham a diminuição da temperatura do ambiente externo ao edifício. Pelo fato do centro do edifício não estar em contato com o exterior e possuir um volume maior de ar, isto resulta numa maior inércia, demandando mais tempo para sua temperatura diminuir. No final da madrugada, o Sol começa a nascer, aumentando a radiação solar e a temperatura externa, promovendo um aumento na temperatura das zonas ao redor do centro do edifício.

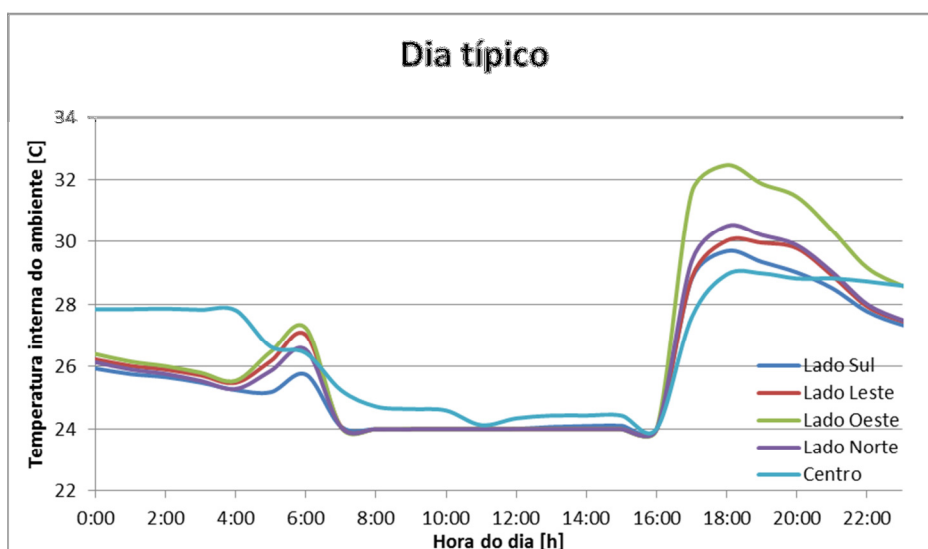


Figura 6. Variação da temperatura em cada zona de um andar intermediário em um dia típico

O aumento da temperatura nos primeiros instantes do dia é interrompido quando o sistema evaporativo indireto entra em funcionamento em conjunto com a serpentina de resfriamento, e a temperatura mantém-se estável a 24°C (temperatura alvo) até às 16:00 em todas as zonas, mostrando que a configuração proposta é capaz de atender à demanda de climatização das zonas de ocupação. Demanda-se mais tempo para a zona central atingir a temperatura alvo, pois o volume desta zona é maior que as outras (aproximadamente 4 vezes maior).

Percebe-se na Fig. (6) um aumento da temperatura antes do desligamento do sistema evaporativo e da serpentina de resfriamento que acontecem às 18:00. Uma possível explicação para este desligamento é a operação do sistema numa faixa de temperatura admissível. Porém não foi possível encontrar uma explicação real para este desligamento após verificar todos os dados de entrada no simulador que poderiam interferir neste período de funcionamento.

O lado sul da edificação tem um aumento menor da temperatura porque fica menos exposto à radiação solar. O lado oeste apresenta o maior pico, pois ele ainda é a região de maior exposição solar quando ocorre o desligamento do sistema de resfriamento.

Após o desligamento do sistema de resfriamento evaporativo e da serpentina a temperatura das zonas continua aumentando, até que o Sol se ponha e a temperatura começa a diminuir, juntamente com a temperatura do ambiente externo.

Na Fig. (7) são comparados os consumos elétricos da serpentina de resfriamento de uma zona climatizada no período de uma semana para o sistema com Resfriamento Evaporativo Indireto (REI) e sem REI.

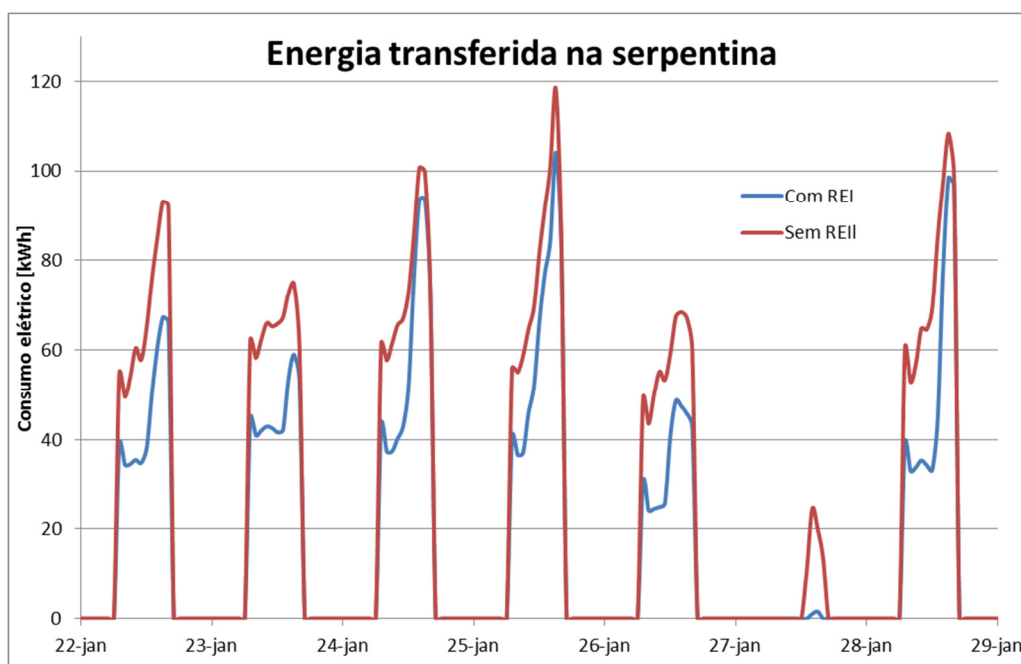


Figura 7. Comparação da energia transferida na serpentina de resfriamento para uma semana típica em São Paulo

Observa-se uma redução do consumo elétrico quando o sistema de resfriamento evaporativo indireto é utilizado para pré-resfriar o ar que troca calor com a serpentina. Utilizando-se um ar mais frio, o fluido refrigerante pode chegar com uma temperatura mais baixa para trocar a mesma quantidade de calor, e o sistema trabalhando em carga parcial consome menos energia.

O mesmo comportamento pode ser observado nas serpentinas de outras zonas, o que resulta numa diminuição do consumo elétrico do edifício, apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Consumo da edificação anual em São Paulo

	Sem REI	Com REI	Comparação
Resfriamento (kWh)	645.783	549.342	-14,9%
Total elétrico (kWh)	2.609.610	2.513.079	-3,7%

5. Simulação e análise para outras cidades brasileiras

A mesma simulação feita para a cidade de São Paulo foi realizada nas cidades de Brasília, Belém e Florianópolis. Estas cidades foram escolhidas por terem certa importância econômica e política, por apresentarem dados climáticos mais detalhados que cidades menores, mas acima de tudo por se situarem em locais geograficamente distintos e possuírem climas diferenciados, enriquecendo a análise do desempenho do sistema evaporativo sobre diferentes condições externas.

A Fig.(8) apresenta as variações da temperatura de bulbo seco para as quatro cidades em um ano.

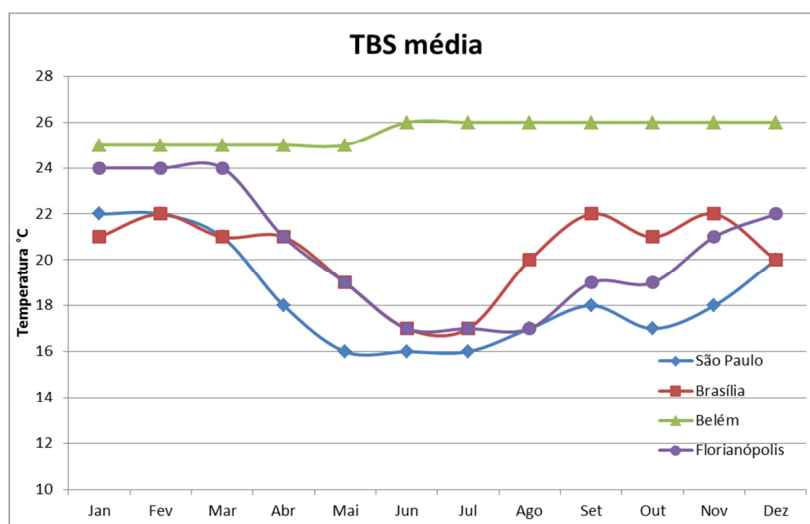


Figura 8. Temperatura de bulbo seco média das cidades

A cidade de Brasília possui temperaturas elevadas em média e que diminuem na época de inverno entre os meses de maio e agosto. A cidade apresenta a menor umidade relativa dentre as cidades na maioria dos meses e atinge o menor valor na época de inverno, em agosto. Isso se deve ao fato da cidade estar muito mais afastada do litoral que as outras cidades, e não apresentar florestas para reter umidade. A cidade de Brasília possui um clima mais árido, porém com temperaturas relativamente elevadas se comparadas com as demais cidades.

A cidade de Belém apresenta maiores temperaturas ao longo do ano com oscilações menores que as demais cidades analisadas, que normalmente apresentam uma queda de temperatura na época de inverno. Sua umidade relativa também não apresenta grandes variações de um mês para outro, diminuindo o seu valor no inverno e aumentando após esse período.

De acordo com a Fig. (8), a cidade de Florianópolis apresenta oscilações de temperatura ao longo do ano semelhantes às apresentadas na cidade de São Paulo, porém com uma amplitude maior. Possui alta umidade relativa, que varia pouco no ano, e permanece na faixa entre 80 e 90%. A cidade de Florianópolis tem suas temperaturas variando de acordo com a época do ano, sendo mais altas no verão e mais baixas no inverno. Porém permanece com a umidade alta.

A cidade de São Paulo possui as menores temperaturas de bulbo seco dentre as cidades em análise. Sua umidade relativa mantém-se razoavelmente constante durante o ano, apresentando uma queda na época de inverno, tornando-se bastante seca. A cidade quando comparada às outras, possui um clima mais frio e ameno, de umidade constante exceto no inverno quando apresenta uma queda significativa.

A Fig. (9) apresenta o consumo de energia elétrica do sistema de resfriamento para as quatro cidades.

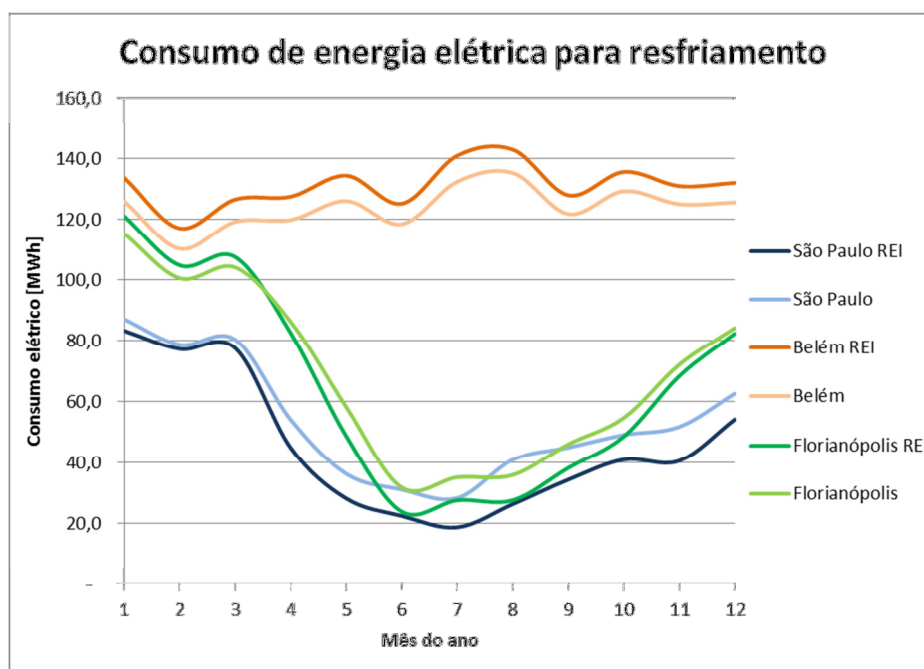


Figura 9. Consumo de energia elétrica mensal do sistema de resfriamento para as três cidades.

Na Fig. (9), os itens que apresentam somente o nome da cidade correspondem aos casos em que não há uso do sistema evaporativo para climatização. A curva para a cidade de Brasília não foi inserida na Fig. (9) por ser semelhante à curva da cidade de São Paulo.

Percebe-se pela Fig.(9) que na cidade de Belém, o edifício consumiu maior energia ao utilizar o sistema evaporativo. Para Brasília e Florianópolis, o mesmo efeito pôde ser observado em janeiro e fevereiro. Já na cidade de São Paulo, o consumo elétrico de resfriamento foi menor em todos os meses ao utilizar o REI. Os valores totais de consumo elétrico do ano são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Consumo elétrico do edifício para as quatro cidades em um ano.

	Resfriamento [MWh]			Consumo total [MWh]		
	com REI	sem REI	redução ou aumento	com REI	sem REI	redução ou aumento
São Paulo	549	646	-14,9%	2.513	2.610	-3,7%
Belém	1.575	1.490	5,7%	3.524	3.440	2,5%
Brasília	737	792	-7,0%	2.675	2.730	-2,0%
Florianópolis	782	825	-5,2%	2.727	2.771	-1,6%

Os resultados da simulação para a cidade de Belém foram analisados mais cuidadosamente, já que seus resultados se destacaram das demais cidades.

Primeiramente, verificou-se o funcionamento do sistema evaporativo na cidade de Belém, pois devido às condições de maior temperatura e umidade da cidade, o REI poderia estar aumentando a entalpia do ar principal ao invés de diminuí-la, aumentando o consumo da serpentina de resfriamento. No entanto, constatou-se pelos dados fornecidos pelo simulador que a entalpia do ar principal após passar pelo REI era menor que no momento de entrada na maioria dos casos.

Em seguida foram comparados os consumos de energia das serpentinas de cada zona de climatização. Verificou-se que o consumo energético das serpentinas era menor quando se utiliza o REI, o que era esperado já que a serpentina recebia o ar com uma entalpia menor.

Como a única diferença entre os dois casos analisados, com REI e sem REI, é o próprio sistema evaporativo, constatou-se que a utilização do REI implica num consumo adicional de energia no edifício devido às suas bombas de recirculação. Sendo assim, para obter uma redução do consumo de energia de resfriamento, é necessário que a redução do consumo das serpentinas devido ao REI seja maior que o consumo elétrico das bombas de recirculação, o que não ocorreu para nenhum mês na cidade de Belém.

6. Análise econômica

A análise econômica será feita para verificar a viabilidade do sistema evaporativo indireto, e o tempo necessário para que um investimento neste sistema possa ser quitado pela economia de capital que este proporciona ao reduzir o consumo de energia elétrica para o resfriamento do edifício.

Para tanto, foram pesquisadas as tarifas de energia das concessionárias de energia de cada cidade analisada, exceto para a cidade de Belém, já que as simulações mostraram que o sistema evaporativo introduziu um consumo elétrico no sistema superior à redução do consumo nas serpentinas de resfriamento, conforme mostram as análises do item 5.

Foi considerada a tarifa horo-sazonal Azul para os edifícios comerciais, e os valores das tarifas para cada cidade foram inseridos na ferramenta de simulação e este foi configurado para que fornecesse os gastos mensais de energia elétrica do edifício. Os valores dos gastos mensais para as três cidades são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Gastos mensais com energia elétrica do edifício.

	São Paulo				Brasília		Florianópolis	
	com REI	sem REI	Diferença	Redução ou Aumento	Diferença	Redução ou Aumento	Diferença	Redução ou Aumento
Jan	R\$ 72.434,21	R\$ 72.420,46	-R\$ 13,75	0,02%	R\$ -	0,00%	R\$ -	0,00%
Fev	R\$ 69.217,69	R\$ 68.431,40	-R\$ 786,29	1,15%	R\$ -	0,00%	R\$ -	0,00%
Mar	R\$ 67.615,63	R\$ 67.305,23	-R\$ 310,40	0,46%	-R\$ 83,92	0,14%	R\$ -	0,00%
Abr	R\$ 57.782,78	R\$ 59.401,51	R\$ 1.618,73	-2,73%	R\$ 176,14	-0,29%	-R\$ 208,85	0,28%
Mai	R\$ 57.151,67	R\$ 58.522,15	R\$ 1.370,48	-2,34%	R\$ 1.284,13	-2,04%	R\$ 1.717,35	-2,43%
Jun	R\$ 51.957,76	R\$ 53.698,19	R\$ 1.740,43	-3,24%	R\$ 1.858,79	-3,36%	R\$ 677,99	-1,15%
Jul	R\$ 51.757,68	R\$ 55.243,71	R\$ 3.486,03	-6,31%	R\$ 2.965,15	-5,03%	R\$ 1.049,92	-1,62%
Ago	R\$ 54.533,99	R\$ 58.442,26	R\$ 3.908,27	-6,69%	R\$ 2.611,67	-4,13%	R\$ 1.560,53	-2,46%
Set	R\$ 59.076,98	R\$ 61.783,36	R\$ 2.706,38	-4,38%	R\$ 2.104,96	-3,20%	R\$ 1.338,29	-2,09%
Out	R\$ 63.392,35	R\$ 64.820,49	R\$ 1.428,14	-2,20%	R\$ 514,42	-0,75%	R\$ 372,38	-0,52%
Nov	R\$ 60.088,08	R\$ 62.026,78	R\$ 1.938,70	-3,13%	R\$ 958,07	-1,43%	-R\$ 849,95	1,10%
Dez	R\$ 64.939,45	R\$ 66.009,04	R\$ 1.069,59	-1,62%	-R\$ 92,96	0,15%	-R\$ 1.125,54	1,45%
Total	R\$ 729.948,27	R\$ 748.104,58	R\$ 18.156,31	-2,43%	R\$ 12.296,45	-1,63%	R\$ 4.532,12	-0,52%

Para realizar a análise econômica, foi considerado que o sistema evaporativo foi desligado nos meses em que ele apresentou um aumento no consumo energético, nos casos das cidades de Brasília e Florianópolis, nos primeiros meses do ano. Caso contrário, os gastos utilizando o REI na cidade de Florianópolis seriam maiores do que o edifício sem a sua utilização. As células que estão em vermelho na Tabela 3 representam os meses em que houve uma diminuição do consumo energético do edifício, mas que resultou num custo financeiro maior. Fazendo uma análise mais detalhada desses meses, percebeu-se que o custo devido à demanda havia aumentado, resultando num custo financeiro maior.

O sistema evaporativo indireto necessita de água no ar secundário para que este possa retirar calor do ar primário. Esta água representa um custo adicional para o edifício comercial. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos até o momento, incluindo os gastos adicionais com água.

Tabela 4. Gastos mensais com energia elétrica do edifício.

	São Paulo		Brasília		Florianópolis	
	Com REI	Sem REI	Com REI	Sem REI	Com REI	Sem REI
Consumo resfriamento [MWh]	549	646	737	792	782	825
Redução	-14,9%		-7,0%		-5,2%	
Consumo elétrico total [MWh]	2513	2610	2675	2730	2727	2771
Redução	-3,7%		-2,0%		-1,6%	
Gasto com energia elétrica	R\$ 729.948,27	R\$ 748.104,58	R\$ 740.539,09	R\$ 752.835,54	R\$ 868.632,92	R\$ 873.165,04
Economia elétrica	-R\$ 18.156,31		-R\$ 12.296,45		-R\$ 4.532,12	
Redução	-2,4%		-1,6%		-0,5%	
Consumo água (m³)	1.067		1.166		780	
Gasto com água	R\$ 19.953,65	0	R\$ 16.610,39	0	R\$ 12.402,72	0
Economia anual total	R\$ 1.797,34		R\$ 4.313,94		R\$ 7.870,60	

Com a análise econômica foi possível perceber que, apesar do sistema evaporativo indireto apresentar uma redução no consumo energético para as cidades de São Paulo, Brasília e Florianópolis, somente as duas primeiras cidades apresentaram uma redução de custo anual, devido às peculiaridades das tarifas praticadas pelas concessionárias de cada cidade.

Outro ponto a ser destacado é o consumo de água adicional que o sistema evaporativo indireto impõe no edifício. Os gastos com fornecimento de água e de esgoto são superiores à economia obtida com a energia elétrica, inviabilizando economicamente a climatização com o REI para as cidades de Brasília e São Paulo.

7. Conclusão

O sistema evaporativo indireto surgiu como uma opção de processo eficiente para reduzir o consumo energético dos sistemas de climatização. Seu funcionamento consiste na utilização de um ar secundário umidificado para resfriar o ar principal.

Analisando as simulações, constatou-se que as condições externas do edifício foram determinantes para a redução do seu consumo energético. Utilizando o REI, o consumo energético da serpentina de resfriamento reduziu-se em todas as cidades. Este consumo apresentou maior redução para a cidade de São Paulo e menor redução para a cidade de Belém. As altas temperaturas e umidade desta última cidade não permitiram uma redução maior do consumo energético. A maior redução no consumo elétrico para as outras três cidades aconteceu nos meses de julho e agosto, época em que as temperaturas e umidades são mais baixas que os outros meses.

Apesar de o sistema evaporativo reduzir o consumo elétrico da serpentina, ele introduz um consumo adicional de eletricidade devido às suas bombas de recirculação, aumentando o consumo energético para resfriamento em alguns meses do ano para as cidades. No caso da cidade de Belém, este consumo das bombas foi superior à redução do consumo obtido para as serpentinas de resfriamento.

A análise de viabilidade econômica permitiu observar o efeito das tarifas no tocante aos custos do edifício mensais com relação à energia elétrica. A tarifação para a cidade de Florianópolis resultou num gasto superior anual com a utilização do REI no edifício, mesmo este apresentando uma redução de 1,6% no consumo de energia elétrica total.

A água utilizada para resfriar o ar secundário representa um custo adicional para o edifício. Este custo é da mesma ordem de grandeza da economia obtida com o uso do REI, e não pode ser desprezada. O sistema evaporativo indireto cumpre o seu objetivo de reduzir o consumo elétrico da serpentina de resfriamento. Porém, a economia obtida no gasto mensal com eletricidade do edifício é compensada pelo gasto adicional de água, inviabilizando a utilização do sistema de resfriamento evaporativo indireto nas cidades de São Paulo, Brasília e Florianópolis.

8. Referências

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16401 -1 Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Rio de Janeiro, 2008. 56p.
- ASHRAE. STANDARD 90.1, 2007. “Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, p15-65.
- Delfani, S. et al., 2010. “Energy Saving Potential of an Indirect Evaporative Cooler as a Pre-cooling Unit for Mechanical Cooling Systems in Iran”, Energy and Buildings, Vol.42, pp. 2169-2176.
- Heidarinejad, G. et al. 2009. “Experimental Investigation of Two-stage Indirect/Direct Evaporative Cooling System in Various Climatic Conditions”. Vol.44, pp2073-2079.
- Swadispan, P. et al. 2008. “Study of Performance Improvement Window Air Conditioning Using Water Spray” International Conference on Energy Security and Climate Change; Issues, Strategies, and Options (ESCC), 5p.
- U.S. Department of Energy. 2010. Energy Plus 6.0, Engineering Reference Manual pp690-694.
- WATT, A.R.; BROWN, W.K. Evaporative Air Conditioning Handbook. Lilburn USA: The Fairmont Press, 1997. v3. pp12-25.

EVALUATION OF USING INDIRECT EVAPORATIVE COOLING WITH CLIMATIZATION SYSTEM OF COMMERCIAL BUILDINGS

Alexandre Issao Une Bastos

issao.une@gmail.com

Abstract. Conventional cooling processes are still largely used all over the world. However, economical issues and concerns regarding the demands more efficient cooling methods. The Indirect Evaporative Cooling is a process which uses two air streams passing by a heating exchanger, where the humidified secondary air cools the tube's exterior, cooling the primary air. This paper analyses the effects on the consuming energy by using an Indirect Evaporative Cooler to precool the primary air that will enter in the HVAC units. Using Energy Plus as a simulation tool, two cases will be analyzed: one using the indirect evaporative system along with the HVAC system and the other one with just the conventional system. Simulations will be run in four different Brazilian cities, and economic feasibility will be studied for the new configuration.

Keywords. Refrigeration, Energy consumption, Conditioned building