

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO USO DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO INDIRETO
EM SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO DE EDIFICAÇÕES COMERCIAIS

Alexandre Issao Une Bastos

São Paulo
2011

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO USO DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO INDIRETO
EM SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO DE EDIFICAÇÕES COMERCIAIS

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Alexandre Issao Une Bastos

Orientador: Alberto
Hernandez Neto

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Bastos, Alexandre Issao Une
Avaliação do uso de resfriamento evaporativo indireto em
sistemas de climatização de edificações comerciais / A I.U.
Bastos. – São Paulo, 2011.
58 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da
Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Refrigeração 2.Consumo de energia elétrica 3.Edifícios
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

DEDICATÓRIA

Às pessoas que incentivaram os meus estudos e me apoiaram, especialmente minha mãe. Entre essas pessoas também estão os meus amigos Diego, Alexandre e Luana, a quem sou grato.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto, pela orientação e ajuda durante o decorrer do projeto.

RESUMO

Os processos convencionais de climatização ainda são largamente empregados no mundo, no entanto, questões econômicas e maior preocupação com o meio ambiente estão exigindo processos mais eficientes. O resfriamento evaporativo indireto (REI) é um processo que 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. Neste trabalho será analisado o impacto no consumo energético de uma edificação comercial climatizada, utilizando o sistema de 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 o sistema de REI) para quatro cidades brasileiras, e será feito um estudo de viabilidade econômica para a nova configuração.

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.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – RED ideal. Adaptado de Watt (1997)	4
Figura 2.2 – RED real. Adaptado de Watt (1997).....	5
Figura 2.3 – Serpentina de resfriamento para REI. Adaptado de Energy Plus 6.0, US Department of Energy (2011).....	6
Figura 2.4 – Sistemas de resfriamento evaporativo	8
Figura 4.1 – Modelo Especial de Pesquisa de Resfriamento Evaporativo Indireto. Adaptado de Energy Plus6.0, US Department of Energy (2010).....	10
Figura 4.2 – Modelo inicial	13
Figura 4.3 – Edificação modelo para simulação	14
Figura 4.4 – Representação de um andar típico com cinzo zonas	14
Figura 5.1 – Variação de temperatura em um dia típico (andar intermediário)	18
Figura 5.2 – Temperaturas das cinco zonas climatizadas (andar térreo).....	20
Figura 5.3 – Temperaturas do lado oeste para os três tipos de andar.....	21
Figura 5.4 – Comparação do consumo elétrico da serpentina de resfriamento	21
Figura 6.1 – Temperatura média das cidades para simulação	24
Figura 6.2 – Umidade relativa média das cidades para simulação.....	24
Figura 6.3 – Radiação Nominal Direta média das cidades para simulação	25
Figura 6.4 – Entalpias de entrada e saída do REI para uma zona em Belém.....	29
Figura 6.5 – Consumo elétrico anual de resfriamento para as quatro cidades.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Cronogramas de ocupação e iluminação (ASHRAE 2007).....	15
Tabela 4.2 – Dados de entrada do Sistema evaporativo indireto.	16
Tabela 5.1 – Consumo da edificação anual	22
Tabela 6.1 – Consumo mensal de Resfriamento da edificação (São Paulo, Belém)	27
Tabela 6.2 – Consumo mensal de Resfriamento da edificação (Brasília, Florianópolis)	27
Tabela 6.3 – Consumo mensal da Serpentina de resfriamento para uma zona (São Paulo, Belém).	30
Tabela 6.4 – Consumo mensal da Serpentina de resfriamento para uma zona (Brasília, Florianópolis)	30
Tabela 6.5 – Comparação do consumo elétrico das serpentinas de resfriamento.....	31
Tabela 6.6 – Consumo elétrico do sistema evaporativo indireto em Janeiro	32
Tabela 6.7 – Consumo elétrico do edifício para as quatro cidades em um ano.	34
Tabela 7.1 – Tarifa horo-sazonal Azul para as quatro cidades da simulação.	35
Tabela 7.2 – Valores mensais do custo da eletricidade para a edificação em São Paulo.	36
Tabela 7.3 – Diferença dos gastos com eletricidade entre edifício com REI e sem REI para Brasília e Florianópolis.....	37
Tabela 7.4 – Projeção da diferença dos gastos desligando o REI nos meses que apresenta menor eficiência.	38
Tabela 7.5 – Custo anual da água para retirar calor do ar primário para edifício com REI.	39
Tabela 7.6 – Reduções obtidas com o uso do REI e a economia anual total para as três cidades.	39
Tabela A.1 – Gastos mensais com eletricidade para a cidade de São Paulo com a tarifa horo-sazonal Azul.	46
Tabela A.2 – Gastos mensais com eletricidade para a cidade de Brasília com a tarifa horo-sazonal Azul.	47
Tabela A.3 – Gastos mensais com eletricidade para a cidade de Florianópolis com a tarifa horo-sazonal Azul.	47

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

Abreviações

<i>RED</i>	Resfriamento Evaporativo Direto
<i>REI</i>	Resfriamento Evaporativo Indireto
<i>TBU</i>	Temperatura de Bulbo Úmido
<i>TBS</i>	Temperatura de Bulbo Seco
<i>AVAC</i>	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>)
<i>FPC</i>	Fator Parcial de Carga

Símbolos

Unidade

Q_{req}	Transferência de calor requerida	kW
Q_{total}	Transferência de calor máxima	kW
\dot{m}	Vazão mássica	kg/s
$h_{sai,sist}$	Entalpia do ar principal saindo do resfriador evaporativo indireto	kJ/kg
$h_{ent,sist}$	Entalpia do ar principal entrando no resfriador evaporativo indireto	kJ/kg
$h_{sai,desejado}$	Entalpia de saída desejada do ar principal do resfriador evaporativo indireto	kJ/kg
ε	Eficiência do sistema evaporativo indireto	
β	Fator de proximidade do ponto de orvalho	
$TBS_{sai,sist}$	Temperatura de bulbo seco do ar principal saindo do resfriador evaporativo indireto	C
$TBS_{ent,sist}$	Temperatura de bulbo seco do ar principal entrando do resfriador evaporativo indireto	C
$TBU_{ent,purga}$	Temperatura de bulbo úmido do ar secundário entrando no resfriador evaporativo indireto	C
$T_{orv,ent,purga}$	Temperatura de orvalho do ar de expurgo entrando no lado úmido do resfriador evaporativo indireto	C

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO	1
2	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO	3
2.1	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO (RED)	3
2.1.1	Resfriamento evaporativo direto ideal	4
2.1.2	Resfriamento evaporativo direto real.....	5
2.2	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO INDIRETO (REI)	6
3	MÉTODO DE ANÁLISE	9
4	SIMULAÇÃO.....	10
4.1	MODELO DO SISTEMA.....	10
4.1.1	Método de cálculo no resfriador evaporativo indireto	12
4.2	CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO	13
4.3	DADOS DE ENTRADA	16
4.4	DADOS DE SAÍDA.....	17
5	RESULTADOS E ANÁLISE.....	18
6	SIMULAÇÃO E ANÁLISE EM OUTRAS CIDADES	23
6.1	CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DAS CIDADES	23
6.2	ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES EM OUTRAS CIDADES.....	26
7	ANÁLISE ECONÔMICA	35
8	CONCLUSÃO	41
9	REFERÊNCIAS.....	43
10	BIBLIOGRAFIA	44
	APÊNDICE A – CONSUMO ELÉTRICO PELA TARIFA HORO-SAZONAL AZUL	46

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 cidade em que foi instalada.

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, quando utilizado em ciclos regenerativos ou como uma unidade de pré-resfriamento em sistemas convencionais de climatização.

Foi observado 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 troca mais calor com o fluido refrigerante, portanto possibilita absorver mais calor no evaporador, aumentando o COP e a eficiência do ar condicionado (SWADISPAN e outros, 2008).

Experiências realizadas utilizando uma combinação dos sistemas evaporativos direto e indireto mostraram uma redução de até 60% no consumo energético para diversos climas no Irã (HEIDARINEJAD, 2009).

DELFANI e outros (2010) realizaram experimentos utilizando 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 evaporativo 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.

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 sobre quais situações climáticas ou sobre quais rotinas de funcionamento viabilizam economicamente o sistema evaporativo indireto.

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 se desloca 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.

Há dois tipos principais de resfriamento evaporativo: o direto e o indireto.

2.1 RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO (RED)

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.

2.1.1 Resfriamento evaporativo direto ideal

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. A figura 2.1 ilustra a carta psicrométrica do processo.

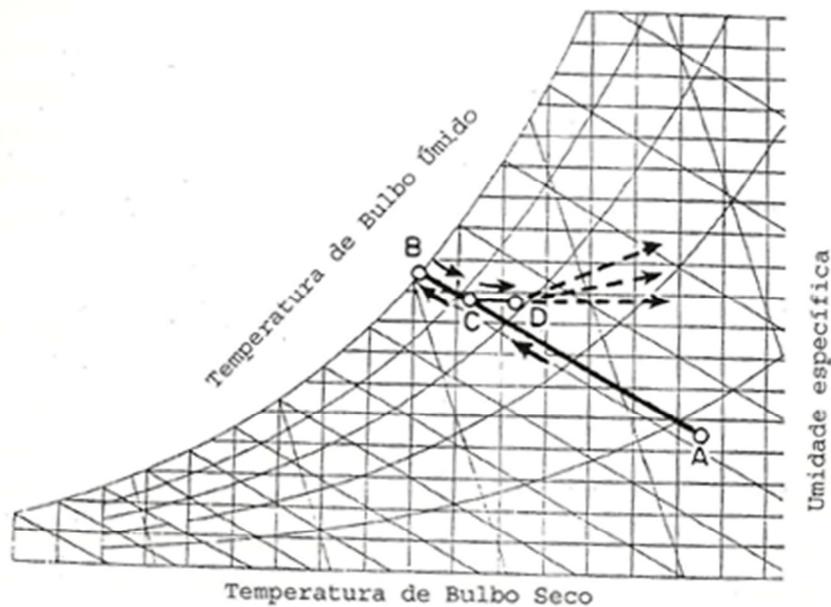


Figura 2.1 – RED ideal. Adaptado de Watt (1997)

O ponto A da figura corresponde ao ar externo entrando no resfriador. O ponto B corresponde à TBU do ar de entrada e a temperatura da água. Grande parte do ar resfria a entalpia constante de A até B, mas uma fração não consegue trocar calor e continua na condição A. As duas frações misturam-se dando origem ao ar na condição C. Este ar recebe calor ao escoar pelos dutos e na passagem pelo ventilador, terminando no estado D. Este é o estado ideal do ar que entraria no ambiente para resfriamento.

2.1.2 Resfriamento evaporativo direto real

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 figura 2.2.

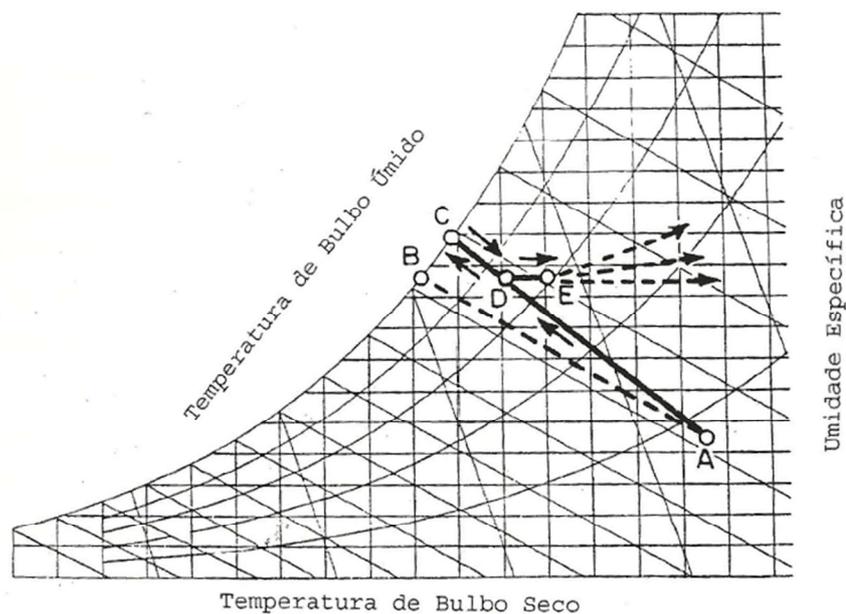


Figura 2.2 – RED real. Adaptado de Watt (1997)

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 basicamente envolve duas correntes de ar, passando pelo trocador de calor simultaneamente, mas sem entrar em contato um com o outro. A figura 2.3 ilustra o trocador de calor responsável pelo mecanismo de resfriamento.

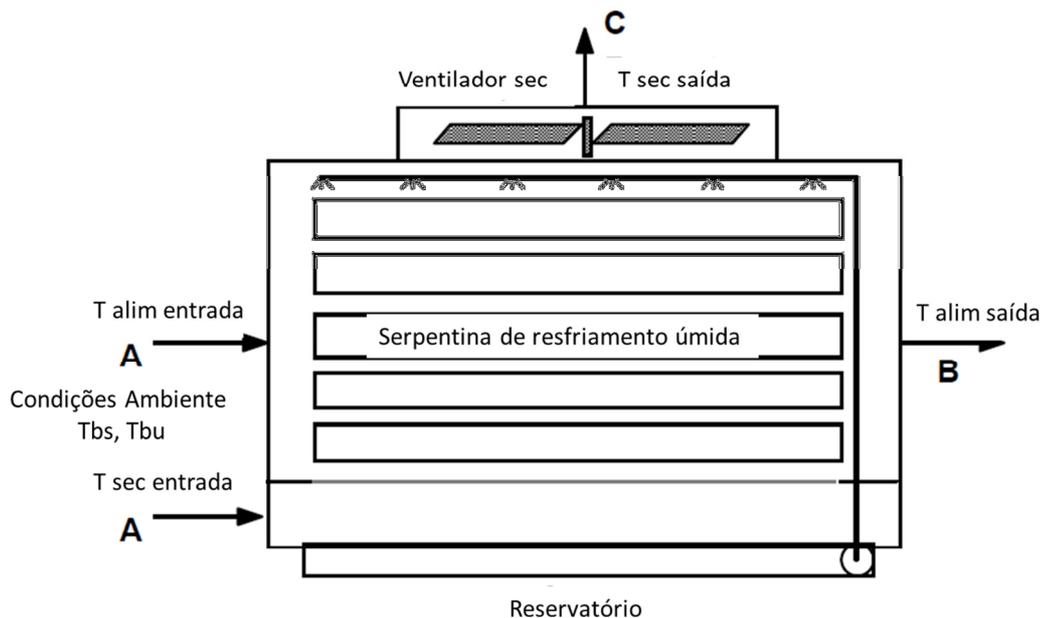


Figura 2.3 – Serpentina de resfriamento para REI. Adaptado de US Department of Energy (2010)

Na figura 2.3, o ar de alimentação e o ar secundário entram nas mesmas condições, porém seguem caminhos diferentes. O ar de alimentação é aquele que está sendo resfriado e vai entrar nos ambientes que necessitam de climatização. Este ar pode ser o ar de retorno do ambiente interno ou vir do ambiente externo.

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 vem do exterior e é descartado após o seu uso, como pode ser observado na figura 2.3, em que este ar entra por A, e após trocar calor com a superfície externa do tubo, ele é descartado em C através do uso de um ventilador secundário.

O elemento 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. Exige-se das superfícies uma boa condutividade térmica, separação das duas correntes de ar e resistência à corrosão.

A figura 2.4 dispõe lado a lado os sistemas de resfriamento evaporativo, evidenciando as suas diferenças. Há acréscimo de umidade no ar principal do sistema evaporativo direto, enquanto essa alteração não ocorre no evaporativo indireto, devido ao fato da água utilizada para retirar calor não entrar em contato com a corrente de ar principal.

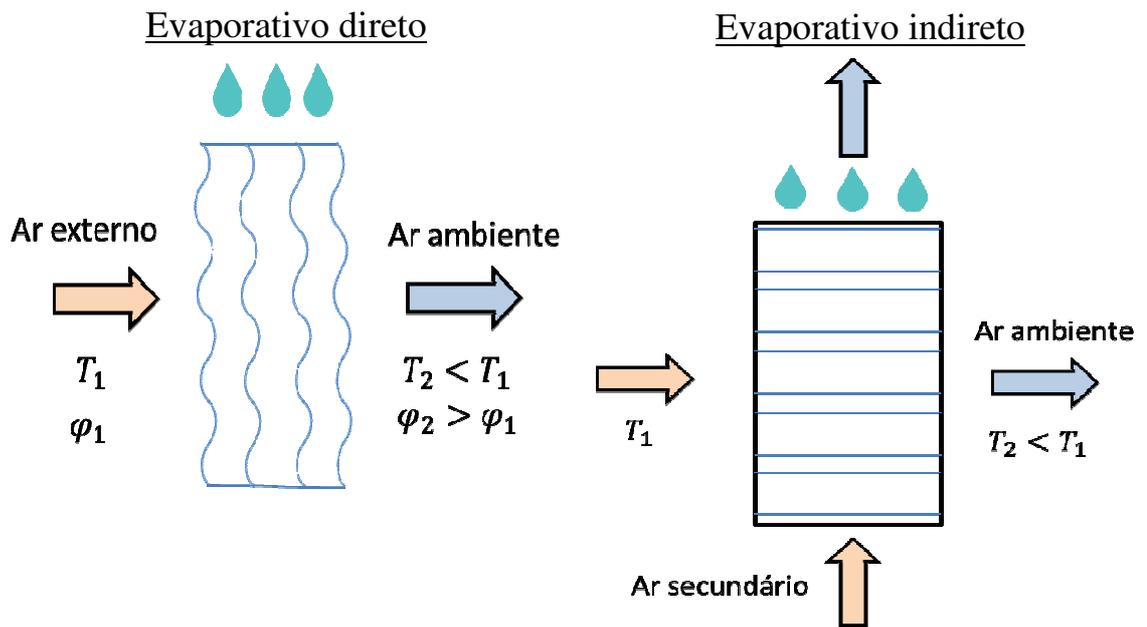


Figura 2.4 – Sistemas de resfriamento evaporativo

3 MÉTODO DE ANÁLISE

A ferramenta utilizada para a simulação é o Energy Plus. (U S Department of Energy, 2010). Com esta ferramenta é possível simular edificações climatizadas ou não, para diferentes condições climáticas, durante qualquer período e em diversas regiões geográficas.

No banco de dados do Energy Plus há inúmeros dados de equipamentos HVAC (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.

É possível utilizar uma ferramenta gráfica em conjunto com o Energy Plus, facilitando a visualização das edificações simuladas. A ferramenta gráfica utilizada neste trabalho é o Google SketchUp 8 (Google, 2011), com o plug-in Open Studio 1.0.6 (U S Department of Energy, 2011).

Gráficos serão plotados com a ferramenta xEsoView (Sourceforge, 2006), e as análises serão feitas com base nos resultados obtidos.

4 SIMULAÇÃO

4.1 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 evaporativo indireto. Espera-se que ao fornecer um ar de menor temperatura na serpentina de resfriamento, haja uma diminuição no gasto de energia para a climatização.

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 de nós apresentados na figura 4.1.

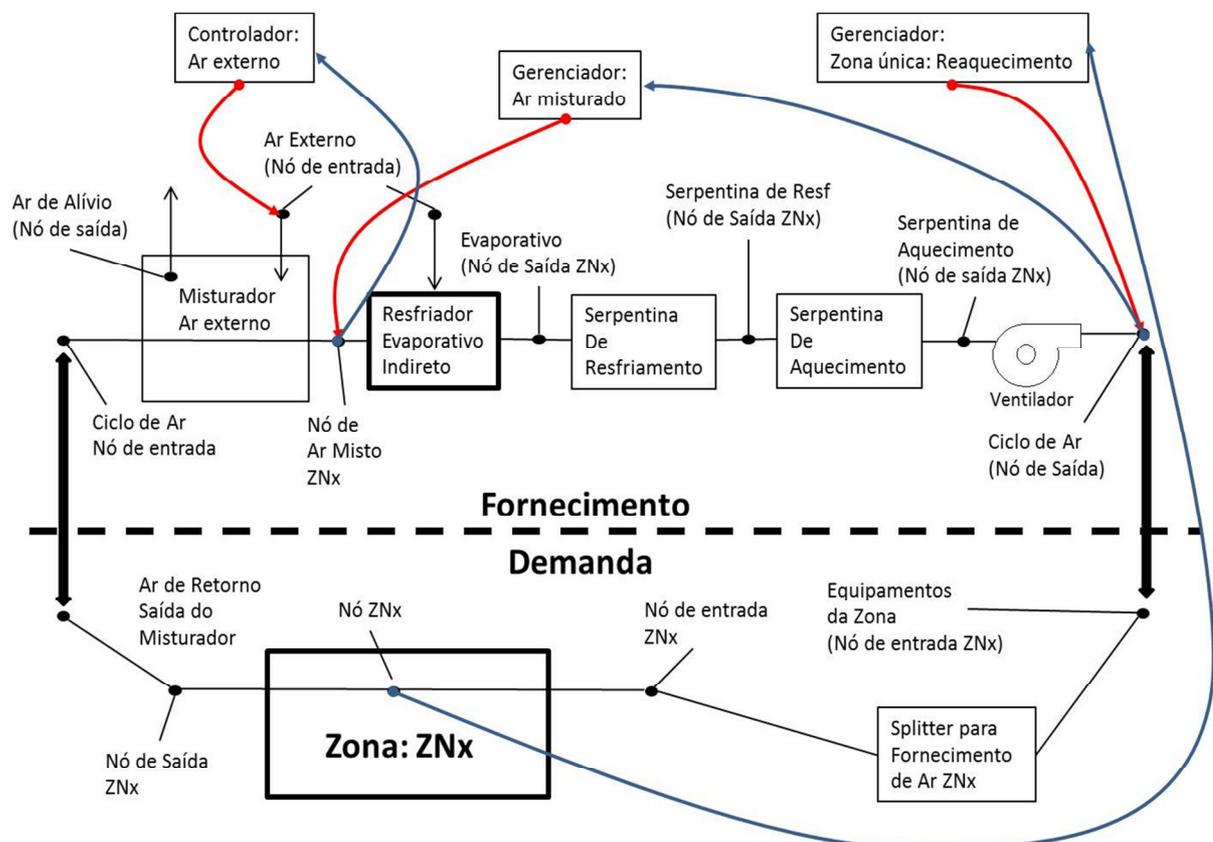


Figura 4.1 – Modelo Especial de Pesquisa de Resfriamento Evaporativo Indireto. (Adaptado de US Department of Energy, 2010)

O modelo da figura 4.1 foi utilizado 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.

Para 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 figura 4.1, 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 do fornecimento.

Do lado do fornecimento tem-se o misturador de ar, o sistema de resfriamento 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 enviado para a zona a ser climatizada.

4.1.1 Método de cálculo no resfriador evaporativo indireto

O Modelo Especial de Pesquisa de Resfriamento Evaporativo Indireto introduz o conceito de Fração Parcial de Carga (FPC), e seu valor é obtido através das equações 4.1, 4.2 e 4.3.

$$FPC = \frac{Q_{req}}{Q_{total}} \quad (4.1)$$

$$Q_{total} = \dot{m} (h_{sai,sist} - h_{ent,sist}) \quad (4.2)$$

$$Q_{req} = \dot{m} (h_{sai,desejado} - h_{ent,sist}) \quad (4.3)$$

O modelo segue um algoritmo para calcular o resfriamento necessário do ar do sistema. Calcula-se primeiramente o resfriamento máximo que o sistema pode oferecer utilizando FPC=1, e também utilizando as equações 4.4 e 4.5. A temperatura de saída do ar principal do sistema evaporativo corresponde ao maior valor de $TBS_{sai,sist}$ das equações 4.4 e 4.5.

$$TBS_{sai,sist} = TBS_{ent,sist} - \varepsilon(TBS_{ent,sist} - TBU_{ent,purga}) \quad (4.4)$$

$$TBS_{sai,sist} = TBS_{ent,sist} - \beta(TBS_{ent,sist} - T_{orv,ent,purga}) \quad (4.5)$$

A variável ε corresponde à efetividade do sistema e β é o fator que representa o quanto a $TBS_{sai,sist}$ consegue se aproximar do ponto de orvalho. O ar de purga corresponde à parcela de ar retirada do ambiente para trocar calor com o ar principal no sistema evaporativo indireto como ar secundário.

Recalcula-se o desempenho utilizando FPC obtido pelas equações 4.1, 4.2 e 4.3. Caso FPC seja igual a 1, as equações 4.4 ou 4.5 são suficientes para determinar a temperatura de saída do ar. Se FPC<1, o modelo atinge a temperatura desejada fazendo iterações para fechar o balanço de massa e energia.

4.2 CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO

O arquivo utilizado como base simula a climatização de um pequeno edifício comercial de dois andares, com uma unidade roof top que inclui o sistema evaporativo indireto. A figura 4.2 mostra a imagem do edifício no SketchUp.

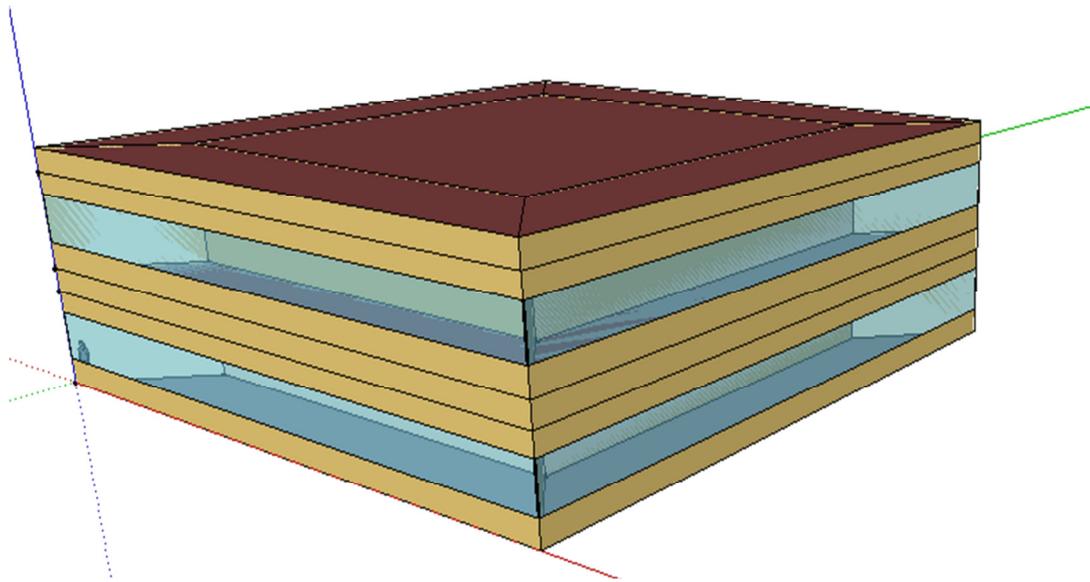


Figura 4.2 – Modelo inicial

O modelo inicial da figura 4.2 foi modificado incluindo-se um andar intermediário, e o resultado está ilustrado na figura 4.3.

A modificação foi feita para que fosse possível efetuar 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, mas somente com o andar abaixo dele. Ao andar intermediário foi aplicado um fator multiplicativo, já que a sua configuração (entre um andar superior e um inferior) é o mesmo para todos os andares intermediários.

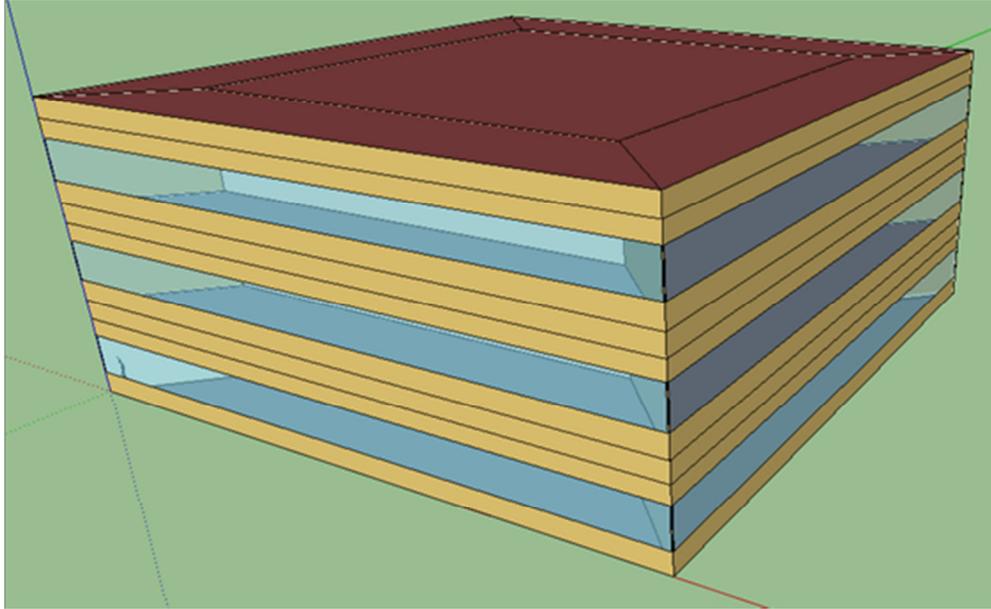


Figura 4.3 – Edificação modelo para simulação

O Prédio em questão tem 37171m² de área total, com cinco zonas climatizadas (uma zona central cercada por outras quatro) por andar, ilustradas na figura 4.4, com zonas de retorno de ar associadas a cada uma delas.

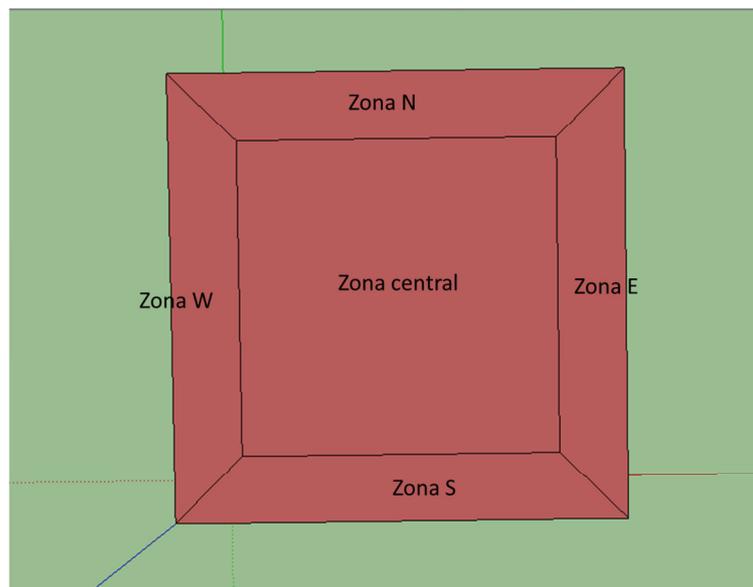


Figura 4.4 – Representação de um andar típico com cinco zonas

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.

Considerou-se uma carga média para a densidade de equipamentos do escritório num valor de $10,7 \text{ }^\circ\text{W/m}^2$ e foi adotado o valor de $11,2 \text{ }^\circ\text{m}^2$ para cada posto de trabalho (ABNT, 2008). A densidade da potência luminosa adotada foi de $11 \text{ }^\circ\text{W/m}^2$, valor recomendado pela Norma ASHRAE. Adotaram-se perfis para a distribuição dos ocupantes e da iluminação sugeridos pela norma 90.1 (ASHRAE, 2007) em que a distribuição percentual destas cargas em relação ao total são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Cronogramas de ocupação e iluminação (ASHRAE 2007)

Hora do dia	Cronograma de ocupação			Cronograma de iluminação		
	Semana	Sáb	Dom	Semana	Sáb	Dom
1 (12-1 am)	0	0	0	5	5	5
2 (1-2 am)	0	0	0	5	5	5
3 (2-3 am)	0	0	0	5	5	5
4 (3-4 am)	0	0	0	5	5	5
5 (4-5 am)	0	0	0	5	5	5
6 (5-6 am)	0	0	0	10	5	5
7 (6-7 am)	10	10	5	10	10	5
8 (7-8 am)	20	10	5	30	10	5
9 (8-9 am)	95	30	5	90	30	5
10 (9-10 am)	95	30	5	90	30	5
11 (10-11 am)	95	30	5	90	30	5
12 (11-12 pm)	95	30	5	90	30	5
13 (12-1 pm)	50	10	5	80	15	5
14 (1-2 pm)	95	10	5	90	15	5
15 (2-3 pm)	95	10	5	90	15	5
16 (3-4 pm)	95	10	5	90	15	5
17 (4-5 pm)	95	10	5	90	15	5
18 (5-6 pm)	30	5	5	50	5	5
19 (6-7 pm)	10	5	0	30	5	5
20 (7-8 pm)	10	0	0	30	5	5
21 (8-9 pm)	10	0	0	20	5	5
22 (9-10 pm)	10	0	0	20	5	5
23 (10-11 pm)	5	0	0	10	5	5
24 (11-12 am)	5	0	0	5	5	5

A adoção dos perfis apresentados na tabela 4.1 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.

Percebe-se uma maior atividade dentro do edifício entre as 8 horas da manhã até às 5 horas da tarde, o que é razoável por ser o horário comercial das empresas.

4.3 DADOS DE ENTRADA

Os dados mais importantes de entrada são aqueles referentes às características reais de desempenho dos equipamentos, principalmente o do sistema de resfriamento evaporativo indireto.

Há alguns campos de entrada que são preenchidos pelo usuário do Energy Plus. Na tabela 4.2 estão listados os dados do sistema evaporativo indireto.

Tabela 4.2 – Dados de entrada do Sistema evaporativo indireto.

CAMPO	VALOR
Eficiência máxima do resfriador	0,7
Potência da bomba para água de recirculação	30 W
Vazão volumétrica do ventilador secundário	automático
Eficiência do ventilador secundário	0,7
Diferença de pressão do ventilador secundário	250 Pa
Fator de efetividade do ponto de orvalho	0,9

O sistema evaporativo, juntamente com a serpentina de resfriamento, é ligado no período onde há maior carga térmica a ser refrigerada no edifício, ou seja, das 8:00 até as 18:00, e ficam desligados nos demais horários.

Os termostatos foram ajustados na simulação para o edifício permanecer a 24°C quando é necessário o resfriamento do ambiente, e 21°C quando é necessário o aquecimento, durante o período das 8:00 até as 18:00.

4.4 DADOS DE SAÍDA

O Energy Plus consegue fornecer diversos dados como saída da simulação, facilitando a análise do usuário.

Foram feitas duas simulações: no primeiro caso, a simulação contou com o uso do sistema evaporativo indireto, e na segunda simulação o sistema evaporativo não foi utilizado.

Foi requisitado ao Energy Plus que fornecesse as saídas: TBS do ambiente externo e sua umidade relativa, temperatura da zona climatizada, consumo elétrico do sistema AVAC para todo o edifício, o consumo elétrico total do edifício, consumo de água do sistema evaporativo indireto, e o consumo elétrico da serpentina de resfriamento.

5 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo são apresentados os resultados da simulação feita pela ferramenta Energy Plus, e serão feitas algumas análises preliminares. A simulação foi feita baseando-se em dados climáticos da cidade de São Paulo, durante o período de um ano.

As cargas térmicas introduzidas pela ocupação do edifício, equipamentos internos, luminosidade e mudança da condição climática do lado externo do edifício causam mudanças no ambiente a ser climatizado. A figura 5.1 apresenta a mudança de temperatura ocorrida num dia típico para cada uma das zonas de um andar intermediário, utilizando o sistema evaporativo indireto.

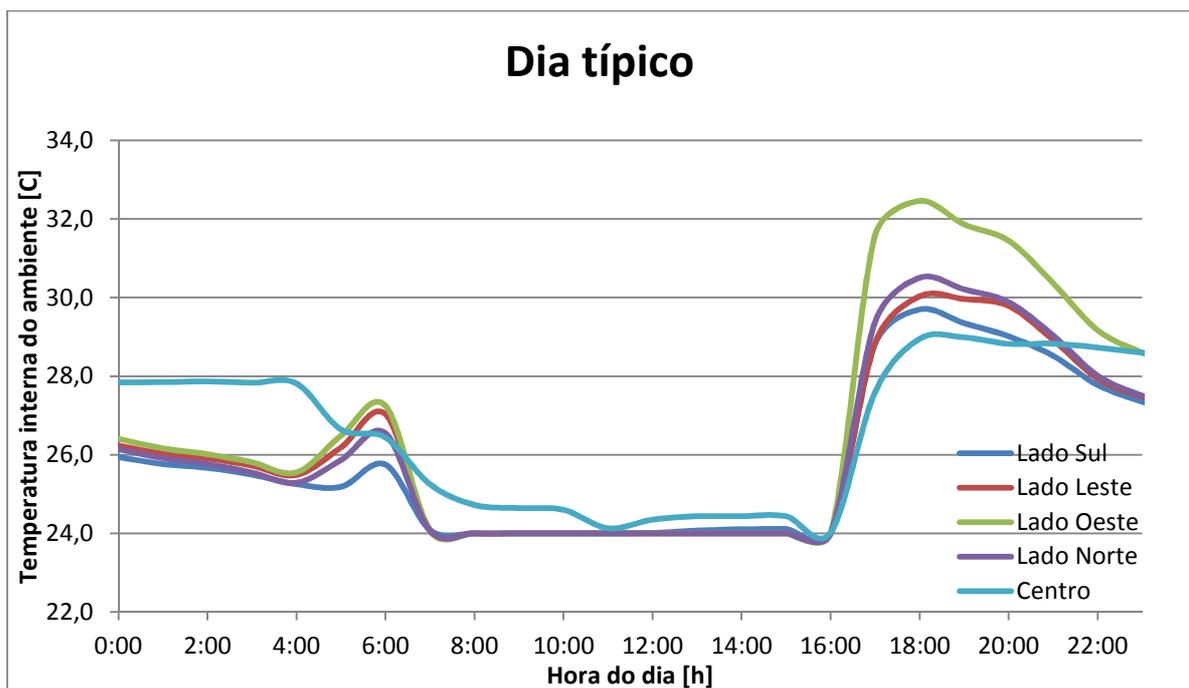


Figura 5.1 – Variação de temperatura em um dia típico (andar intermediário)

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.

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 do sistema de climatização, e a temperatura mantém-se estável a 24°C (temperatura alvo) até às 16:00 em todas as zonas. 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 figura 5.1 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.

A figura 5.2 ilustra a mudança de temperatura das cinco zonas climatizadas do andar térreo, utilizando o sistema de resfriamento evaporativo, para o período de 22 a 29 de janeiro.

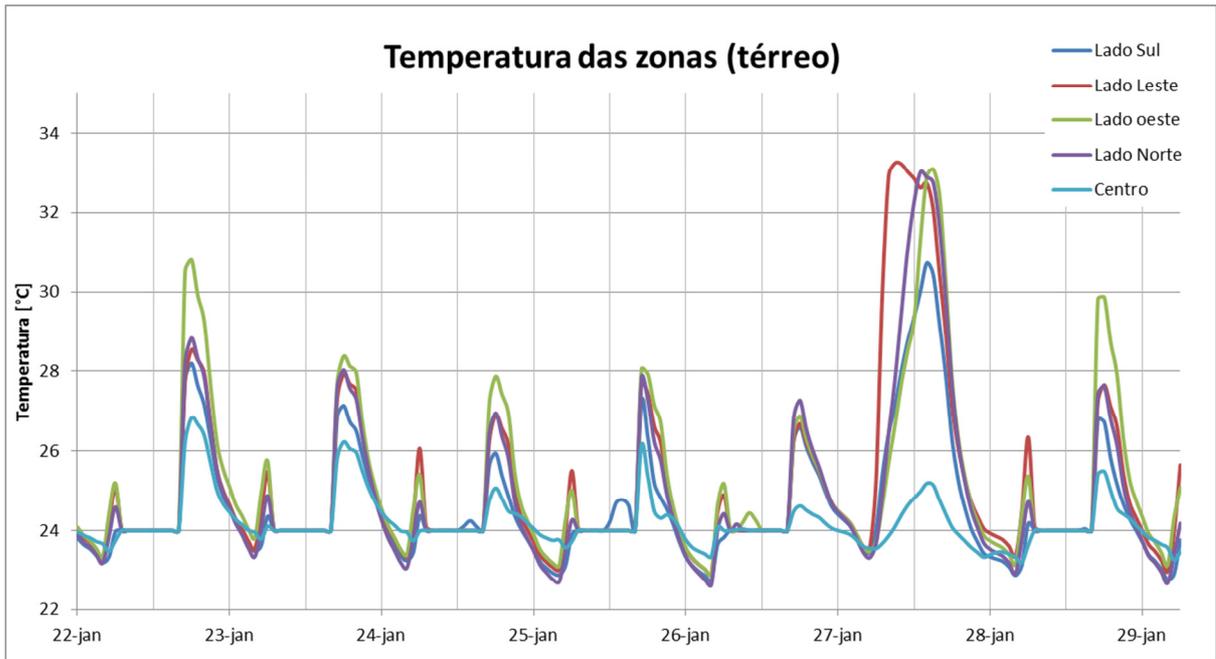


Figura 5.2 – Temperaturas das cinco zonas climatizadas (andar térreo)

Na figura 5.2, o dia 22 de janeiro corresponde a uma terça-feira. O padrão do dia típico da figura 5.1 repete-se nos outros dias, exceto no dia 27, onde há o maior aumento de temperatura durante a semana. Isto ocorre porque o sistema AVAC é quase totalmente desligado para economizar energia, pois foi adotada uma carga mínima de ocupação (5%) já que se trata de um domingo.

A figura 5.3 ilustra as mudanças de temperatura da zona oeste do edifício para cada andar. O período considerado foi o de um dia típico da semana. O andar térreo registra temperaturas mais baixas, enquanto que o último andar registra um pico de temperatura mais elevado. Mesmo com essa diferença de temperaturas entre os andares, o patamar de 24°C é mantido, mostrando que o sistema está climatizando o ambiente.

O mesmo comportamento da figura 5.3 pode ser observado em outras zonas do edifício.

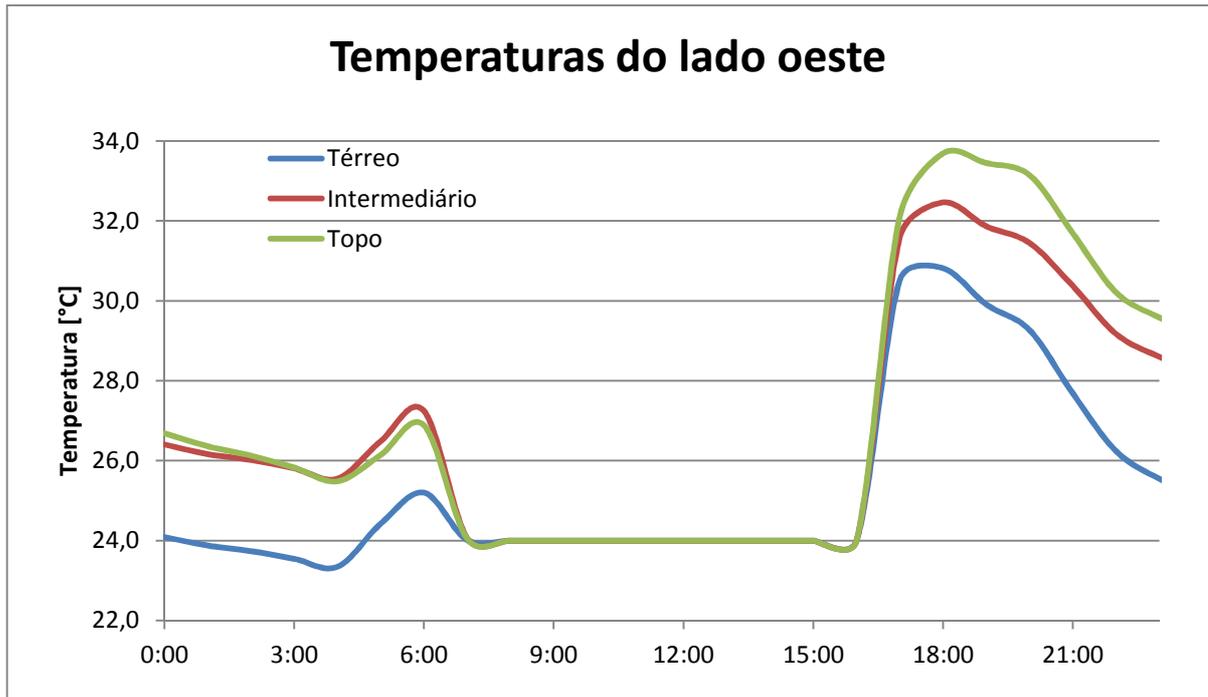


Figura 5.3 – Temperaturas do lado oeste para os três tipos de andar

Os efeitos do sistema evaporativo indireto no tocante ao consumo elétrico da serpentina podem ser verificados na figura 5.4.

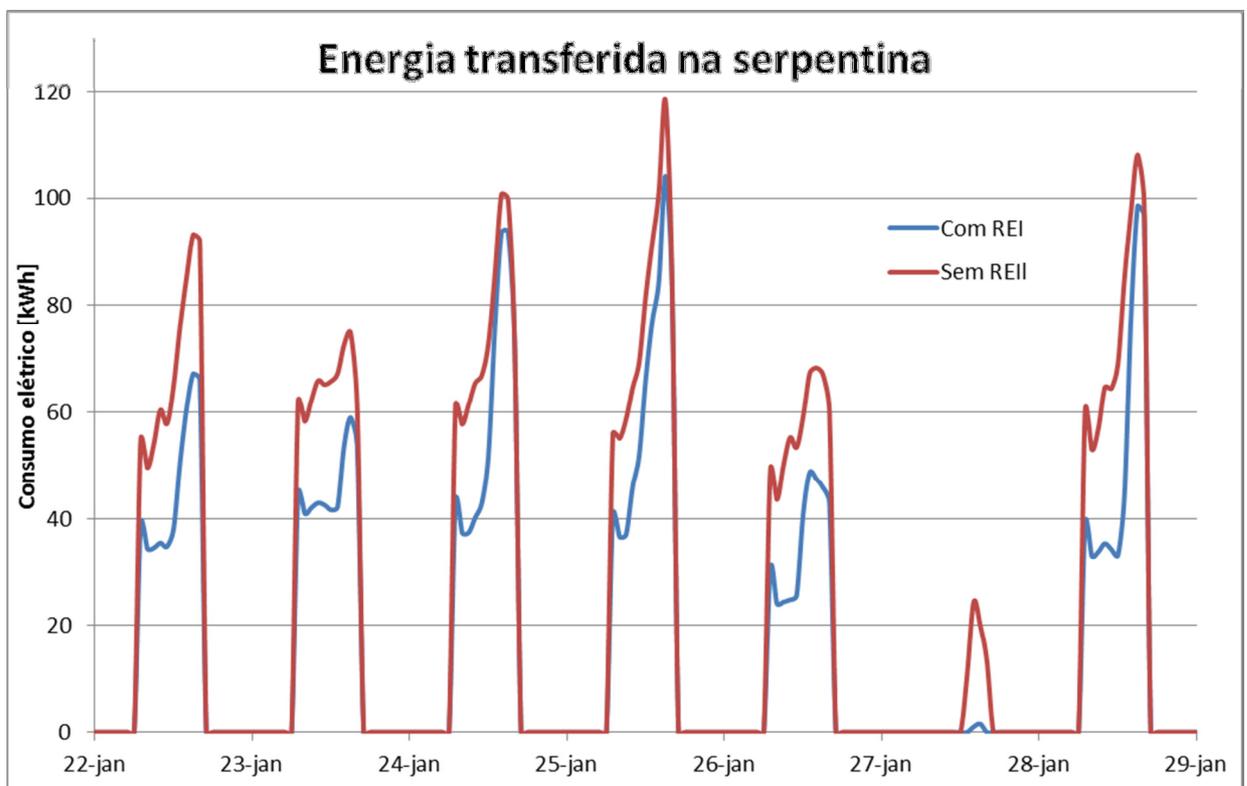


Figura 5.4 – Comparação da energia transferida na serpentina de resfriamento para uma semana típica em São Paulo

Na figura 5.4 são comparados os consumos elétricos da serpentina de resfriamento de uma zona climatizada. 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 para trocar calor, a serpentina necessita de menos energia para atingir a mesma temperatura do ar na insuflação.

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

A tabela 5.1 apresenta a energia utilizada para cada atividade para as duas simulações (com e sem o sistema evaporativo indireto), para o período de um ano para os dados climáticos utilizados para a cidade de São Paulo.

Tabela 5.1 – Consumo de energia elétrica e de água da edificação anual para São Paulo

	Sem REI	Com REI	Comparação
Resfriamento (kWh)	645.783	549.342	-14,9%
Água (m ³)	-	1.067	1.067
Total elétrico (kWh)	2.609.610	2.513.079	-3,7%

O consumo total de energia elétrica apresentado na tabela 5.1 corresponde ao total de energia gasto anualmente no edifício, somando-se os gastos energéticos com equipamentos de escritório, iluminação, ventilação e resfriamento. Os valores correspondentes aos equipamentos, iluminação e ventilação não foram apresentados porque seus valores não variam com a utilização do sistema evaporativo.

A introdução do sistema evaporativo nos andares do edifício permitiu que a parcela de consumo de eletricidade referente ao resfriamento em relação ao consumo total da edificação diminuísse de 25% para consumo de 22%.

O sistema evaporativo indireto introduziu um novo consumo no edifício de 1067m³ de água. No entanto, esta água permitiu obter uma redução de aproximadamente 15% no consumo energético referente ao resfriamento do edifício, e isto correspondeu a uma redução de aproximadamente 4% no consumo de energia elétrica total da edificação.

6 SIMULAÇÃO E ANÁLISE EM OUTRAS CIDADES

A simulação e análise do item 5 foram realizados para a cidade de São Paulo. Neste item, o mesmo processo será realizado para outras três cidades, e os diferentes resultados da utilização do sistema de resfriamento evaporativo serão analisados e comparados.

A simulação 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.

6.1 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DAS CIDADES

Neste tópico são apresentadas algumas características das cidades as quais foram feitas as simulações.

As figuras 6.1, 6.2, 6.3 ilustram respectivamente as médias mensais da Temperatura de Bulbo Seco, Umidade Relativa e a Radiação Nominal Direta, que ajudam a caracterizar o clima das cidades para simulação.

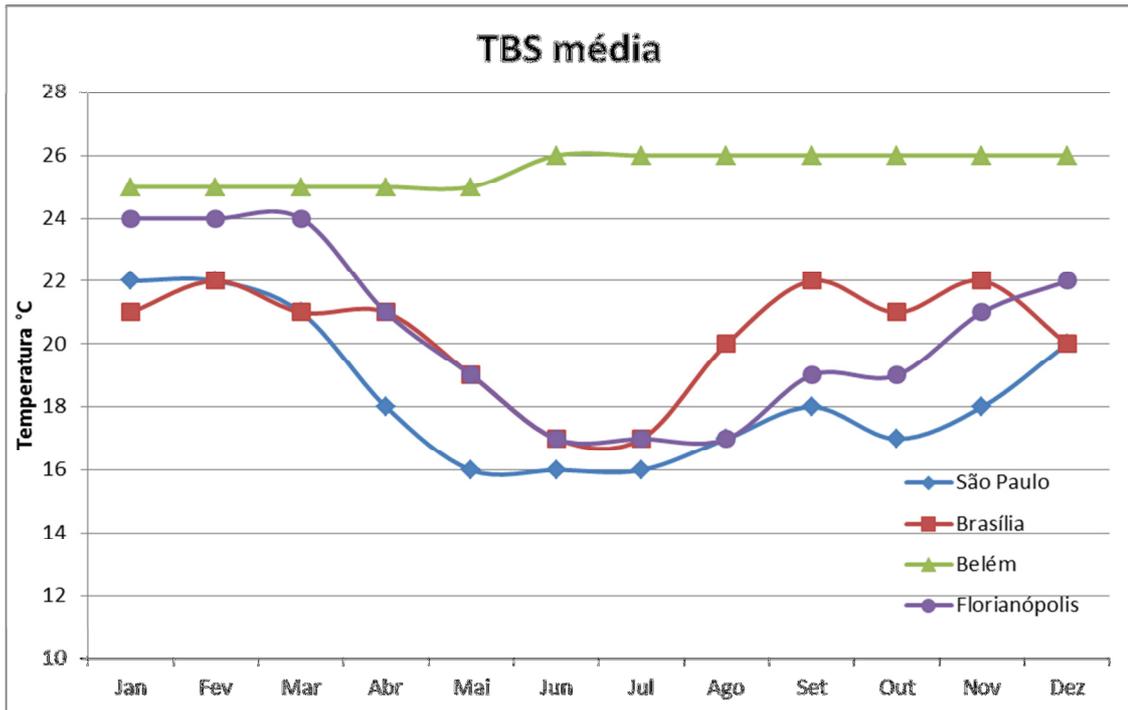


Figura 6.1 – Temperatura média das cidades para simulação

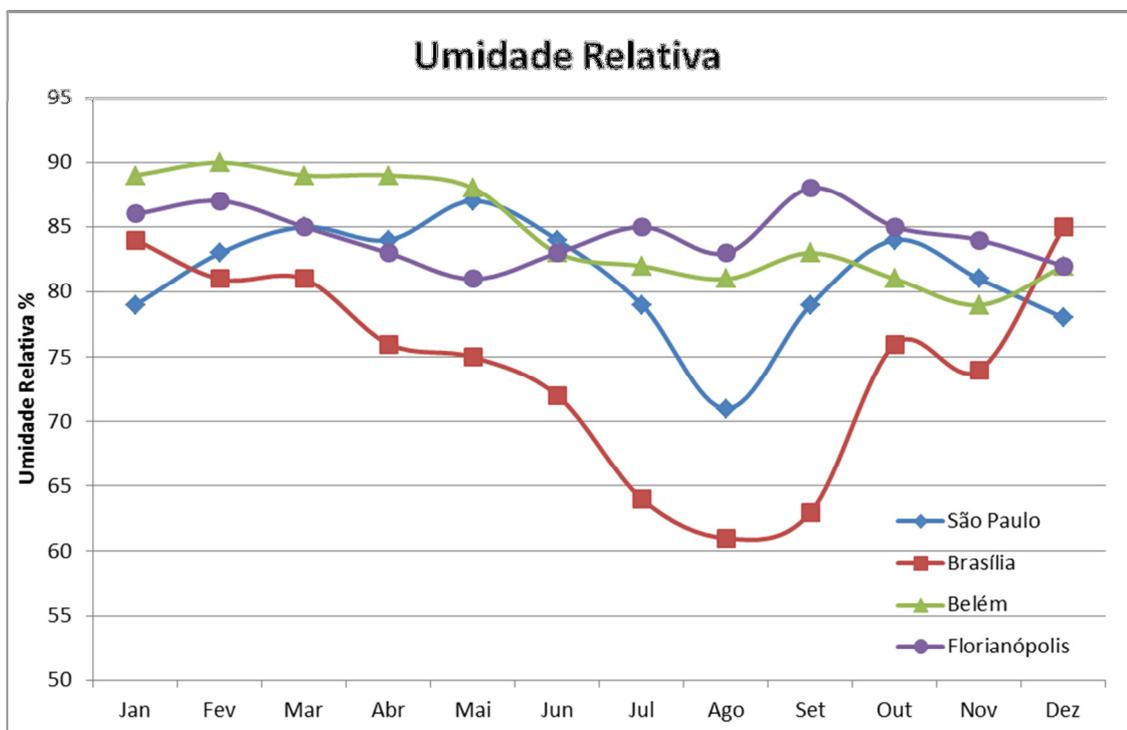


Figura 6.2 – Umidade relativa média das cidades para simulação

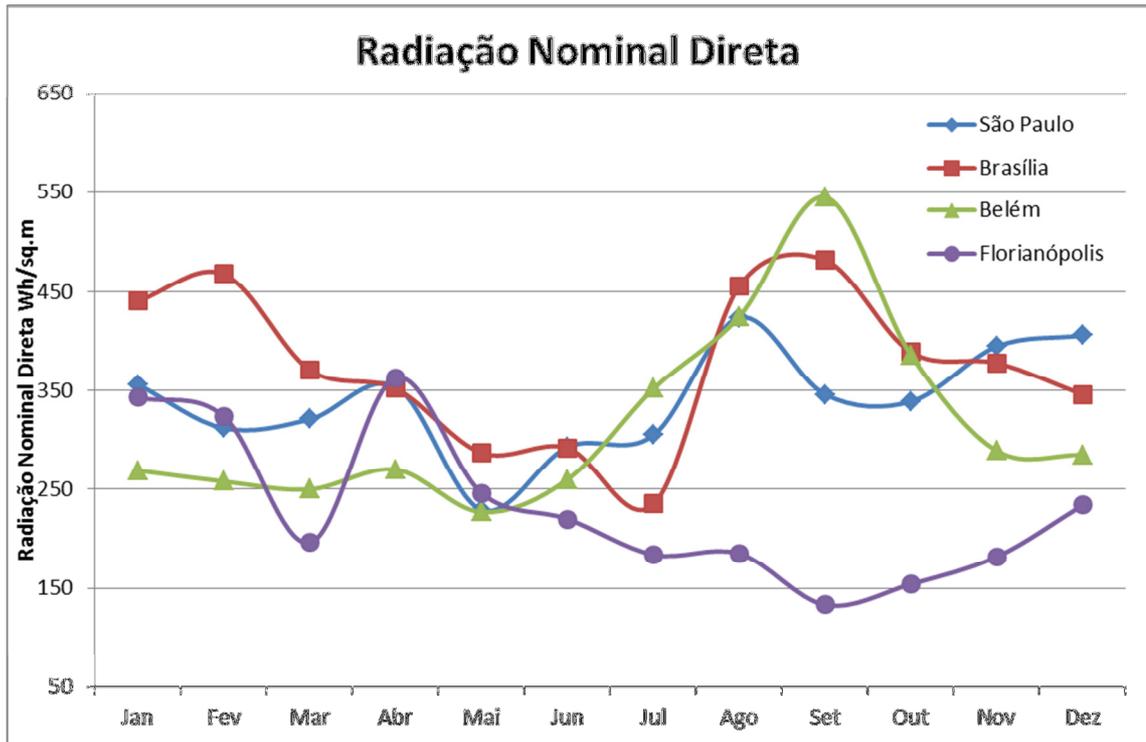


Figura 6.3 – Radiação Nominal Direta média das cidades para simulação

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. Apesar de a sua radiação nominal direta oscilar algumas vezes, mantém-se estável no ano, indicando que a radiação é um fator constante neste período. A cidade quando comparada às outras, possui um clima mais frio e ameno, de umidade constante exceto no inverno quando apresenta uma queda significativa, e a influência da radiação solar é constante para as cargas térmicas e funcionamento do sistema no edifício.

Denota-se pela figura 6.1 que 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 se destaca pelos valores de umidade apresentados na figura 6.2, onde apresenta a menor umidade relativa 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 radiação solar influencia mais na carga térmica e no funcionamento do sistema de refrigeração nos meses de fevereiro e setembro, apresentando uma

queda nos outros meses. 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. A radiação nominal direta é relativamente baixa comparada às outras cidades até junho, porém apresenta o maior pico em setembro, época em que deve influenciar mais a carga térmica do edifício.

De acordo com a figura 6.1, 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%. Com relação à radiação nominal direta, a cidade possui em média os menores valores dentre as quatro cidades, e tem os menores valores na época de inverno, como pode ser observado na figura 6.3. 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 e a radiação diminui consideravelmente no inverno, sendo menos relevante para a carga térmica do edifício nesta época.

6.2 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES EM OUTRAS CIDADES

A edificação apresentada no item 4.2 foi simulada para as condições climáticas das quatro cidades do item 6.1. Para cada cidade foram simulados dois sistemas: aquele que possui somente o sistema de ar condicionado central, e o outro com o sistema de resfriamento evaporativo indireto anterior à serpentina de resfriamento.

As tabelas 6.1 e 6.2 ilustram o consumo mensal de resfriamento do edifício modelo para as quatro cidades.

Tabela 6.1 – Consumo mensal de Resfriamento da edificação (São Paulo, Belém)

	São Paulo			Belém		
	Sem REI (kWh)	Com REI (kWh)	Diferença	Sem REI (kWh)	Com REI (kWh)	Diferença
Jan	87.028	83.259	-4,3%	125.946	133.660	6,1%
Fev	78.670	77.257	-1,8%	110.317	117.093	6,1%
Mar	80.321	77.520	-3,5%	119.276	126.603	6,1%
Abr	54.088	44.903	-17,0%	119.858	127.521	6,4%
Mai	36.344	28.228	-22,3%	126.109	134.439	6,6%
Jun	31.174	22.515	-27,8%	118.483	125.220	5,7%
Jul	28.417	18.768	-34,0%	132.478	140.994	6,4%
Ago	41.040	26.417	-35,6%	135.285	142.956	5,7%
Set	45.069	34.472	-23,5%	121.794	127.974	5,1%
Out	49.168	41.108	-16,4%	129.340	135.667	4,9%
Nov	51.813	40.685	-21,5%	125.054	130.992	4,7%
Dez	62.651	54.210	-13,5%	125.630	132.068	5,1%
Total	645.783	549.342	-14,9%	1.489.571	1.575.187	5,7%

Tabela 6.2 – Consumo mensal de Resfriamento da edificação (Brasília, Florianópolis)

	Brasília			Florianópolis		
	Sem REI (kWh)	Com REI (kWh)	Diferença	Sem REI (kWh)	Com REI (kWh)	Diferença
Jan	79.085	80.991	2,4%	115.253	121.026	5,0%
Fev	74.036	75.538	2,0%	100.576	104.843	4,2%
Mar	76.045	75.560	-0,6%	104.150	107.572	3,3%
Abr	73.761	71.676	-2,8%	86.150	82.472	-4,3%
Mai	56.453	49.580	-12,2%	58.253	48.724	-16,4%
Jun	37.363	28.323	-24,2%	31.856	23.881	-25,0%
Jul	41.179	28.302	-31,3%	35.245	27.663	-21,5%
Ago	61.679	49.907	-19,1%	36.008	27.674	-23,1%
Set	73.486	66.132	-10,0%	46.154	38.356	-16,9%
Out	75.235	72.065	-4,2%	54.770	48.673	-11,1%
Nov	74.025	69.206	-6,5%	72.145	68.398	-5,2%
Dez	69.999	69.753	-0,4%	84.177	82.339	-2,2%
Total	792.348	737.034	-7,0%	824.737	781.621	-5,2%

A cidade de São Paulo foi a única que registrou redução do consumo energético em todos os meses, e a máxima economia de energia ocorreu no mês de agosto. Com exceção de alguns meses, as cidades de Brasília e Florianópolis também apresentaram redução no consumo energético para refrigeração. Já a cidade de Belém não registrou nenhuma economia utilizando-se o sistema de resfriamento evaporativo indireto.

Utilizando os valores de TBS e de Umidade Relativa das figuras do item 6.1, é possível perceber que o sistema evaporativo indireto sofre grande influência da umidade. Isto é evidenciado pelo fato da maior economia ter ocorrido nos meses de agosto em São Paulo e Julho em Brasília, correspondentes aos meses de inverno onde a umidade é baixa nessas cidades.

Outro fator que chama a atenção é a temperatura. A cidade de Florianópolis apresenta umidade elevada durante o ano todo, e ainda assim apresentou redução no consumo energético para refrigeração. A máxima economia aconteceu no mês de Junho, para esta cidade, quando a temperatura de bulbo seco apresentava ser a menor do ano.

Na cidade de Belém, onde as temperaturas são praticamente constantes, o menor consumo energético utilizando o sistema de resfriamento evaporativo ocorreu em novembro, mês em que apresentou a menor umidade relativa do ano. A alta umidade do ar e altas temperaturas no decorrer do ano não permitiu obter redução da energia para refrigeração utilizando o sistema evaporativo indireto.

O sistema evaporativo indireto torna-se menos eficiente em cidades com elevada umidade. A água borrifada no ar secundário evapora e retira calor sensível do ar principal na forma de calor latente. No entanto, se a umidade do ambiente (ar externo) é alta, ou seja, está perto da saturação, a evaporação da água é dificultada, diminuindo a eficiência do sistema evaporativo. Assim, para uma cidade de temperatura e umidade elevadas como Belém, o sistema evaporativo indireto mostra-se menos eficaz.

Uma eficiência menor do sistema evaporativo indireto já era esperada para uma cidade com alta umidade como Belém. No entanto, o aumento do consumo de energia elétrica para resfriamento precisou ser analisado detalhadamente, pois poderia significar que o sistema evaporativo indireto não estaria contribuindo para diminuir a energia elétrica consumida pela serpentina de resfriamento.

Utilizando algumas opções do Energy Plus, foi feita uma verificação das condições do ar principal em alguns nós do modelo proposto. Para avaliar o efeito no sistema do sistema evaporativo indireto, foram verificadas as condições dos nós

imediatamente antes e depois do sistema evaporativo indireto na linha de ar principal.

Foi configurado para que o Energy Plus fornecesse as entalpias correspondentes aos nós de entrada e saída do sistema evaporativo para uma das zonas no edifício simulado na cidade de Belém, e os seus valores estão apresentados na figura 6.4.

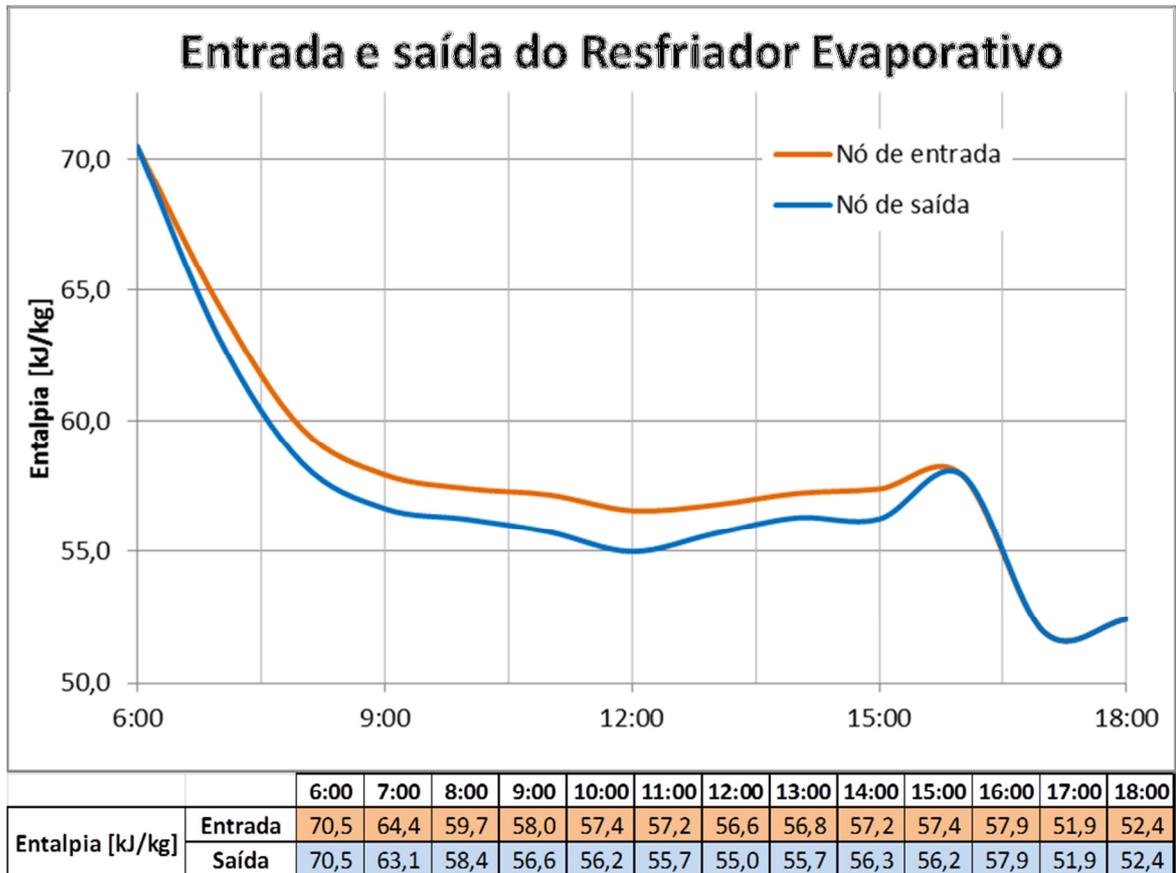


Figura 6.4 – Entalpias de entrada e saída do REI para uma zona em Belém.

A figura 6.4 mostra que o sistema evaporativo indireto está de fato reduzindo a entalpia do ar principal que vai para a serpentina de resfriamento. A mesma verificação foi realizada para outras zonas, e foram observados alguns casos em que o sistema evaporativo aumentava a entalpia do ar principal. Isto é compreensível, pois parte do ar principal é composto pelo ar de retorno do ambiente climatizado, e o ar secundário pode apresentar uma entalpia maior se o ar externo possuir temperatura e umidade elevadas demais.

Se o sistema evaporativo na cidade de Belém está reduzindo a entalpia do ar de entrada da serpentina, esta deve consumir menos energia elétrica do que numa

situação em que o REI não é utilizado. Sendo assim, foi necessário observar o consumo elétrico das serpentinas de resfriamento para o caso sem o resfriamento evaporativo (Sem REI) e para o caso utilizando o resfriamento evaporativo (Com REI). As tabelas 6.3 e 6.4 representam os valores do consumo energético de uma única zona do edifício para as quatro cidades simuladas.

Tabela 6.3 – Consumo mensal da Serpentina de resfriamento para uma zona (São Paulo, Belém).

	São Paulo			Belém		
	Sem REI (kWh)	Com REI (kWh)	Diferença	Sem REI (kWh)	Com REI (kWh)	Diferença
Jan	389,33	316,97	-18,6%	1090,18	1049,78	-3,7%
Fev	350,11	301,33	-13,9%	902,25	880,17	-2,4%
Mar	326,4	271,42	-16,8%	910,71	886,91	-2,6%
Abr	154,2	92,6	-39,9%	928,71	904,31	-2,6%
Mai	73,44	33,85	-53,9%	994,74	967,69	-2,7%
Jun	36,5	8,46	-76,8%	910,66	871,21	-4,3%
Jul	30,39	1,26	-95,9%	1029,48	988,92	-3,9%
Ago	64,08	8,74	-86,4%	1038,19	1000,66	-3,6%
Set	92,49	38,4	-58,5%	885,09	841,45	-4,9%
Out	117,63	69,9	-40,6%	1015,65	957,33	-5,7%
Nov	144,56	76,2	-47,3%	1052,75	983,9	-6,5%
Dez	241,37	168,55	-30,2%	1104,76	1048,76	-5,1%
Total	2.021	1.388	-31,3%	11.863	11.381	-4,1%

Tabela 6.4 – Consumo mensal da Serpentina de resfriamento para uma zona (Brasília, Florianópolis)

	Brasília			Florianópolis		
	Sem REI (kWh)	Com REI (kWh)	Diferença	Sem REI (kWh)	Com REI (kWh)	Diferença
Jan	384,45	360,43	-6,2%	565,3	544,38	-3,7%
Fev	336,74	312,09	-7,3%	495,92	476,82	-3,9%
Mar	325,01	289,15	-11,0%	521,54	498,46	-4,4%
Abr	312,81	266,68	-14,7%	358,63	300,86	-16,1%
Mai	199,77	139,82	-30,0%	202,66	136,17	-32,8%
Jun	93,69	40,53	-56,7%	65,17	27,59	-57,7%
Jul	122,68	46,08	-62,4%	71,23	38,5	-45,9%
Ago	201,25	116,34	-42,2%	63,07	28,36	-55,0%
Set	268,06	193,09	-28,0%	111,3	65,43	-41,2%
Out	298,6	241,04	-19,3%	141,04	93,67	-33,6%
Nov	337,57	284,83	-15,6%	294,56	237,92	-19,2%
Dez	352,07	323,21	-8,2%	391,28	335,77	-14,2%
Total	3.233	2.613	-19,2%	3.282	2.784	-15,2%

As tabelas 6.3 e 6.4 indicam que houve redução em todos os meses e em todas as cidades para a serpentina da mesma zona do edifício. Uma análise mais detalhada foi feita para verificar se o mesmo comportamento de redução do consumo se apresentava nas outras serpentinas de outras zonas do edifício. A tabela 6.5 ilustra uma comparação da soma do consumo das serpentinas de resfriamento do edifício para a cidade de Belém, referente ao mês de janeiro.

Tabela 6.5 – Comparação do consumo elétrico das serpentinas de resfriamento

	Janeiro		
	Com REI [kWh]	Sem REI [kWh]	Redução
ZN1	1.050	1.090	-3,7%
ZN3	1.091	1.120	-2,6%
ZN5	1.139	1.187	-4,0%
ZN7	873	890	-1,9%
ZN9	1.561	1.566	-0,3%
ZN11	20.733	21.814	-5,0%
ZN13	21.080	21.958	-4,0%
ZN15	22.330	23.445	-4,8%
ZN17	17.366	17.997	-3,5%
ZN19	28.257	28.257	0,0%
ZN21	1.165	1.236	-5,8%
ZN23	1.165	1.230	-5,3%
ZN25	1.252	1.313	-4,7%
ZN27	998	1.048	-4,8%
ZN29	1.789	1.794	-0,2%
Total	121.848	125.946	-3,3%

Os dados da tabela 6.5 mostram que houve redução do consumo elétrico em todas as serpentinas quando a climatização do edifício foi realizada com o sistema evaporativo indireto. Os valores de consumo das zonas 11 até a zona 19 são maiores, pois elas são equivalentes a 18 andares do edifício de 20 andares.

O consumo elétrico total sem REI da tabela 6.5 coincide com o valor de janeiro para a cidade de Belém da tabela 6.1. Porém o mesmo não ocorre para o caso com REI, que apresenta um valor maior na tabela 6.1. Sendo assim, conclui-se que o aumento do consumo de energia para resfriamento do edifício observado na tabela 6.1 para a cidade de Belém não foi devido às serpentinas de resfriamento.

A parcela faltante do consumo de energia corresponde às bombas de água utilizadas no sistema evaporativo. Os valores do consumo elétrico em janeiro do sistema evaporativo para cada zona é apresentado na tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Consumo elétrico do sistema evaporativo indireto em Janeiro

	Consumo elétrico da bomba de recirculação [kWh]			
	São Paulo	Belém	Florianópolis	Brasília
ZN1	63,1	106,9	70,4	66,8
ZN3	123,3	91,6	120,1	92,4
ZN5	196,0	140,8	156,3	214,8
ZN7	119,7	95,2	111,5	84,3
ZN9	122,0	164,1	145,2	123,6
ZN11	1.304,5	1.946,0	1.278,7	1.351,3
ZN13	2.554,9	1.595,2	1.934,8	1.787,8
ZN15	4.008,4	2.578,5	2.852,5	4.263,7
ZN17	2.605,2	1.701,0	2.253,9	1.801,3
ZN19	2.500,4	2.740,0	2.591,7	2.573,6
ZN21	93,1	127,6	91,9	99,2
ZN23	163,6	104,7	120,2	125,3
ZN25	248,5	121,2	174,5	266,8
ZN27	167,6	113,4	143,2	124,0
ZN29	173,8	186,1	175,0	187,0
Total REI	14.443,9	11.812,3	12.219,8	13.162,1
% do consumo elétrico total de resfriamento	17,3%	8,8%	10,1%	16,3%

O Energy Plus não fornece diretamente o consumo energético do sistema evaporativo como o faz com o sistema AVAC composto pelas serpentinas de resfriamento e ventiladores. Sendo assim, os dados da tabela 6.6 foram obtidos ao procurar pelos equipamentos adicionados em cada circuito de ar original. Este consumo elétrico adicional para resfriamento que o sistema evaporativo introduz ao edifício não é desprezível, pois foi superior à redução do consumo da serpentina de resfriamento nas três cidades com exceção de São Paulo para o mês de janeiro, e também em alguns outros meses.

Analisando as tabelas e gráficos apresentados no item 6, é possível concluir que o sistema de resfriamento evaporativo indireto cumpre o seu objetivo de resfriar o ar principal que vai para a serpentina de resfriamento. O REI diminui a entalpia do ar

principal transformando o calor sensível do ar em calor latente e assim evapora a água borrifada no ar secundário. Esta queda na entalpia no ar principal é observada em todas as cidades, mesmo na cidade de Belém em que tanto a umidade quanto a temperatura permanecem elevadas durante o ano se comparada com as demais.

Apesar de cumprir o objetivo de diminuir a entalpia do ar principal, o sistema de resfriamento evaporativo indireto possui um gasto de energia elétrica proveniente das bombas utilizadas para movimentar a água do ar secundário. Portanto, só é possível reduzir o consumo do sistema de climatização como um todo, se a economia de energia obtida na serpentina de resfriamento for maior que o gasto adicional que o sistema evaporativo introduz no sistema.

A figura 6.5 apresenta o consumo elétrico para resfriamento no período de um ano nas quatro cidades, para os casos com e sem o sistema evaporativo, considerando a economia de energia na serpentina de resfriamento e o consumo elétrico decorrente do uso do REI.

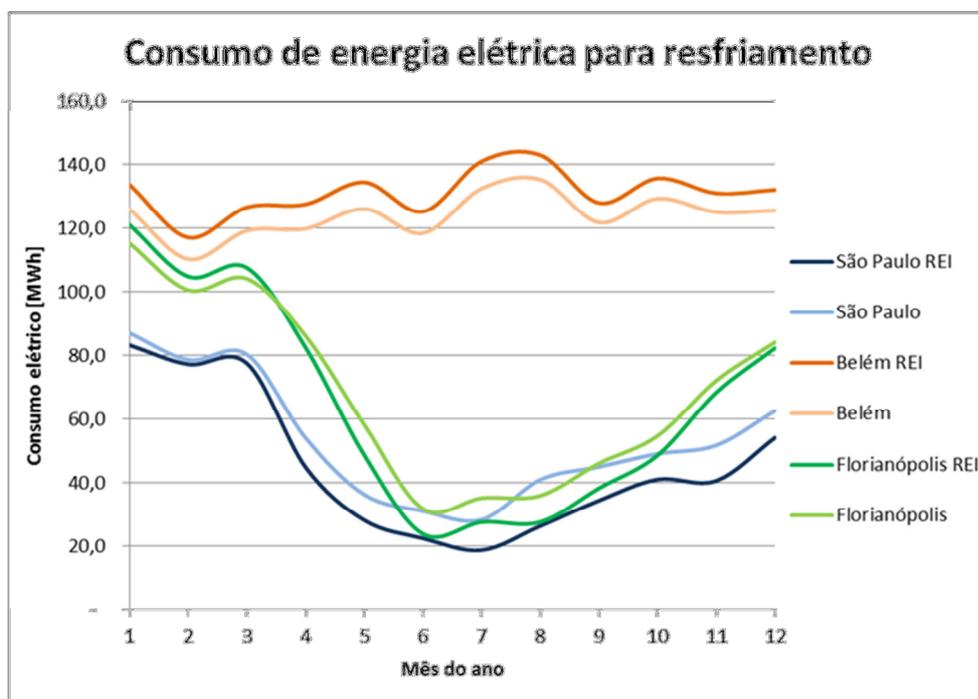


Figura 6.5 – Consumo elétrico mensal de resfriamento para as três cidades.

Os itens da legenda da figura 6.5 que apresentam somente o nome da cidade correspondem aos casos em que não há utilização do sistema evaporativo no sistema de climatização. A curva de consumo de energia elétrica para a cidade de

Brasília não foi inserida na figura 6.5 por ser semelhante à curva da cidade de São Paulo.

Percebe-se pela figura 6.5 que não há redução no consumo energético para a cidade de Belém, enquanto que na cidade de São Paulo houve redução em todos os meses do ano. Para as cidades de Brasília e Florianópolis houve maior redução do consumo energético entre os meses de julho e setembro, porém nos meses mais quentes como Janeiro e Fevereiro, o sistema evaporativo aumentou o consumo elétrico do edifício.

Observa-se também na figura 6.5 o efeito das condições externas do edifício na redução do consumo de energia obtido pelo sistema evaporativo. Este sistema não é recomendado para a cidade de Belém, considerando que não apresentou redução no consumo no decorrer do ano. O sistema evaporativo é indicado para a cidade de São Paulo, pois os resultados mostram que houve redução do consumo elétrico em todos os meses. Já Para as cidades de Florianópolis, sugere-se que o sistema evaporativo seja desligado nos meses em que não apresentou redução no consumo elétrico.

A tabela 6.7 apresenta o consumo elétrico total e também para resfriamento do edifício no período de um ano para as quatro cidades, e as reduções ou aumentos obtidos com o sistema evaporativo indireto.

Tabela 6.7 – 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%

Apesar da tabela 6.7 apresentar uma economia do consumo elétrico para algumas cidades, ainda é necessário fazer uma avaliação econômica para verificar a viabilidade do sistema evaporativo, assunto que será tratado no item 7.

7 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 6.

Os valores utilizados para tarifação de edifícios comerciais são diferentes dos edifícios residenciais, e são as chamadas tarifas horo-sazonais. Elas são caracterizadas pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano. Para a análise econômica aqui foi utilizada a tarifa horo-sazonal Azul. A tabela 7.1 apresenta os valores das tarifas para cada cidade.

Tabela 7.1 – Tarifa horo-sazonal Azul para as quatro cidades da simulação.

		Cidades		
		Brasília	Florianópolis	São Paulo
	Empresa	CEB	Celesc	Eletropaulo
Demanda [R\$/kW]	Ponta	35,12	34,24	32,39
	Fora Ponta	8,77	10,87	7,99
Consumo em [R\$/kWh]	Ponta Seca	0,3518	0,27764	0,24904
	Ponta Úmida	0,31886	0,25123	0,22621
	Fora Ponta Seca	0,22212	0,17363	0,15912
	Fora Ponta Úmida	0,20301	0,1583	0,14587
Hora ponta	início	18h	17h30	17h30
	fim	21h	20h30	20h30

O período seco corresponde aos meses de Maio a Novembro, enquanto que o período úmido compreende os meses de Dezembro a Abril.

Os valores da tabela 7.1 foram colocados na ferramenta de simulação de forma que ela pudesse fornecer os consumos mensais de energia e o respectivo valor monetário. A tabela 7.2 mostra o custo mensal da eletricidade para a edificação simulada na cidade de São Paulo.

Tabela 7.2 – Valores mensais do custo da eletricidade para a edificação em São Paulo.

	São Paulo					
	com REI		sem REI		Diferença	Redução ou Aumento
Jan	R\$	72.434,21	R\$	72.420,46	-R\$ 13,75	0,02%
Fev	R\$	69.217,69	R\$	68.431,40	-R\$ 786,29	1,15%
Mar	R\$	67.615,63	R\$	67.305,23	-R\$ 310,40	0,46%
Abr	R\$	57.782,78	R\$	59.401,51	R\$ 1.618,73	-2,73%
Mai	R\$	57.151,67	R\$	58.522,15	R\$ 1.370,48	-2,34%
Jun	R\$	51.957,76	R\$	53.698,19	R\$ 1.740,43	-3,24%
Jul	R\$	51.757,68	R\$	55.243,71	R\$ 3.486,03	-6,31%
Ago	R\$	54.533,99	R\$	58.442,26	R\$ 3.908,27	-6,69%
Set	R\$	59.076,98	R\$	61.783,36	R\$ 2.706,38	-4,38%
Out	R\$	63.392,35	R\$	64.820,49	R\$ 1.428,14	-2,20%
Nov	R\$	60.088,08	R\$	62.026,78	R\$ 1.938,70	-3,13%
Dez	R\$	64.939,45	R\$	66.009,04	R\$ 1.069,59	-1,62%
Total	R\$	729.948,27	R\$	748.104,58	R\$ 18.156,31	-2,43%

Percebe-se na tabela 7.2 que há um aumento do capital despendido com energia nos meses de janeiro a março, apesar de ter havido economia do consumo de energia ao se utilizar o sistema evaporativo em todos os meses do ano. Pela tabela 6.1, o período em questão foi o que apresentou a menor redução no consumo de energia para resfriamento do edifício (média de 3,2%). Combinando-se este fato com o aumento da demanda nesse período denotado pela análise dos dados apresentados pela ferramenta de simulação resultou no aumento do gasto com energia elétrica. Os dados referentes aos consumos e demandas das simulações nas três cidades de acordo com a tarifa horo-sazonal Azul estão apresentados no Apêndice A.

As diferenças dos gastos de energia elétrica comparando o edifício com o REI e sem o REI para as cidades de Brasília e Florianópolis estão apresentados na tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Diferença dos gastos com eletricidade entre edifício com REI e sem REI para Brasília e Florianópolis.

	Brasília		Florianópolis	
	Diferença	Redução ou Aumento	Diferença	Redução ou Aumento
Jan	-R\$ 596,48	0,92%	-R\$ 3.302,80	3,73%
Fev	-R\$ 586,95	0,97%	-R\$ 2.081,76	2,63%
Mar	-R\$ 83,92	0,14%	-R\$ 2.977,42	3,59%
Abr	R\$ 176,14	-0,29%	-R\$ 208,85	0,28%
Mai	R\$ 1.284,13	-2,04%	R\$ 1.717,35	-2,43%
Jun	R\$ 1.858,79	-3,36%	R\$ 677,99	-1,15%
Jul	R\$ 2.965,15	-5,03%	R\$ 1.049,92	-1,62%
Ago	R\$ 2.611,67	-4,13%	R\$ 1.560,53	-2,46%
Set	R\$ 2.104,96	-3,20%	R\$ 1.338,29	-2,09%
Out	R\$ 514,42	-0,75%	R\$ 372,38	-0,52%
Nov	R\$ 958,07	-1,43%	-R\$ 849,95	1,10%
Dez	-R\$ 92,96	0,15%	-R\$ 1.125,54	1,45%
Total	R\$ 11.113,02	-1,48%	-R\$ 3.829,86	0,44%

O aumento dos gastos para os meses de janeiro e fevereiro em Brasília e para os meses de janeiro a março em Florianópolis já eram esperados, já que nesses meses o sistema evaporativo aumentou o consumo de energia elétrica. De modo semelhante ao que aconteceu para a cidade de São Paulo na tabela 7.2, a tabela 7.3 mostra que houve um aumento do gasto nos meses para ambas as cidades em que a introdução do sistema evaporativo não representou uma redução significativa do consumo elétrico do edifício.

Para a cidade de Florianópolis, apesar de o sistema evaporativo indireto ter apresentado uma redução de 1,6% no consumo anual de eletricidade, isto acabou representando um aumento no gasto de aproximadamente R\$4.000,00 anuais.

Os resultados apresentados até o momento consideram que o sistema evaporativo foi utilizado mesmo sabendo-se que o seu uso acarretaria num consumo adicional de energia elétrica, de acordo com as análises realizadas no capítulo 6.

Sabendo-se que o sistema evaporativo indireto apresenta uma eficiência menor em alguns meses para as cidades de Brasília e Florianópolis, fez-se uma projeção dos

cálculos dos gastos mensais desligando o sistema evaporativo nos meses em que ele apresenta um aumento no consumo energético. Esta projeção é apresentada na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 – Projeção da diferença dos gastos desligando o REI nos meses que apresenta menor eficiência.

	Brasília		Florianópolis	
	Diferença	Redução ou Aumento	Diferença	Redução ou Aumento
Jan	R\$ -	0,00%	R\$ -	0,00%
Fev	R\$ -	0,00%	R\$ -	0,00%
Mar	-R\$ 83,92	0,14%	R\$ -	0,00%
Abr	R\$ 176,14	-0,29%	-R\$ 208,85	0,28%
Mai	R\$ 1.284,13	-2,04%	R\$ 1.717,35	-2,43%
Jun	R\$ 1.858,79	-3,36%	R\$ 677,99	-1,15%
Jul	R\$ 2.965,15	-5,03%	R\$ 1.049,92	-1,62%
Ago	R\$ 2.611,67	-4,13%	R\$ 1.560,53	-2,46%
Set	R\$ 2.104,96	-3,20%	R\$ 1.338,29	-2,09%
Out	R\$ 514,42	-0,75%	R\$ 372,38	-0,52%
Nov	R\$ 958,07	-1,43%	-R\$ 849,95	1,10%
Dez	-R\$ 92,96	0,15%	-R\$ 1.125,54	1,45%
Total	R\$ 12.296,45	-1,63%	R\$ 4.532,12	-0,52%

Desligando o sistema evaporativo indireto nos meses em que este apresenta menor eficiência, ou seja, igualando o gasto com energia elétrica do edifício com REI ao edifício sem REI, aumentou a economia na cidade de Brasília e tornou o aumento no custo em redução no custo anual de aproximadamente 4,5 mil reais na cidade de Florianópolis.

Alguns meses da Tabela 7.4 ainda apresentam um aumento do gasto de energia, porém o sistema evaporativo continuou sendo utilizado nesses meses, pois o aumento no gasto é decorrente do sistema de tarifação e não da ineficiência do sistema evaporativo.

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 e seus valores anuais são apresentados na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 – Custo anual da água para retirar calor do ar primário para edifício com REI.

	Cidades		
	Brasília	Florianópolis	São Paulo
Empresa	CEB	Casan	Sabesp
Água e esgoto [R\$/m³]	14,24	15,89	18,70
Consumo de água por ano [m³]	1166	780	1067
Despesa com água	R\$ 16.610,39	R\$ 12.402,72	R\$ 19.953,65

O consumo de água por ano indicado na tabela 7.5 é efetivamente a quantidade de água evaporada ao retirar calor do ar primário. Sendo assim, ela é a quantidade de água que se perde e precisa ser realimentada. Multiplicando-se a tarifa de água e esgoto pelo consumo, tem-se o gasto anual com água do sistema evaporativo. Este custo adicional de água torna economicamente inviável o uso do sistema evaporativo indireto, dado que os valores dos gastos da Tabela 7.5 são maiores do que a economia obtida com a energia elétrica.

A Tabela 7.6 mostra os dados finais de economia energética e financeira dos capítulos 6 e 7. Nesta tabela, foram utilizados os gastos de energia elétrica correspondente ao caso em que há desligamento do sistema evaporativo nos meses em que ele não diminui o consumo energético do edifício.

Tabela 7.6 – Reduções obtidas com o uso do REI e a economia anual total para as três cidades.

	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%	
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 a nova configuração com o REI para as três cidades analisadas.

8 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. As duas correntes de ar trocam calor sem entrar diretamente em contato através de um trocador de calor. O ar principal resfriado é encaminhado para a serpentina de resfriamento, e este deve consumir menos energia para resfriar o ar até a temperatura de insuflação.

A simulação das duas configurações do sistema de climatização (convencional e convencional com resfriamento evaporativo indireto) de um edifício comercial de 20 andares no período de um ano permitiu fazer uma análise do impacto energético do REI em quatro cidades diferentes.

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.

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 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.

Uma sugestão para melhorar o sistema seria utilizar um método de controle mais efetivo para o sistema evaporativo, para que este fosse desligado quando as condições fossem tais que o seu uso resultasse no aumento de consumo da serpentina de resfriamento. O sistema evaporativo deste trabalho não possui um controle independente que possibilite esta ação.

Este controle mais refinado se faz necessário, pois mesmo nos meses em que o sistema evaporativo apresentou aumento do consumo energético, há grandes possibilidades de que em alguns dias deste mesmo mês tenha sido possível reduzir o consumo de energia. Desta forma, poderia reduzir o aumento do consumo e trazido pelo sistema evaporativo e manter somente o efeito de redução do consumo energético.

É preciso também pesquisar como um sistema de resfriamento evaporativo indireto utiliza a água, e maiores detalhes técnicos sobre o seu funcionamento. É interessante fazer uma análise de sensibilidade sobre alguns parâmetros do REI, e analisar os seus efeitos nos custos do edifício comercial.

9 **REFERÊNCIAS**

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401 -1** Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Rio de Janeiro, 2008. 56p.

ASHRAE. **ASHRAE STANDARD 90.1 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings** Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2007, p15-65.

DELFANI, S. et al Energy saving potential of an indirect evaporative cooler as a pre-cooling unit for mechanical cooling systems in Iran **Energy and Buildings**, v42, 2169-2176, 2010. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810002252>>. Acesso em: 16 nov. 2011.

GOOGLE **Google SketchUp 8.0.4811**, 2011.

HEIDARINEJAD, G. et al **Experimental investigation of two-stage indirect/direct evaporative cooling system in various climatic conditions** Building and Environment v44, 2073-2079, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132309000511>>. Acesso em: 16 nov. 2011.

SWADISPAN, P.; TEEBOONMA, U.; THINVONGPITUK C.; **Study of performance improvement window air conditioning using water spray** In: International Conference on Energy Security and Climate Change; Issues, Strategies, and Options (ESCC), 2008, Bangkok, 5p.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY **Energy Plus 6.0**, Engineering Reference Manual p690-694, 2010

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY **Open Studio 1.0.6**, 2011

WATT, A.R.; BROWN, W.K. **Evaporative Air Conditioning Handbook**. Lilburn USA: The Fairmont Press, 1997. v3, p12-25.

SOURCEFORGE **xEsoView 0.3.2**, 2006

10 **BIBLIOGRAFIA**

Adasa. Acesso em 15 de Novembro de 2011, disponível em
<http://www.adasa.df.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=184&Itemid=229>

AES Eletropaulo. Acesso em 25 de Setembro de 2011, disponível em
<<http://www.aeseletropaulo.com.br/clientes/PoderPublico/Informacoes/Paginas/SistemasdeTarifacao.aspx>>

CASAN. Acesso em 15 de Novembro de 2011, disponível em
<<http://www.casan.com.br/index.php?sys=59>>

CEB. Acesso em 25 de Setembro de 2011, disponível em
<http://www.ceb.com.br/Ceb/Ceb/area.cfm?id_area=57&nivel=2>

CEDOC. Acesso em 25 de Setembro de 2011, disponível em
<<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2000126.pdf>>

CEEE. Acesso em 25 de Setembro de 2011, disponível em
<http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/archives/Tabela_Horo_Azul_2010.pdf>

Coolerado. Acesso em 7 de Abril de 2011, disponível em
<<http://www.coolerado.com/products/>>

INCROPERA, F.P. et al **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6^a edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

Munters. Acesso em 7 de Abril de 2011, disponível em
<<http://www.munters.us/en/us/Products--Services/Dehumidification/Indirect-Heating--Cooling/Indirect-Cooling/?Product=4E6F45E7-B6DB-4B60-9E4C-198DBA56FBB9>>.

Munters Brasil. Acesso em 7 de Abril de 2011, disponível em
<<http://www.munters.com.br/pt-BR/br/Produtos--Servicos/Divisao-Humicool/HVAC-Aquecedores-Ventilacao-e-Ar-Condicionado/Sistemas-de-Climatizacao-e-Umidificacao/Refriamento-Evaporativo/>>

Sabesp. Acesso em 15 de Novembro de 2011, disponível em
<http://site.sabesp.com.br/uploads/file/clientes_servicos/comunicado_07_2011.pdf>

VAN WYLEN, G.J.; SONNTAG C.; BORGNAKKE, R.E. **Fundamentos da Termodinâmica**. Tradução da 6ª edição americana. São Paulo: Edgard Blüncher, 2006.

APÊNDICE A – CONSUMO ELÉTRICO PELA TARIFA HORO-SAZONAL AZUL

Para determinar a origem do aumento do custo de energia elétrica da Tabela 7.2 mesmo com a redução no consumo de energia no mês, foi necessário avaliar a forma como a tarifa estava sendo aplicada em cada cidade. As tabelas A.1, A.2 e A.3 apresentam os gastos mensais com eletricidade nas cidades de São Paulo, Brasília e Florianópolis, respectivamente, de acordo com a tarifa horo-sazonal Azul apresentada no capítulo 7.

Tabela A.1 – Gastos mensais com eletricidade para a cidade de São Paulo com a tarifa horo-sazonal Azul (AES São Paulo, 2011).

São Paulo com REI	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
CONSPONTAUMIDA_AZUL (R\$)	3497,99	2959,69	3005,16	2893,44	0	0	0	0	0	0	0	3228,92
CONSFORAPONTAUMIDA_AZUL (R\$)	34755,68	31478,55	33254,81	28391,62	0	0	0	0	0	0	0	30118,01
CONSPONTASECA_AZUL (R\$)	0	0	0	0	3076,35	2700,26	3078,62	3052,51	2918,57	3243,1	3086,74	0
CONSFORAPONTASECA_AZUL (R\$)	0	0	0	0	29394,03	26769,04	28002,31	28710,76	28981,36	31356,87	29868,16	0
DEMANDAPONTA_AZUL (R\$)	26130,48	26208,15	23262,34	19527,73	18211,71	16321,09	15083,56	16512,59	20216,62	21246,99	20248,6	24073
DEMANDAFORAPONTA_AZUL (R\$)	8050,06	8571,31	8093,31	6970	6469,58	6167,38	5593,19	6258,13	6960,42	7545,39	6884,58	7519,52
SOMA (R\$)	72434,21	69217,7	67615,62	57782,79	57151,67	51957,77	51757,68	54533,99	59076,97	63392,35	60088,08	64939,45
São Paulo sem REI	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
CONSPONTAUMIDA_AZUL (R\$)	3509,83	2955,68	3004,93	2898,08	0	0	0	0	0	0	0	3251,24
CONSFORAPONTAUMIDA_AZUL (R\$)	35303,19	31694,3	33667,68	29728,18	0	0	0	0	0	0	0	31334,14
CONSPONTASECA_AZUL (R\$)	0	0	0	0	3089,4	2724,45	3113,81	3107,04	2939	3263,18	3104,82	0
CONSFORAPONTASECA_AZUL (R\$)	0	0	0	0	30677,23	28131,46	29513,66	31002,78	30654,03	32626,61	31627,57	0
DEMANDAPONTA_AZUL (R\$)	25716,55	25670,02	22858,68	19598,54	18017,59	16467,38	16462,67	17728,23	20719,49	21431,83	20335,83	23904,72
DEMANDAFORAPONTA_AZUL (R\$)	7890,89	8111,4	7773,94	7176,7	6737,94	6374,9	6153,57	6604,21	7470,85	7498,86	6958,57	7518,94
SOMA (R\$)	72420,46	68431,4	67305,23	59401,5	58522,16	53698,19	55243,71	58442,26	61783,37	64820,48	62026,79	66009,04

Tabela A.2 – Gastos mensais com eletricidade para a cidade de Brasília com a tarifa horo-sazonal Azul (AES São Paulo, 2011).

Brasília com REI	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
CONSPONTAUMIDA_AZUL (R\$)	3164,47	2663,33	2692,6	2820,82	0	0	0	0	0	0	0	2993,48
CONSFORAPONTAUMIDA_AZUL (R\$)	48572,19	43985,13	46382,13	45347,78	0	0	0	0	0	0	0	45684,23
CONSPONTASECA_AZUL (R\$)	0	0	0	0	3253,69	2829,29	3253,69	3112,22	2970,76	3315,86	3147,16	0
CONSFORAPONTASECA_AZUL (R\$)	0	0	0	0	45770,14	38708,79	41114,6	45347,82	47880,32	51067,44	48832,07	0
DEMANDAPONTA_AZUL (R\$)	6262,62	6262,62	4946,76	4946,76	4946,76	4946,76	4946,76	4946,76	4946,76	6262,62	6262,62	6262,62
DEMANDAFORAPONTA_AZUL (R\$)	7697,14	7967,72	7784,38	7708,34	7840,78	6923,69	6723,45	7272,54	7900,47	7797,27	7689,84	7566,54
SOMA (R\$)	65696,42	60878,8	61805,87	60823,7	61811,37	53408,53	56038,5	60679,34	63698,31	68443,19	65931,69	62506,87
Brasília sem REI	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
CONSPONTAUMIDA_AZUL (R\$)	3164,75	2664,24	2692,6	2820,82	0	0	0	0	0	0	0	2993,48
CONSFORAPONTAUMIDA_AZUL (R\$)	48192,61	43684,78	46493,03	45784,1	0	0	0	0	0	0	0	45735,32
CONSPONTASECA_AZUL (R\$)	0	0	0	0	3253,95	2829,29	3253,69	3112,22	2977,05	3315,86	3147,16	0
CONSFORAPONTASECA_AZUL (R\$)	0	0	0	0	47303,02	40717,96	43975,16	47965,8	49518,94	51771,72	49908,03	0
DEMANDAPONTA_AZUL (R\$)	6262,62	6262,62	4946,76	4946,76	4976,62	4946,76	4946,76	4946,76	5485,68	6262,62	6262,62	6262,62
DEMANDAFORAPONTA_AZUL (R\$)	7479,95	7680,21	7589,57	7448,17	7561,89	6773,31	6828,04	7266,22	7821,61	7607,41	7571,96	7422,48
SOMA (R\$)	65099,93	60291,85	61721,96	60999,85	63095,48	55267,32	59003,65	63291	65803,28	68957,61	66889,77	62413,9

Tabela A.3 – Gastos mensais com eletricidade para a cidade de Florianópolis com a tarifa horo-sazonal Azul (AES São Paulo, 2011).

Florianópolis com REI	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
CONSPONTAUMIDA_AZUL (R\$)	4195,16	3504,33	3591,99	3477,29	0	0	0	0	0	0	0	3647,73
CONSFORAPONTAUMIDA_AZUL (R\$)	43349,48	38246,91	40503,46	36437,32	0	0	0	0	0	0	0	36924,09
CONSPONTASECA_AZUL (R\$)	0	0	0	0	3661,34	2950,3	3467,77	3289,82	3277,82	3674,29	3696,33	0
CONSFORAPONTASECA_AZUL (R\$)	0	0	0	0	35129,29	29209,37	31565,05	31284,22	31883	35187,45	37216,53	0
DEMANDAPONTA_AZUL (R\$)	31429,81	27299,24	29805,47	22880,07	20074,28	16462,45	19083	18209,03	17985,95	22946,01	26160,16	26810,78
DEMANDAFORAPONTA_AZUL (R\$)	12929,94	12329,08	12097,82	10857,74	9997,29	9746,21	9700,46	9212,79	9548,48	9895,76	10859,58	11303,14
SOMA (R\$)	91904,39	81379,56	85998,74	73652,42	68862,2	58368,33	63816,28	61995,86	62695,25	71703,51	77932,6	78685,74
Florianópolis sem REI	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
CONSPONTAUMIDA_AZUL (R\$)	4128,33	3470,33	3554,39	3473	0	0	0	0	0	0	0	3636,31
CONSFORAPONTAUMIDA_AZUL (R\$)	42492,68	37592,51	39986,54	37022	0	0	0	0	0	0	0	37222,38
CONSPONTASECA_AZUL (R\$)	0	0	0	0	3658,69	2961,17	3470,93	3298,38	3276,55	3684,29	3688,49	0
CONSFORAPONTASECA_AZUL (R\$)	0	0	0	0	36785,61	30587,41	32879,73	32726,17	33236,22	36239,67	37865,66	0
DEMANDAPONTA_AZUL (R\$)	29651,82	26588,69	27673,4	22556,12	20122,52	16190,05	18808,64	18090,83	17968,56	22394,3	25176,18	25831,12
DEMANDAFORAPONTA_AZUL (R\$)	12328,76	11646,26	11807	10392,44	10012,73	9307,68	9706,9	9441,02	9552,23	9757,63	10352,32	10870,39
SOMA (R\$)	88601,59	79297,79	83021,33	73443,56	70579,55	59046,31	64866,2	63556,4	64033,56	72075,89	77082,65	77560,2