INFLUÊNCIA DA SUJEIRA NOS VIDROS NO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS: ESTUDO DE CASO EM TRÊS CIDADES BRASILEIRAS

Bruna Just Meller (1); Enedir Ghisi (2)
(1) Mestre, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, brunajmeller@outlook.com, Universidade Federal de Santa Catarina
(2) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, enedir.ghisi@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Cx Postal 476, Florianópolis–SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721 5184

RESUMO
Considerando a ampla variedade de opções de vidros disponíveis no mercado, é imprescindível selecionar aqueles que apresentem propriedades que sejam compatíveis com os requisitos energéticos da edificação, uma vez que suas características podem influenciar significativamente o consumo de energia. A sujeira nos vidros é um fator importante que pode afetar a transmissão de energia através do vidro, influenciando na carga térmica do edifício e no consumo de energia com climatização. Por meio de simulação computacional no software EnergyPlus, analisou-se o consumo de energia com ar-condicionado em três cidades (Florianópolis, Porto Alegre e Cuiabá) considerando quatro tipos de vidro com diferentes transmitâncias solares e níveis variados de sujeira. Para as três cidades, o aumento da sujeira levou a uma redução no consumo de energia devido a diminuição na transmitância solar. Além disso, quanto maior a transmitância solar do vidro, maior a diferença no consumo de energia entre o cenário com vidro limpo e o cenário de ambiente muito sujo. O vidro comum teve a maior redução no consumo de energia em ambientes muito sujos, com queda de 8,26% em Florianópolis, 6,47% em Porto Alegre e 5,28% em Cuiabá.
Palavras-chave: vidros, desempenho energético, simulação computacional.

ABSTRACT
Considering the wide variety of glass available on the market, it is essential to select those that have properties compatible with the energy requirements of the building, since their characteristics can significantly influence energy consumption. Dirt on glass surfaces is an important factor to be considered as it can affect the transmission of energy through the glass, impacting daylight and solar heat gain in the environment, and consequently influencing the building's thermal load and energy consumption for air-conditioning. Through computational simulation using the EnergyPlus software, this study analysed the energy consumption of air-conditioning in three Brazilian cities (Florianópolis, Porto Alegre, and Cuiabá) considering four types of glass with different solar transmittance and varied levels of dirt. The results showed that, for the three cities, an increase in dirt led to a reduction in energy consumption due to a decrease in solar transmittance, resulting in lower heat transmission through the glass and a reduction in thermal load. Furthermore, the higher the solar transmittance of the glass, the greater the difference in energy consumption between the clean glass scenario and the very dirty environment scenario. The clear glass scenario had the highest reduction in energy consumption in very dirty environments, with a decrease of 8.26% in Florianópolis, 6.47% in Porto Alegre, and 5.28% in Cuiabá.
Keywords: glasses, energy performance, computational simulation.

1. INTRODUÇÃO

As condições térmicas internas dos ambientes de um edifício são influenciadas pelos componentes que compõem sua envoltória, como paredes, aberturas, telhados, dispositivos de sombreamento externo. Pesquisas têm sido conduzidas em diferentes contextos bioclimáticos com o objetivo de analisar as trocas de calor nas envoltórias, visando otimizar a construção do envelope construtivo e aprimorar o desempenho térmico e energético das edificações.

No contexto urbano, é frequente observar que os edifícios de escritórios possuem extensas áreas envidraçadas em suas fachadas, as quais permitem maior transparência, possibilidade de integração visual com o exterior, admissão de luz natural, além de serem um atrativo estético sob o ponto de vista arquitetônico (SADINENI; MADALA; BOEHM, 2011; SHAMERI et al., 2011). Entretanto, as áreas envidraçadas podem gerar aumento significativo da carga térmica interna da edificação, resultando em desconforto térmico e elevando o consumo de energia com sistemas de climatização artificial, aumentando assim o consumo energético durante a fase operacional da construção.

Considerando a grande diversidade de materiais transparentes e translúcidos disponíveis atualmente, é importante fazer uma escolha adequada que leve em conta as diversas características desses materiais. Um dos pontos que afeta o desempenho dos vidros nos edifícios é a sujeira aderida às faces da placa. Os vidros estão sujeitos a poluição, empoeiramento e outros fatores naturais que podem levar à acumulação de sujeira em suas superfícies. Segundo Verney-Carron et al. (2012), a intensidade da sujidade está ligada à natureza dos poluentes presentes no ambiente (rurais, urbano e industrial). Além disso, a aderência da sujeira à superfície do vidro é fortemente influenciada pelas condições climáticas (STRUGAJ; HERRMANN; RÄDLEIN, 2021).

O depósito de sujeira nos vidros resulta em degradação das suas propriedades ópticas intrínsecas (perda de transparência), além de conduzir a um prejuízo visual e estético (VERNEY-CARRON et al., 2012). Em relação à perda de transparência, a sujeira pode alterar a transmissão de energia através do vidro, afetando a iluminação natural e o ganho de calor solar dos ambientes, o que, por sua vez, influencia na carga térmica do edifício e o consumo de energia com climatização.

Ghosh e Neogi (2016) analisaram o impacto da poeira e outros fatores ambientais na transmissão de calor através de vidros em zonas climáticas quentes e úmidas. Os vidros foram ensaiados em quatro ângulos de inclinação (0°, 30°, 60° e 90°). Observou-se que a redução da transmitância foi maior para o vidro inclinado a 0° e menor para o inclinado a 90°. Ghazi, Ip e Sayigh (2013) instalaram amostras de vidro em sete ângulos de inclinação no Reino Unido e o efeito da poeira foi monitorado. Devido às chuvas frequentes, a redução máxima da transmitância foi de apenas 5% após quatro semanas de exposição.

Dessa forma, a escolha adequada dos materiais transparentes e translúcidos utilizados nas fachadas dos edifícios é fundamental para garantir um bom desempenho térmico e energético. O nível de sujeira aderido às superfícies dos vidros é um fator importante a ser considerado, pois afeta a iluminação natural e o ganho de calor solar dos ambientes.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é analisar a influência do nível de acumulação de sujeira nos vidros no desempenho energético de um edifício de escritórios para as cidades de Porto Alegre – RS, Florianópolis – SC e Cuiabá - MT, a partir da simulação no software EnergyPlus.

3. MÉTODO

O método deste trabalho está dividido em duas etapas:

1. Definição de um modelo computacional representativo do pavimento tipo de uma edificação de escritórios no programa EnergyPlus versão 22-2-0;

2. Determinação dos cenários para simulação a partir da escolha dos vidros e dos ambientes a qual a edificação será exposta.

3.1. Modelo computacional

A fim de atender aos objetivos deste estudo, realizaram-se simulações computacionais de desempenho energético de um pavimento tipo de um edifício de escritórios. As simulações foram conduzidas durante um período de um ano utilizando o programa EnergyPlus versão 22-2-0 e os arquivos climáticos SWERA de Florianópolis – SC, Porto Alegre – RS e Cuiabá – MT. Nesse modelo, o edifício foi considerado isolado, sem edifícios ao redor dele ou outros elementos que pudessem influenciar seu comportamento.

O modelo base da edificação apresenta configuração quadrangular de 30 x 30 metros, pé direito de 2,80 metros e é subdividido em cinco zonas, sendo quatro de escritórios e um núcleo central, conforme mostra a Figura 1. As paredes externas são de alvenaria de blocos cerâmicos, as divisórias internas são de drywall e o piso e a cobertura são compostos de lajes de concreto. Com a finalidade de analisar isoladamente o pavimento tipo, piso e cobertura foram considerados como superfícies adiabáticas. A Tabela 1 descreve as espessuras e as propriedades térmicas dos materiais da envoltória, utilizados em todas as simulações. Para as demais propriedades, foi utilizado o valor padrão fornecido pelo programa.

Janelas foram modeladas em toda a extensão das fachadas com 0,7 metros de peitoril e 2,1 metros de altura de vidro, resultando em percentual de abertura de 60%. As janelas não possuem dispositivos de sombreamento, e os vidros variaram de acordo com os cenários estabelecidos na seção 3.2.

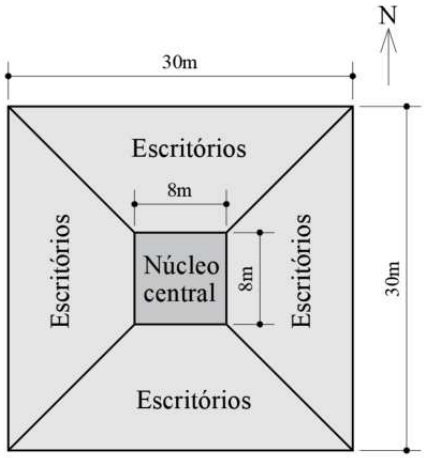


Figura 1 – Croqui da planta baixa do pavimento tipo do edifício.

Tabela 1 – Dados físicos dos materiais da envoltória do modelo simulado.

Elemento	Material	Espessura (m)	Densidade (kg/m³)	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (J/kg.K)
Paredes externas	Argamassa	0,025	2000	1,15	1000
	Bloco cerâmico	0,14	3732	0,90	920
	Câmara de ar[1]	0,02	-	-	-
	Bloco cerâmico	0,14	3732	0,90	920
	Argamassa	0,025	2000	1,15	1000
Paredes internas	Placa de gesso	0,00125	875	0,35	840
	Isolante[2]	0,005	-	-	-
	Placa de gesso	0,00125	875	0,35	840
Piso	Piso cerâmico	0,001	1600	0,90	920
	Concreto	0,20	2200	1,75	1000
Cobertura	Concreto	0,20	2200	1,75	1000

Notas: (1) resistência térmica de 0,16 m².K/W. (2) resistência térmica de 1,111 m².K/W.

Os escritórios funcionam das oito horas às 20h de segunda-feira a sexta-feira e das oito horas às quatorze horas aos sábados. Com exceção do núcleo central, que é destinado a ocupação transitória, todas as outras zonas foram artificialmente condicionadas ao longo de todo o período simulado a partir de um sistema de condicionamento do tipo split. Neste modelo, não foi considerada a integração de luz natural com artificial. Outros parâmetros adotados para a simulação estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros adotados na simulação.

Parâmetro	Ambiente	
	Escritórios	Núcleo central
Densidade de ocupação	8 m²/pessoa	25 m²/pessoa
Densidade de potência de iluminação	10,7 W/m²	8 W/m²
Densidade de potência de equipamentos	16 W/m²	-
Ar-condicionado	Splits com COP 3,00 W/W Renovação de ar: 7,5 l/s/pessoa	-
Taxa de infiltração	0,5 renovação total a cada hora	1 renovação total a cada hora

As Figuras 2, 3 e 4 apresentam as rotinas adotadas nos escritórios para a ocupação, uso da iluminação e uso dos equipamentos, respectivamente. No núcleo central, a rotina de ocupação e iluminação é de 100% nos períodos de funcionamento do edifício.

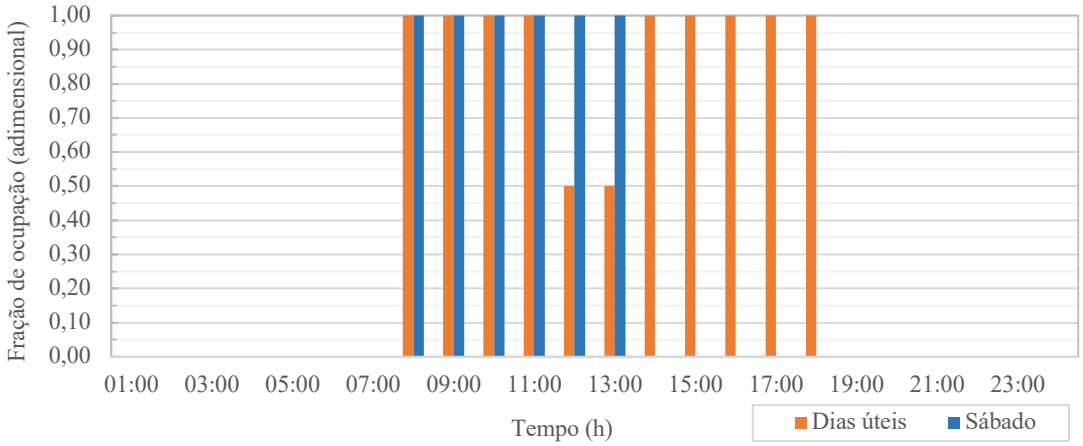


Figura 2 – Rotina de ocupação nos escritórios.

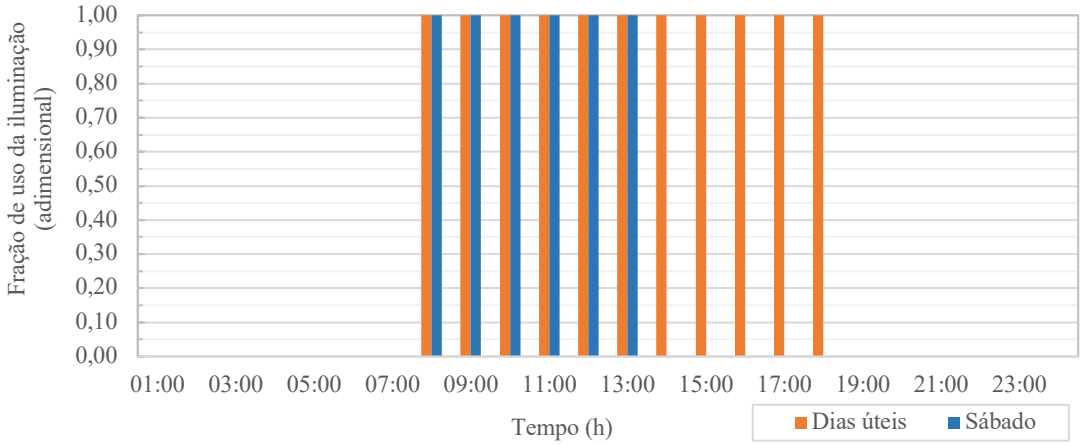


Figura 3 – Rotina de uso da iluminação nos escritórios.

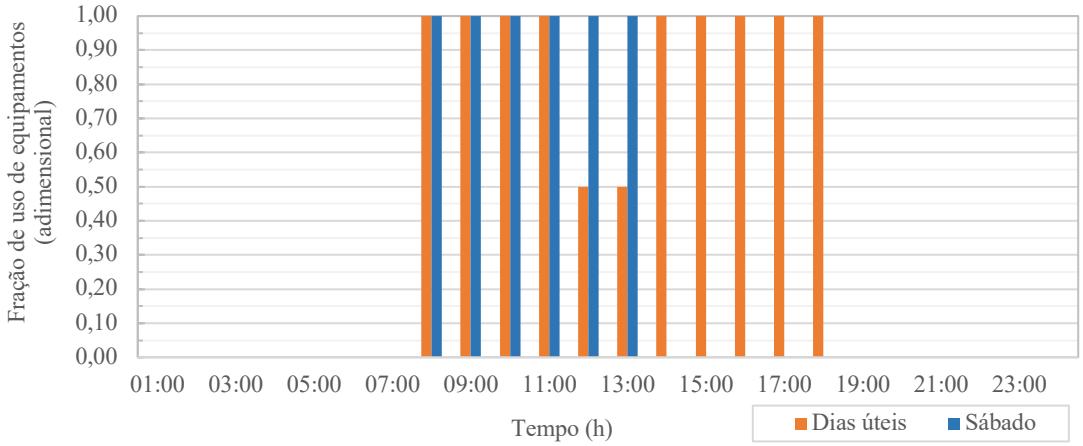


Figura 4 – Rotina de uso de equipamentos nos escritórios.

Em todas as simulações, as configurações dos ambientes foram mantidas constantes, com exceção dos vidros e da sujeira aderida a eles, que variaram conforme os cenários determinados na seção 3.3.

3.3. Determinação dos cenários para simulação

A partir do modelo base, foram criados dezesseis cenários que variaram quanto ao vidro adotado nas janelas e ao ambiente no qual a edificação está exposta, a fim de variar o nível de sujeira aderida ao vidro.

Para as janelas, foram selecionados três tipos de vidros laminados de controle solar com diferentes valores de transmitância solar, além do vidro comum monolítico, usado como referência. As propriedades térmicas e ópticas dos vidros estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades dos vidros.

Propriedades	**Vidros**			
	Comum	**Light Blue**	**Neutral**	**Silver**
Espessura (mm)	6,00	8,00	8,00	8,00
Transmitância solar (adimensional)	0,82	0,48	0,27	0,15
Refletância solar frente (adimensional)	0,07	0,12	0,26	0,29
Refletância solar trás (adimensional)	0,07	0,09	0,20	0,27
Transmitância visível (adimensional)	0,89	0,56	0,38	0,17
Refletância visível frente (adimensional)	0,08	0,14	0,21	0,34
Refletância visível trás (adimensional)	0,08	0,10	0,15	0,27
Emitância frente (adimensional)	0,84	0,84	0,84	0,84
Emitância trás (adimensional)	0,84	0,84	0,84	0,84
Transmitância térmica (W/m² K)	5,79	5,63	5,63	5,63
Fator Solar (adimensional)	0,84	0,57	0,38	0,28

Para simular a presença de sujeira nos vidros, foi empregada a função "*Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance*" no software EnergyPlus, que multiplica a transmitância solar e visível (incidência normal) do vidro por um fator de correção. Além da condição em que os vidros estão limpos, em que o fator de correção é igual a um, foram avaliados mais três cenários, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Fatores de correção de sujeira para transmissão solar e visível.

Tipo de local	**Fator de correção**
Não industrial	0,9
Industrial	0,7
Bastante sujo	0,6

Para avaliar os efeitos da sujeira nos vidros no desempenho energético do edifício, foram calculados os consumos de energia anuais com ar-condicionado para cada cenário.

4. RESULTADOS

A Figura 5 apresenta o consumo de energia com ar-condicionado em Florianópolis. Nela, observou-se redução no consumo para os quatro vidros simulados devido ao aumento da sujeira nos vidros. Isso se deu devido à diminuição da transmitância solar dos vidros, o que ocasionou menor transmissão de calor através do vidro e consequentemente redução da carga térmica.

Nos cenários simulados, observou-se que quanto maior a transmitância solar do vidro, maiores foram as diferenças entre os consumos dos cenários de vidro limpo (fator de correção igual a um) em relação ao ambiente bastante sujo (fator de correção igual a 0,6). É importante ressaltar que os valores absolutos de transmitância solar dos vidros variam consideravelmente, o que significa que quando esses valores são multiplicados por um coeficiente de correção, o valor absoluto resultante pode apresentar uma grande diferença em relação ao valor original. Por exemplo, no vidro comum, com transmitância solar de 0,82 multiplicado por um fator de correção de 0,6 resulta em uma transmitância solar de 0,49, que é significativamente diferente do valor original.

Sendo assim, para Florianópolis, a maior diferença foi observada nos cenários simulados com vidro comum, que apresentou redução de 8,26% no consumo no ambiente bastante sujo em relação ao cenário com vidro limpo. No vidro Silver, cuja transmitância solar é 0,15, o consumo de energia no cenário de ambiente bastante sujo foi cerca de 2% inferior ao ambiente com vidro limpo.

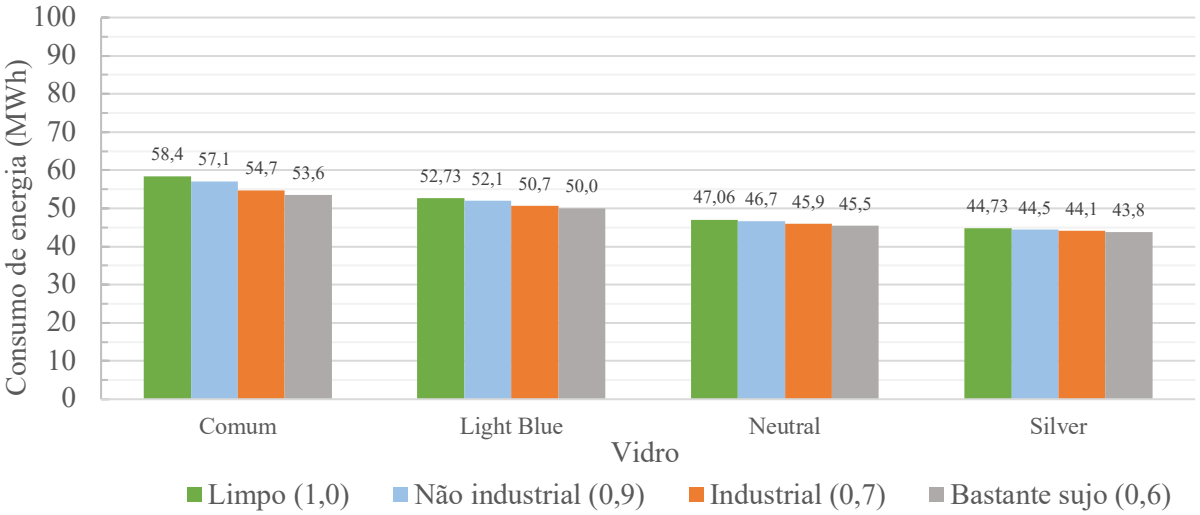


Figura 5 – Consumo de energia com ar-condicionado – Florianópolis

A Figura 6 mostra o consumo de energia com ar-condicionado em Porto Alegre. Assim como em Florianópolis, o aumento da sujeira nos vidros causou redução no consumo para os quatro vidros simulados. Nesses cenários, repetiu-se a tendência observada em Florianópolis, de que quanto maior a transmitância solar do vidro, maiores as diferenças entre consumos entre os cenários de vidro limpo em relação ao ambiente bastante sujo.

Contudo, em Porto Alegre, as diferenças entre os cenários foram menores do que em Florianópolis, visto que o clima da cidade é caracterizado por temperaturas mais amenas, o que diminui o consumo de energia de modo geral. Além disso, a cidade também apresenta menor incidência de radiação solar direta do que em Florianópolis, o que também pode ter contribuído para a menor variação nos resultados. No cenário com vidro comum, houve redução no consumo de 6,47% no ambiente bastante sujo em relação ao cenário com vidro limpo.

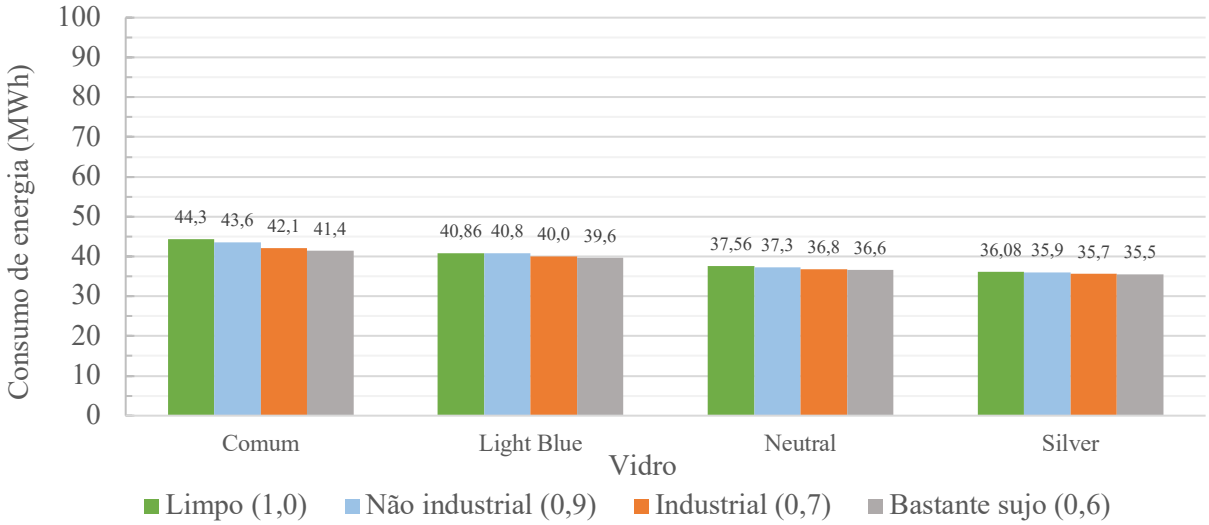


Figura 6 – Consumo de energia com ar-condicionado – Porto Alegre

A Figura 7 apresenta o consumo de energia com ar-condicionado para Cuiabá, que seguiu a tendência observada nas cidades anteriores. Devido às temperaturas mais elevadas em Cuiabá em comparação com Florianópolis e Porto Alegre, os cenários simulados resultaram em consumo de energia mais alto. No entanto, as variações para um mesmo tipo de vidro foram menores.

No cenário com vidro comum, houve redução no consumo de 5,28% no ambiente bastante sujo em relação ao cenário com vidro limpo. Sabe-se que a radiação solar não é a única fonte de ganho de calor através do vidro, uma vez que as superfícies externas do vidro também podem absorver calor do ambiente externo. Em Cuiabá, as trocas térmicas entre o interior e exterior da edificação são mais intensas devido às altas temperaturas, o que reduz a influência da sujeira nos vidros na transmissão de calor e, consequentemente, na redução do consumo de energia.

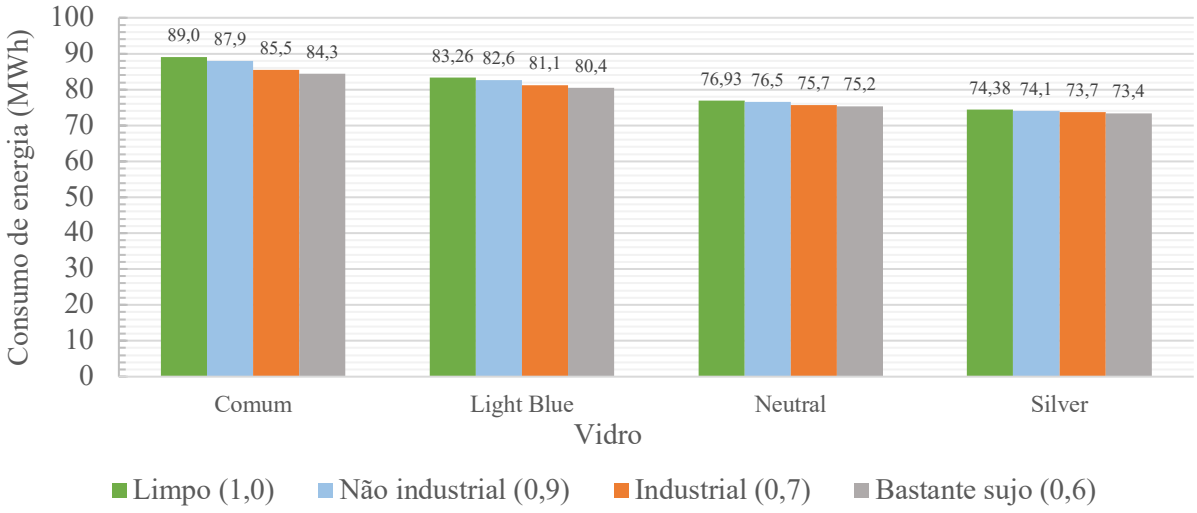


Figura 7 – Consumo de energia com ar-condicionado – Cuiabá

A Tabela 5 mostra o resumo dos resultados obtidos quanto ao consumo de energia com climatização em locais com diferentes níveis de acúmulo de sujeira nos vidros, nas cidades de Florianópolis, Porto Alegre e Curitiba. Além disso, apresenta o percentual de redução do consumo de energia em relação ao cenário de vidro limpo. Os resultados mostram que os vidros mais sujos estão associados ao menor consumo de energia devido à redução da transmitância solar dos vidros, o que implica em menor transferência de calor através do vidro, e consequentemente, redução da carga térmica.

Tabela 5 – Tabela resumo dos resultados.

Cidade	**Tipo de local**	**Vidro**							
		Comum		**Light Blue**		**Neutral**		**Silver**	
		Consumo de energia [MWh]	**Redução do consumo de energia[1] [%]**	**Consumo de energia [MWh]**	**Redução do consumo de energia[1] [%]**	**Consumo de energia [MWh]**	**Redução do consumo de energia[1] [%]**	**Consumo de energia [MWh]**	**Redução do consumo de energia[1] [%]**
Florianópolis	Limpo	58,4	0,00	52,7	0,00	47,1	0,00	44,7	0,00
	Não industrial	57,1	2,21	52,1	1,27	46,7	0,81	44,5	0,49
	Industrial	54,7	6,24	50,7	3,81	45,9	2,49	44,1	1,50
	Bastante sujo	53,6	8,26	50,0	5,10	45,5	3,34	43,8	1,99
Porto Alegre	Limpo	44,3	0,00	40,9	0,00	37,6	0,00	36,1	0,00
	Não industrial	43,6	1,59	40,8	0,11	37,3	0,64	35,9	0,38
	Industrial	42,2	4,85	40,0	2,01	36,8	1,93	35,7	1,13
	Bastante sujo	41,4	6,47	39,6	3,05	36,6	2,58	35,5	1,51
Cuiabá	Limpo	89,0	0,00	83,3	0,00	76,9	0,00	74,4	0,00
	Não industrial	87,9	1,27	82,6	0,85	76,5	0,55	74,1	0,32
	Industrial	85,6	3,91	81,1	2,57	75,7	1,65	73,7	0,95
	Bastante sujo	84,3	5,28	80,4	3,42	75,2	2,20	73,4	1,27

Nota: (1) em relação ao vidro limpo.

5. CONCLUSÕES

Os resultados desse estudo mostraram que a sujeira nos vidros pode afetar significativamente o consumo de energia do ar-condicionado em edificações. Quanto maior a transmitância solar do vidro, maiores as diferenças entre o consumo de energia nos cenários de vidro limpo e ambiente bastante sujo. No entanto, essas diferenças variam de acordo com as características climáticas de cada cidade.

O estudo destaca a importância de se realizar a seleção do tipo de vidro com base em suas propriedades térmicas e na possibilidade de acumulação de sujeira em suas superfícies, a fim de otimizar a eficiência energética dos edifícios. Com os dados referentes ao consumo de energia obtidos por meio das simulações, torna-se possível otimizar o projeto da envoltória da edificação em aspectos como a avaliação do percentual de abertura nas fachadas e análises da necessidade de proteções solares. Além disso, é possível aprimorar o dimensionamento do sistema de ar-condicionado, uma vez que ele se relaciona diretamente com a carga térmica dos ambientes.

É importante ressaltar que, embora as simulações mostrem que acumular sujeira nos vidros pode trazer benefícios temporários, essa condição não é permanente, uma vez que o acúmulo de sujeira não é uma característica desejável no envelope da edificação. O vento, a chuva e a solicitação de limpeza pelo usuário podem levar à remoção da sujeira. Portanto, é recomendado avaliar cuidadosamente a possibilidade de utilizar uma carga térmica menor no dimensionamento do sistema.

Além disso, diferenças climáticas entre as cidades influenciaram nos resultados do estudo, com variações diferentes nos consumos de energia do ar-condicionado de acordo com a sujeira acumulada nos vidros. A análise ressalta a importância de considerar as condições climáticas locais na seleção de materiais de construção, como vidros com diferentes propriedades térmicas, para garantir melhor desempenho energético.

Destaca-se que este estudo teve como foco principal a análise do impacto da sujeira nos vidros sobre o consumo de energia do ar-condicionado. Portanto, não foram considerados outros fatores que também podem influenciar no consumo de energia, como a iluminação natural. No entanto, é importante reconhecer que a iluminação natural pode ser um fator significativo no consumo de energia com iluminação e deve ser considerado em estudos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GHAZI, Sanaz; IP, Kenneth; SAYIGH, Ali. Preliminary Study of Environmental Solid Particles on Solar Flat Surfaces in the UK. **Energy Procedia**, [S.L.], v. 42, p. 765-774, 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.11.080.

GHOSH, Amrita; NEOGI, Subhasis. Impact of dust and other environmental factors on glass transmittance in warm and humid climatic zone. **Clean Technologies and Environmental Policy**, [S.L.], v. 19, n. 4, p. 1215-1221, 31 out. 2016. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s10098-016-1302-0.

SADINENI, Suresh B.; MADALA, Srikanth; BOEHM, Robert F.. Passive building energy savings: a review of building envelope components. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 15, n. 8, p. 3617-3631, out. 2011. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014.

SHAMERI, M.A.; ALGHOUL, M.A.; SOPIAN, K.; ZAIN, M. Fauzi M.; ELAYEB, Omkalthum. Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 1468-1475, abr. 2011. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.016.

STRUGAJ, Gentiana; HERRMANN, Andreas; RÄDLEIN, Edda. AES and EDX surface analysis of weathered float glass exposed in different environmental conditions. **Journal of Non-Crystalline Solids**, [S.L.], v. 572, p. 121083, nov. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.121083.

VERNEY-CARRON, A.; DUTOT, A.L.; LOMBARDO, T.; CHABAS, A. Predicting changes of glass optical properties in polluted atmospheric environment by a neural network model. **Atmospheric Environment**, [S.L.], v. 54, p. 141-148, jul. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.02.093.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFSC.