



INFLUÊNCIA DO DESEMPENHO TÉRMICO DAS FACHADAS NAS EMISSÕES DE CO₂, NA FASE OPERACIONAL, EM EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS EM CURITIBA

Ana Carolina E. K. Mazzarotto (1); Aloísio Leoni Schmid (2); Sérgio Fernando Tavares (3)

(1) Programa de Pós-graduação em Construção Civil, UFPR, Brasil - e-mail:
anamazzarotto@terra.com.br

(2) Departamento de Arquitetura e Urbanismo, UFPR, Brasil – e-mail: isso@ufpr.br

(3) Departamento de Construção Civil, UFPR, Brasil - e-mail: sergioftavares@gmail.com

RESUMO

Os edifícios de escritórios apresentam um intenso uso de energia para sua operação, decorrente do uso da iluminação artificial, de equipamentos de informática e do ar condicionado. Estes três itens representam elementos chaves do consumo de eletricidade por este setor de edificações. O conforto térmico, parâmetro chave para promover um ambiente de trabalho saudável e produtivo, é tradicionalmente atingido a partir de extenso uso de energia para condicionamento. O desempenho térmico das fachadas influencia a intensidade do uso dos sistemas de condicionamento de ar, pois as soluções arquitetônicas empregadas podem provocar ganhos e perdas térmicos consideráveis. Por outro lado, edifícios projetados de forma a melhorar o desempenho das fachadas poderão promover conforto com menor consumo de energia. A redução do uso de energia elétrica em edifícios de escritórios é fundamental para redução da emissão de gases do efeito estufa durante sua fase operacional, já que mesmo no Brasil, existem emissões de CO₂ relacionadas à geração de eletricidade, devido à participação de fontes térmicas na sua produção. O objetivo deste artigo é analisar a influência do desempenho térmico das fachadas de edifícios de escritórios nas emissões de CO₂ durante sua fase operacional. O estudo usa, como método, a simulação computacional de quatro tipologias de fachada, com diferentes níveis de desempenho, para o mesmo andar tipo de escritórios em Curitiba. O parâmetro do estudo será a manutenção das temperaturas internas dos ambientes de trabalho dentro da faixa de conforto, entre 18° C e 26° C, em dois períodos climáticos extremos, inverno e verão. O estudo pretende, como resultados, relacionar o desempenho térmico e energético dos escritórios com índice de emissões de CO₂, parâmetro objetivo para avaliação de sustentabilidade ambiental. Para complementar o artigo, dois modelos foram selecionados para a estimativa do consumo de energia anual de condicionamento dos ambientes e comparação das emissões de CO₂ embutida e operacional.

Palavras chave: emissões de CO₂; desempenho térmico; desempenho energético; fachadas duplas ventiladas; edifícios de escritórios

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, 44% do consumo de energia elétrica total produzida são destinados à operação de edificações. Deste total, de acordo com a Resenha energética brasileira (BRASIL, 2009), 22,6% da eletricidade é consumida pelos setores comercial e público. Nestas edificações, a eletricidade é a principal fonte de energia usada para sua operação, representando em torno de 85% do total (BRASIL, 2008).

O acúmulo de gases do efeito estufa tem sido estudado como uma das principais causas de mudanças climáticas mundiais, sendo o dióxido de carbono (CO_2) um dos principais agentes. Segundo Tavares (2006), a geração de CO_2 decorrente das atividades da construção civil é um parâmetro de sustentabilidade particularmente relevante no Brasil. Com exceção da parcela de CO_2 relativa às queimadas, no mínimo a quarta parte das emissões brasileiras origina-se da construção e operação de edificações, seja do consumo energético ou dos processos de fabricação dos materiais de construção.

A produção de energia elétrica no Brasil é considerada de baixo impacto ambiental em comparação com as médias mundiais. A principal fonte primária para sua geração é hidráulica, oriunda de fontes renováveis e pouco poluidoras, representando 73,2% do total (BRASIL, 2008). No entanto, outras fontes significativas para a geração de eletricidade são utilizadas no país, como a térmica e a nuclear (BRASIL, 2008). A participação da geração de energia a partir de fontes térmicas tem crescido no país, apresentando um aumento de cerca de 70% entre os anos 2007 e 2008. Os principais combustíveis utilizados para produção da termoelectricidade são: carvão mineral, derivados do petróleo (óleo) e gás natural. De acordo com o IPCC (1995), ao uso destes estão associadas a geração de 91,47 $\text{kg CO}_2/\text{GJ}$ para o carvão mineral, 79,77 $\text{kg CO}_2/\text{GJ}$ para o óleo e 50,63 $\text{kg CO}_2/\text{GJ}$ para o gás natural. A Tabela 1.1, desenvolvida por Tavares (2006), discrimina os conteúdos de combustíveis da geração termoelétrica e respectivos rendimentos utilizados para o cálculo da geração de CO_2 . O fator indicado na tabela corrige o total de energia consumido a partir do rendimento de cada fonte. Considerando a participação da termoelectricidade na produção da eletricidade brasileira, ao uso da eletricidade no Brasil relacionam-se emissões de CO_2 na ordem de 18,1 kg CO_2 por gigajoule (GJ) consumido.

Tabela 1.1. Geração de CO_2 por fontes primárias de termoelectricidade. FONTE: TAVARES, 2006

Termoelectricidade	Participação na matriz brasileira % ⁽²⁾	Eficiência	Fator	%	kg CO_2/GJ (Fontes) ⁽¹⁾	kg CO_2/GJ (Eletricidade)
Carvão	1,6	0,2	5	8	91,47	7,31
Óleo	2,9	0,3	3,3	9,57	79,77	7,63
Gás Natural	4,5	0,7	1,4	6,3	50,63	3,18
TOTAL						18,1

⁽¹⁾ IPCC, 1995. ⁽²⁾ Balanço Energético Nacional - BEN, (BRASIL, 2005).

Os edifícios de escritórios apresentam um intenso uso de energia para sua operação, decorrente da necessidade de uso de iluminação artificial, mesmo durante o dia, do uso de equipamentos de informática e do uso de ar condicionado. Estes três itens representam elementos chaves do consumo de eletricidade por este setor de edificações (PÉREZ-LOMBARD, 2007). Nos edifícios de escritórios brasileiros, o sistema de iluminação consome de 12 a 57% do gasto total de energia, o condicionamento de ar entre 25 e 75% e os equipamentos de 6 a 38%, dependendo da região do país. Em média, o consumo para estas edificações para condicionamento de ar é de 34% (BRASIL, 2007).

Os padrões de utilização dos escritórios resultam em significativos ganhos de calor internos, assim como as soluções de fachadas usualmente adotadas, com grandes panos envidraçados e desprovidas de proteções solares, o que provoca o aumento de ganhos e perdas térmicos consideráveis. Estes padrões impactam diretamente no significante uso de eletricidade por estes edifícios, já que o conforto térmico, parâmetro chave para promover um ambiente de trabalho saudável e produtivo, é tradicionalmente atingido a partir de extenso uso de energia para aquecimento ou resfriamento (TAYLOR et al, 2007). Por outro lado, um edifício projetado de forma a melhorar seu desempenho térmico poderá promover conforto com menor consumo de energia. A redução do uso de energia elétrica em edifícios de escritórios é fundamental para redução da emissão de gases do efeito estufa durante sua fase operacional (TAYLOR et al, 2007), já que mesmo no Brasil, com sua matriz primordialmente hidroelétrica, existem emissões de CO_2 relacionadas à geração de eletricidade.

Vários estudos foram desenvolvidos relacionando a otimização do desempenho energético de edifícios de escritórios a partir do aperfeiçoamento de suas fachadas. São pesquisas que aliam soluções de projeto de arquitetura e estratégias passivas, como a ventilação natural diurna e *night cooling* (ventilação noturna da massa térmica). Gratia e De Herde (2003), desenvolveram um estudo sobre projeto de edifícios de escritórios de baixo consumo energético a partir da análise, entre outros fatores, da influência da orientação solar das fachadas, dos índices de isolamento e massa térmica das vedações e do uso de níveis de ventilação adequada. Pirró e Roméro (2006), analisaram sete variações de fachadas para escritórios situados na cidade de São Paulo. As soluções estudadas incluíram fachadas 100% envidraçadas, parcialmente envidraçadas com uso de vedações em blocos cerâmicos ou concreto pré-moldado com diferentes revestimentos, fachada dupla ventilada e uso de proteções solares externas. Os resultados mais significativos deste estudo foram: a inclusão de *brisés-soleil* favoreceu a redução de 7 a 14% no consumo de energia elétrica dos escritórios, enquanto o uso da fachada dupla ventilada reduziu em 22% o consumo.

O presente estudo será desenvolvido a partir da análise do desempenho de diferentes soluções de fachadas para um edifício de escritórios em Curitiba, estado do Paraná, considerando as condições climáticas específicas da cidade. Dentro da variação do clima brasileiro, Curitiba se mostra atípica, por ser mais fria que a maioria das capitais brasileiras.

2 OBJETIVO

Considerando a estreita relação entre o desempenho energético dos envoltórios e as soluções arquitetônicas das mesmas, o presente estudo pretende analisar a influência do desempenho térmico das fachadas de edifícios de escritórios, na cidade de Curitiba, nas emissões de CO₂ decorrentes do consumo elétrico associado ao condicionamento de seus ambientes.

3 METODOLOGIA

Neste estudo, utilizou-se como método simulações computacionais do desempenho térmico de diferentes soluções de fachada para o mesmo andar tipo de escritórios. As simulações tiveram por objetivo determinar a energia de condicionamento (resfriamento e/ou aquecimento) necessária para manter a temperatura dos ambientes de escritórios em condições de conforto. A faixa de conforto foi considerada entre 17°C e 21°C, para o inverno, e 17°C e 26°C, para o verão.

O estudo então se desenvolveu em três etapas. Na primeira etapa, foram simulados os quatro modelos em dois períodos climáticos extremos em Curitiba, inverno (temperatura média igual a 5,8°C – dia típico nível 1%) e verão (temperatura média igual a 21,9°C – dia típico nível 10%). As temperaturas internas das zonas correspondentes aos ambientes de escritório foram ajustadas por simulação para a faixa de conforto determinada anteriormente, em cada modelo, nos dois períodos estipulados. Este ajuste resultou em demanda de energia térmica para aquecimento ou resfriamento dos espaços.

Na segunda etapa, a energia de condicionamento contabilizada, dada em kWh térmicos, foi transformada em energia elétrica por um índice de eficiência EER (*energy efficiency ratio*) para a condição de resfriamento. No caso de aquecimento, foi considerado o uso de resistência, então o valor da energia térmica é igual à elétrica. As emissões de CO₂ operacional, resultantes do consumo de energia elétrica relacionada ao condicionamento, foram calculadas conforme a equação:

$$\text{CO}_{2\text{operacional}} (\text{kg}) = \text{Consumo elétrico (KWh)} \times \text{fator conversão KWh/GJ} \times 18,1 \text{kgCO}_2/\text{GJ}$$

Na terceira etapa, foram escolhidos dois modelos para determinação da energia de condicionamento, elétrica e emissões operacionais de CO₂ para um ano inteiro. Cada mês do ano foi simulado considerando as temperaturas médias no intervalo de 90% de cada período. Simulações também foram realizadas para os níveis 1%, 2,5% e 5% do verão e do inverno. Os resultados totais consideraram o valor médio de gasto energético dos 12 meses para o período de 90% do ano, mas os níveis de inverno e verão para o período restante.

Os modelos selecionados para simulação de ano inteiro foram: o modelo 0, por representar a situação atual e a referência para as comparações no estudo, e o modelo 2. Este último (fachada dupla ventilada), foi escolhido por apresentar o maior acréscimo de materiais de construção dentre os modelos propostos. Esta etapa tem por objetivo comparar a economia de emissões operacionais do

modelo com melhor desempenho (representado pela fachada dupla) com o acréscimo das emissões embutidas de CO₂ (representado pelo maior uso de materiais na fachada). Este procedimento visa determinar se a intervenção proposta, com o objetivo de reduzir o consumo de energia para condicionamento, se justificará ao longo do tempo de ocupação, considerando que haverá um maior impacto inicial (emissões de CO₂ embutido dos materiais adicionados).

Para as simulações foi utilizado o software Mestre (SCHMID, 2006), em que o edifício é representado como sistema térmico do tipo concentrado (em múltiplas zonas e também em múltiplos nós sólidos) em regime transitente e mediante cômputo numérico da geometria solar. O software traz resultados para a simulação térmica e também a demanda de energia elétrica para aquecimento e resfriamento, de acordo com a faixa de conforto determinada. Os dados climáticos são da cidade de Curitiba, conforme Goulart (1998), para os períodos do ano estabelecidos no estudo.

3.1 Descrição do modelo para simulação

O modelo usado para as simulações deste estudo baseia-se no andar tipo de escritórios de um edifício existente, situado na zona central de Curitiba, com 11 pavimentos. A orientação do edifício é de 45° com relação ao norte geográfico, com duas fachadas iguais para nordeste e sudoeste e duas fachadas iguais para noroeste e sudeste.

Foi escolhido o sexto andar para realização das simulações. O andar tipo é dividido em oito escritórios, sendo quatro com 120m² de área útil e quatro com 178m² de área útil, com módulo de serviços, elevadores e escadas central. A relação WWR (*window to wall ratio*), isto é, a proporção de panos envidraçados com relação às vedações opacas, é de 50,5% nos escritórios menores e de 49% nos maiores. A redução desta proporção é limitada pela legislação de Curitiba, que exige que a área de iluminação mínima para este uso seja de 1/6 da área do compartimento. Como os ambientes deste edifício são grandes e muito profundos, entre 9 e 12 metros, a redução possível da WWR para melhorar seu desempenho energético demonstra-se insignificante para o estudo.

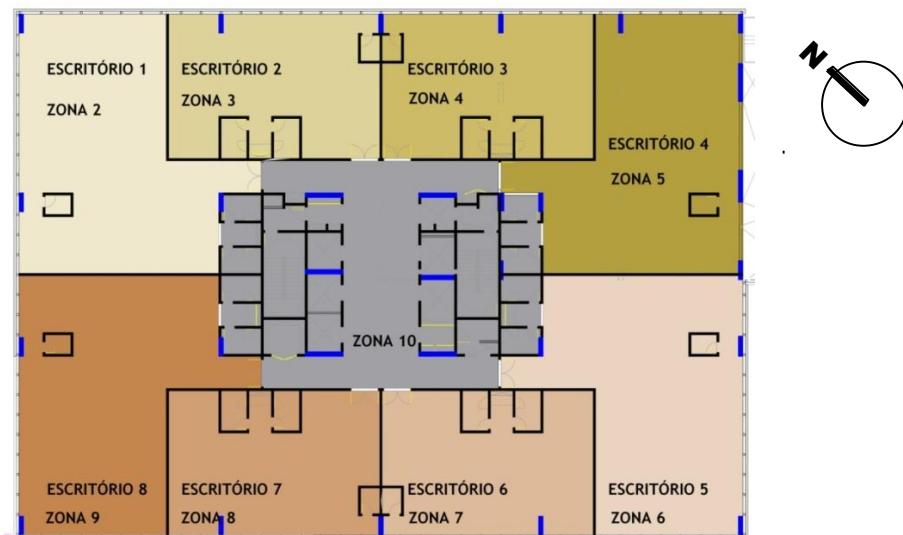


Figura 3.1: Planta do andar tipo com as divisões entre os escritórios, módulo de serviços e circulação e a designação das zonas para a simulação.

Características do modelo selecionado:

- Área total do pavimento tipo: 1.510 m² e oito escritórios por andar tipo.
- Pé-direito: 3,60 m (desconsiderado forro).
- Ocupação (baseada no índice da NBR 9077-2001): 1 pessoa/ 7 m² útil (ABNT, 2001).
- Horário de ocupação: 8h às 12h | 14h às 18h.
- Ganhos de calor internos: ocupação (130W por pessoa), iluminação (44W por luminária) e outros equipamentos (50W por pessoa). Total considerado: 38W/m² por hora de ocupação.

Cada escritório e o módulo de circulação e serviços central foram designados como zonas independentes (FIGURA 3.1). A zona 1 é considerada como o ar externo, portanto não está indicada no zoneamento do andar tipo. Observe-se que, no modelo que considera o uso da fachada dupla, uma

nova zona foi criada para este elemento, e as zonas adjacentes passam a se relacionar com esta e não mais com o ar externo.

3.2 Descrição das variações do modelo

As variações de fachada para as simulações, no total de quatro, são designadas e descritas da seguinte forma (FIGURA 3.2):

- Modelo 0: fachada com fechamentos em vidro laminado cinza e vedações em alvenaria revestida com 15 centímetros de espessura.
- Modelo 1: fachada com maior nível de isolamento, utilizando vidro duplo e vedações em alvenaria de 25cm de espessura.
- Modelo 2: fachada dupla ventilada, sendo a camada externa em vidro laminado, com ventilação natural da cavidade.
- Modelo 3: fachada com adição de brises externos em todas as orientações, modelo comercial, com 0,33 metros de largura e afastamento entre aletas de aproximadamente 0,35 metros, dispostos a 0,60 metros do fechamento dos escritórios.

O modelo 2, com fachada dupla ventilada, se divide em dois, diferentes entre si pela profundidade da cavidade - 1,2 metros (GRATIA e DE HERDE, 2007) e 0,6 metros (TORRES et al, 2007). A fachada dupla é da tipologia compartimentada por pavimento, e considera duas taxas de ventilação da cavidade: 0,25 e 2 m/s (TODOROVIC, 2001). Estas taxas foram calculadas pelo pesquisador em função da profundidade da cavidade e diferença de temperatura do ambiente que entra e o ar que sai deste espaço, em dois momentos diferentes. As aberturas para ventilação do espaço intersticial representam 15% da área de fechamento do mesmo (TORRES et al, 2007), na base e no topo da cavidade (FIGURA 3.2).

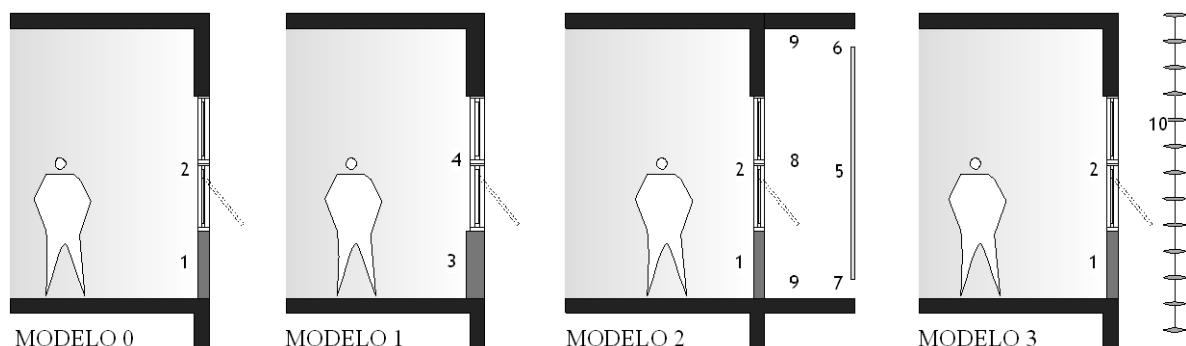


Figura 3.2 – Variações das fachadas: 1 – Alvenaria espessura 15cm. 2 – Esquadria vidro simples. 3 – Alvenaria espessura 25cm. 4 – Esquadria vidro duplo. 5 – Fechamento exterior em vidro. 6 – Abertura para exaustão do ar.. 7 – Abertura para insuflamento do ar externo. 8 – Cavidade intermediária. 9 – Marquise em concreto. 10 – Brises.

A cada uma das variações foram também adicionadas estratégias passivas de desempenho: ventilação natural e ventilação noturna, conforme o caso. O quadro 3.1 relaciona as variações simuladas.

Modelo	Estratégia					
	Ar condicionado	Ventilação noturna	Profundidade cavidade = 0,6m	Profundidade cavidade = 1,2m	Ventilação da cavidade = 0,25m/s	Ventilação da cavidade = 2,00m/s
Modelo 0	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
Modelo 1	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
Modelo 2	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Modelo 3	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não

Quadro 3.1: Relação dos modelos e das características consideradas para as simulações.

3.3 Limitações do estudo

O presente estudo considera as condições climáticas específicas de Curitiba. Não é considerada a influência de edificações vizinhas. O modelo de andar tipo de escritórios escolhido para as simulações

baseia-se em um edifício existente na cidade, não considerando variações tipológicas do estoque construído. No entanto, suas características são correlatas aos dados descritos no estudo de Pirró e Roméro (2006), baseados em um levantamento das tipologias de edifícios de escritórios realizado para a cidade de São Paulo, quanto à área do pavimento tipo (1.225 m^2), ocupação (7 m^2 por pessoa) e fontes de calor interno.

As simulações, considerando todos os modelos, abrangem dois períodos específicos do ano, inverno (representado pelas temperaturas do dia mais frio de julho) e verão (representado pelas temperaturas de um dia de fevereiro), totalizando 2 dias de consumo em horário comercial. Para o aquecimento e resfriamento dos ambientes, foi considerado uso de equipamentos elétricos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados em três seções, a primeira relatando o consumo de energia de resfriamento e aquecimento dos ambientes de cada modelo. A segunda parte apresenta o cálculo das emissões de CO_2 resultantes desta demanda. A terceira descreve os resultados da simulação de ano inteiro de dois modelos selecionados.

4.1 Consumo de energia de condicionamento dos modelos

Com relação à situação atual, representada pelo modelo 0, todos os outros modelos propostos apresentam valores menores de demanda de energia para o condicionamento dos ambientes. Os modelos 1 e 2 reduziram significativamente a demanda de aquecimento, chegando a zero no modelo 2 com ventilação da cavidade de $0,25\text{m/s}$. No entanto, todos os modelos, com exceção dos modelos com ventilação natural, apresentaram necessidade de resfriamento mesmo no período de inverno, principalmente nas zonas 2, 3, 4 e 9. O modelo 3, apesar de eliminar a necessidade de resfriamento neste período, aumentou a demanda por aquecimento. A tabela 4.1 relata comparativamente os resultados obtidos.

Tabela 4.1 – Resultados de energia de condicionamento das simulações por modelo e por período analisado.

MODELO	Inverno (kWh/dia) - aquecimento	Inverno (kWh/dia) - resfriamento	Inverno (kWh/dia) - subtotal	Redução uso de energia de cond. - inverno (%)	Verão (kWh/dia)	Redução uso de energia de cond. - verão (%)	TOTAL (kWh/dia)	Redução uso de energia de condicionamento - total (%)
modelo 0 -AC	300	324	624	0%	825,6	0%	1449,6	0%
modelo 0 -AC+VN+NC- total	294	0	294	53%	678	18%	972	33%
modelo 1 -AC+VN+NC- total	222	0	222	64%	576	30%	798	45%
modelo 2 -AC-D1-V1- total	0	138	138	78%	837	-1%	975	33%
modelo 2 -AC-D1-V1-NC- total	0	138	138	78%	438	47%	576	60%
modelo 2 -AC-D1-V2-NC- total	180	30	210	66%	216	74%	426	71%
modelo 2-AC-D2-V1-NC- total	0	282	282	55%	678	18%	960	34%
modelo 2 -AC-D1-V1-B- total	228	48	276	56%	588	29%	864	40%
modelo 2 -AC-D1-V1-B-NC	228	48	276	56%	246	70%	522	64%
modelo 3 -AC- total	624	72	696	-12%	540	35%	1236	15%
modelo 3 -AC+VN+NC- total	624	0	624	0%	312	62%	936	35%

Legenda: AC: ar condicionado; VN: ventilação natural; NC: ventilação noturna; D1: cavidade com profundidade igual a $1,20\text{ m}$; D2: cavidade com profundidade igual a $0,60\text{ m}$; V1: taxa de ventilação da cavidade igual a $0,25\text{m/s}$; V2: taxa de ventilação da cavidade igual a 2m/s ; B: brise externo.

A estratégia da ventilação noturna da massa térmica do edifício, quando utilizada nas simulações do período de verão, resultou em melhora significativa do desempenho energético de todos os modelos, inclusive quando associada ao modelo 0. Com o uso de ventilação natural diurna e noturna, no inverno, houve decréscimo da demanda em 33%. Os escritórios menores têm 12 m^2 de janelas

operáveis, e foi considerada como taxa de ventilação noturna 1,6 m/s médios. Para os maiores, que têm 23 m² de janelas operáveis, foi adotada a taxa de 3 m/s, sendo que estes possibilitam ventilação cruzada. Para o modelo de fachada dupla, a taxa de ventilação noturna considerada foi 1 m/s. Esses valores são taxas de projeto, a maneira de obtê-las (natural ou mecânica) deverá ser estudada com maior profundidade.

O modelo 1, com maior índice de isolamento e de massa térmica dos fechamentos, quando associado à estratégia de ventilação noturna, apresentou melhora no desempenho dos ambientes mesmo no período de verão. A redução no consumo final de 45%. No inverno, a redução da necessidade de aquecimento dos ambientes caiu em 26%, e do resfriamento no verão na taxa de 30%.

Os melhores desempenhos estão associados ao uso da fachada dupla ventilada. Sem a ventilação noturna, o modelo 2 apresentou desempenho semelhante ao modelo 0 no verão. No entanto, quando considerada o uso da estratégia, a redução no consumo com relação à situação 0 foi de 60%, para a taxa de ventilação da cavidade de 0,25m/s, e de 71% considerando a velocidade do ar em 2 m/s. Quando associado o uso de brises no espaço intersticial da cavidade, o desempenho energético chega a ser 70% menor que o do modelo 0, no verão, na velocidade de 0,25m/s. Porém, o modelo de fachadas de dupla pele é sensível com relação às dimensões da cavidade. Para a profundidade de 0,6 m, a taxa de consumo passa a ser 34% menor. A grande diferença entre a fachada dupla ventilada, com relação ao outros modelos, se deu no estudo por dois fatores. O primeiro, é a redução de até 78% no uso de energia no inverno, pela eliminação da necessidade de aquecimento dos ambientes, quando a velocidade do ar é de 0,25m/s. O segundo fator é a variação da velocidade da ventilação da cavidade, que, ao atingir 2m/s, resulta em 74% a menos de uso de eletricidade para o condicionamento no verão, considerado o uso de ventilação noturna.

O modelo 3 apresenta desempenho energético muito bom no período do verão, com redução de consumo de 35%. No inverno, a necessidade de resfriamento dos ambientes é nula, se considerada a estratégia de ventilação natural diurna, no entanto, o aquecimento artificial deve ser bem maior (12% de aumento com relação ao modelo 0). Com a utilização de ventilação noturna, o gasto de energia total se reduz em 35%, contra 15% sem o uso da estratégia.

4.2 Emissões de CO₂ dos modelos

A partir da determinação da demanda de energia de condicionamento por modelo, considerando os períodos escolhidos, foi possível calcular as emissões de CO₂ decorrentes desta operação.

Tabela 4.2 – Resultados de emissões de CO₂ por modelo.

Modelo	GJ (condicion. térmico)	Energia elétrica – GJ	Kg CO ₂ /GJ eletricidade*	Total emissões CO ₂ (kg)	Redução de emissões de CO ₂
modelo 3 -AC- total	4,4	3,2	18,1	58,7	-22%
modelo 3 -AC+VN+NC- total	3,4	2,7	18,1	48,4	-1%
modelo 0 -AC	5,2	2,6	18,1	47,9	0%
modelo 0 -AC+VN+NC- total	3,5	2,0	18,1	35,9	25%
modelo 2-AC-D2-V1-NC- total	3,5	1,9	18,1	35,1	27%
modelo 2 -AC-D1-V1-B- total	3,1	1,8	18,1	32,5	32%
modelo 2 -AC-D1-V1- total	3,5	1,6	18,1	29,7	38%
modelo 1 -AC+VN+NC- total	2,9	1,6	18,1	28,7	40%
modelo 2 -AC-D1-V1-B-NC- total	1,9	1,3	18,1	24,1	50%
modelo 2 -AC-D1-V1-NC- total	2,1	1,1	18,1	19,8	59%
modelo 2 -AC-D1-V2-NC- total	1,5	1,1	18,1	19,0	60%

Legenda: AC: ar condicionado; VN: ventilação natural; NC: ventilação noturna; D1: cavidade com profundidade igual a 1,20 m; D2: cavidade com profundidade igual a 0,60 m; V1: taxa de ventilação da cavidade igual a 0,25m/s; V2: taxa de ventilação da cavidade igual a 2m/s; B: brise externo.* (TAVARES,2006)

A energia do condicionamento, dada em kWh térmicos, foi contabilizada e transformada em energia elétrica por um índice de eficiência EER (*energy efficiency ratio*) para a condição de resfriamento. No caso de aquecimento, foi considerado o uso de resistência, então o valor da energia térmica é igual à elétrica. O índice de eficiência para a energia de resfriamento utilizada baseia-se em Lamberts, Dutra e

Pereira (2004), onde o fator de conversão é 9 BTU/h/W (equivalente a 2,64 kWh térmicos por kWh elétrico). A tabela 4.2 relaciona os resultados de emissões de CO₂ calculados, transformados em GJ e ordenados do pior desempenho para o melhor.

Com relação às emissões de CO₂, os modelos 1 e 2, considerando a estratégia da ventilação noturna, apresentaram os melhores desempenhos, seguidos do modelo 2 (sem ventilação noturna), modelo 0 e 3. Os modelos que demandam maiores quantidades de energia para aquecimento são mais impactantes. O índice de eficiência dos equipamentos para refrigeração reduz o consumo de eletricidade para atingir o condicionamento necessário, e consequentemente as emissões de CO₂ relacionadas.

4.3 Energia de condicionamento e emissões de CO₂ de modelos para o ano inteiro

Para a terceira etapa do estudo, foram selecionados dois modelos para determinação da energia de condicionamento, elétrica e emissões de CO₂ para o ano inteiro. Cada mês do ano foi simulado considerando suas temperaturas médias. Simulações também foram realizadas para os níveis 1%, 2,5% e 5% do verão e do inverno. Os resultados totais consideraram o valor médio de gasto energético para o período de 90% do ano, sendo os 10% restantes do ano representados pelos demais níveis do inverno e do verão. Esse procedimento buscou chegar a uma estimativa dos resultados totais de um ano. A tabela 4.3 relaciona a demanda por energia de condicionamento dos modelos 0 e modelo 2 (fachada dupla ventilada com cavidade com profundidade igual a 1,20 m e taxa de ventilação da cavidade igual a 0,25m/s).

Tabela 4.3 – Resultados de energia de condicionamento para o ano.

MODELO	MÉDIA DE CONDIC. 12 MESES (kWh/dia)	SUBTOTAL 1 - 90% ANO (kWh)	INVERNO NÍVEL 1% (kWh/dia)	INVERNO NÍVEL 2,5% (kWh/dia)	INVERNO NÍVEL 5% (kWh/dia)	SUBTOTAL INVERNO -5% ANO (kWh)	VERÃO NÍVEL 1% (kWh/dia)	VERÃO NÍVEL 2,5% (kWh/dia)	VERÃO NÍVEL 5% (kWh/dia)	SUBTOTAL VERÃO - 5% ANO (kWh)	TOTAL ENERGIA CONDIC. ANO (kWh)
modelo 0 -AC	580,75	190.776,4	624	621	585	11.015,7	1044	966	891,6	17.235,3	219.027,4
modelo 2 - AC-D1-V1	532,75	175.008,4	138	216	273	4.177,4	936	924	900	16.687,8	195.873,6

Legenda: AC: ar condicionado; D1: cavidade com profundidade igual a 1,20 m; V1: taxa de ventilação da cavidade igual a 0,25m/s.

Considerando o ano inteiro, a redução da energia de condicionamento do modelo 2, com relação ao modelo 0, foi de 11%. Foi utilizado o mesmo índice de eficiência para a condição de resfriamento para o cálculo das emissões de CO₂ totais a partir dos resultados de kWh térmicos. A tabela 4.4 relaciona as emissões de CO₂ por modelo.

Tabela 4.4 – Resultados de emissões anuais de CO₂ por modelo.

Modelo	Condicionamento térmico - GJ	Energia elétrica - GJ	Kg CO ₂ /GJ eletricidade*	Total CO ₂ (kg)	Redução de CO ₂
modelo 0 -AC	788	348	18,1	6296,0119	0%
modelo 2 -AC-D1-V1- total	705	291	18,1	5269,996	16%

Legenda: AC: ar condicionado; D1: cavidade com profundidade igual a 1,20 m; V1: taxa de ventilação da cavidade igual a 0,25m/s.* (TAVARES,2006)

A redução das emissões do modelo 2, com relação ao modelo 0, foi de 16%. A diferença se deu novamente devido ao índice de eficiência dos equipamentos para refrigeração, que reduz o consumo de eletricidade para atingir o condicionamento necessário, e consequentemente as emissões de CO₂ relacionadas.

O uso da fachada dupla ventilada implica no aumento da energia e CO₂ embutidos do edifício. A partir de uma análise de ciclo de vida energética, calcularam-se estes valores para o acréscimo de material relacionado à fachada dupla - vidro do envoltório adicional e concreto para a marquise que

compartimenta a cavidade (TABELA 4.5). O conteúdo de CO₂ do material concreto foi determinado a partir do consumo de energia de fabricação, transporte e desperdício, além da geração oriunda das reações químicas inerentes do processo de fabricação do cimento (TAVARES e LAMBERTS, 2008). O conteúdo de CO₂ do material vidro foi obtido pela metodologia do IPCC (2006).

Tabela 4.5 – Totais de emissões embutidas adicionais de CO₂ do modelo 2.

Material	Qtde (kg)	Índice kgCO ₂ /kg _{mat}	Total kgCO ₂	Total tCO ₂
Concreto fck= 20 MPa	44656,80	0,15	6755,5654	6,76
Vidro liso transparente 10mm	12337,25	0,11	1357,10	1,36
TOTAL CO₂ EMBUTIDO - FACHADA DUPLA			8112,6629	8,11

Considerando a diferença entre as emissões operacionais dos modelos 0 e 2 (igual a 1,03 tCO₂) e as emissões embutidas adicionais do modelo 2, a fachada dupla passará a ser menos impactante que a situação atual em aproximadamente 8 anos de uso do edifício (FIGURA 4.1).

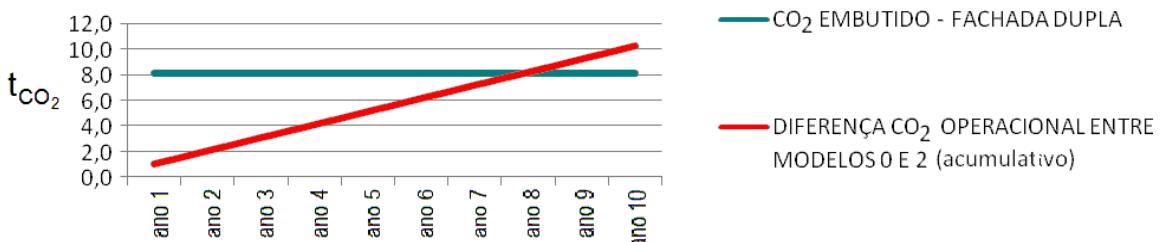


Figura 4.1: Comparação entre CO₂ embutido adicional do modelo 2 e diferença de CO₂ operacional entre modelos

5 CONCLUSÕES

Este estudo apresentou um método de análise preliminar de variações possíveis de soluções de fachadas, associadas às estratégias passivas de ventilação natural e noturna, para o mesmo edifício, com o objetivo de identificar melhorias no seu desempenho quanto aos impactos de gasto energético para condicionamento e emissões de CO₂ relacionadas. A solução de envoltório mais adequada ao edifício será dada pelo detalhamento da alternativa com melhor desempenho de acordo com as necessidades de condicionamento levantadas na primeira etapa do trabalho. No caso do edifício estudado, a área do pavimento e a geração de calor interno demandaram intenso uso de energia de condicionamento para refrigeração a fim de manter condições de conforto, mesmo no inverno nas zonas com maior incidência de radiação solar. No entanto, foi verificada também significativa demanda por aquecimento no período de inverno, o que resultou em maiores impactos de emissões CO₂ nas alternativas com menor isolamento da fachada.

As simulações demonstraram diferenças significativas entre os modelos quanto ao consumo de energia para garantir conforto térmico nos ambientes e quanto às emissões de CO₂ decorrentes. A utilização de recursos de sombreamento (modelo 3), para o período de inverno, não apresentou bom desempenho com relação às emissões de CO₂, apesar da redução de demanda no verão. Os modelos 1 e 2 mostraram-se com melhor desempenho geral, resultando em reduções de emissões de CO₂ entre 27% e 60%, conforme a estratégia associada.

As simulações de ano inteiro para dois modelos mantiveram a expectativa de melhoria do desempenho entre a situação base e a proposta (representada pelo modelo 2), com redução de 11% na demanda de energia de condicionamento e de 16% de emissões de CO₂. Comparativamente, considerando a diferença entre as emissões operacionais entre os modelos 0 e 2, e as emissões embutidas adicionais do modelo 2, a fachada dupla passará a ser menos impactante em aproximadamente 8 anos de uso do edifício.

A utilização da estratégia de ventilação noturna da massa térmica do edifício, melhorou significativamente o desempenho energético de todos os modelos, inclusive quando aplicada à situação base. O modelo 1, que associa maior isolamento e maior massa térmica, somente apresenta redução do consumo para condicionamento no verão se utilizar este recurso.

Com a crescente demanda por edificações mais sustentáveis ambientalmente, as questões relacionadas à melhoria do desempenho energético dos edifícios de escritórios ganham importância para as decisões arquitetônicas e para as exigências deste mercado. As emissões de dióxido de carbono, gás relacionado ao efeito estufa, são um dos parâmetros reconhecidos internacionalmente para medir a sustentabilidade ambiental de um edifício. Por ser objetivo, este parâmetro auxilia arquitetos, construtores e empreendedores do ramo imobiliário e usuários nas decisões sobre aspectos dos edifícios que irão influenciar a sustentabilidade do mesmo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9077 – Saídas de emergência em edifícios.** Rio de Janeiro, 2001.
- BRASIL**, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2005: Ano base 2004. Brasília, 2005.
- ____ Regulamentação para Etiquetagem Voluntária do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Ministério de Minas e Energia, PROCEL Edifica e LabEEE, 2007. Disponível: em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm. Acesso em: 7 nov. 2008.
- ____ Ministério das Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2008: Ano base 2007. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro , 2008.
- ____ Ministério das Minas e Energia, Secretaria de Energia. Resenha energética brasileira. Brasília, 2009.
- GOULART, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras.** 2º edição. Florianópolis : Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998. 345.
- GRATIA, Elisabeth; HERDE, Andrè De. **Design of low energy office buildings.** Energy and Buildings 35, p. 473-491, 2003.
- ____ **Are energy consumptions decreased with the addition of a double skin.** Energy and Buildings 39, p. 605-619, 2007.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Geneva, Switzerland.1995.
- ____ **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Geneva, Switzerland.2006.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura.** 2ª ed. Editora PW - São Paulo, 2004 - 192 p.
- PÉREZ-LOMBARD, L; ORTIZA, J.; POUT, C. **A review on buildings energy consumption information.** Energy and Buildings, 2007
- PIRRÓ, L. F. S.; ROMÉRO, M. A. **Office buildings façades: the relationship between costs and performance.** PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006.
- SCHMID, A. L. Software Mestre. 2006
- TAYLOR, P.; FULLER, R.J.; LUTHER, M.B. **Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building.** Energy and Buildings 40 (2008) 793–800
- TAVARES, S. F. **Metodologia para análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras.** Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.
- TAVARES, S. F; LAMBERTS, R. . **CO₂ embutido em edificações residenciais brasileiras.** ENTAC, 2008.
- TODOROVIC, B., & MARIC, B. **The influence of double façades on building heat losses and cooling loads.** Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade University, Belgrade, Yugoslavia.
- TORRES, M. et al. **Double skin façades – Cavity and exterior openings dimensions for saving energy on Mediterranean climate.** Building Simulation, 2007.