O IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS EMISSÕES DE CARBONO DE EDIFICAÇÕES ESCOLARES PÚBLICAS NO BRASIL

THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON CARBON EMISSIONS FROM PUBLIC SCHOOL BUILDINGS IN BRAZIL

Maria Vitória de Carvalho Chermont [1]; João Pedro Martins Pereira [2]; Joyce Correna Carlo [3].

[1]maria.chermont@ufv.br | UFV | Viçosa, Brasil; [2]Arquiteto e Urbanista| joao.pereira4@ufv.br| UFV | Viçosa, Brasil; [3]Doutora | joycecarlo@ufv.br | UFV | Viçosa, Brasil.

Resumo:
O presente estudo analisa como as mudanças climáticas poderão influenciar nas emissões de carbono em escolas públicas brasileiras, considerando diferentes zonas bioclimáticas e o Cenário Socioeconômico Compartilhado 4.5 do Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas. Utilizando o software *EnergyPlus*, foram simuladas 24 cidades adotando um arquétipo escolar equipado com sistema fotovoltaico e climatização por bomba de calor, comparando dados climáticos históricos (1985–2014) com projeções para 2050. A metodologia bottom-up avaliou consumo e geração de energia, permitindo calcular o balanço energético e as emissões de gases de efeito estufa. Os resultados indicam que cidades frias podem reduzir emissões futuras, enquanto cidades quentes tendem a aumentá-las devido ao acréscimo da demanda por refrigeração. Apesar da geração fotovoltaica, muitas escolas não alcançam a independência energética, especialmente no futuro. O estudo destaca a necessidade de estratégias regionais e soluções arquitetônicas passivas para mitigar os impactos das mudanças climáticas e melhorar a eficiência energética.

Palavras-chave:
Mudanças climáticas; emissão de carbono; eficiência energética; fator de emissão; edificações escolares.

Abstract:
This study analyzes how climate change may affect carbon emissions in Brazilian public schools, considering different bioclimatic zones and the Shared Socioeconomic Pathway 4.5 from the intergovernmental Panel for Climate Change. Using EnergyPlus, simulations were conducted for 24 cities, applying a school archetype equipped with a photovoltaic system and heat pump-based HVAC. Historical weather data (1985–2014) were compared with projections for 2050. A bottom-up methodology was employed to assess energy consumption and generation, enabling the calculation of the energy balance and greenhouse gas emissions. The results indicate that colder cities may experience a reduction in future emissions, whereas warmer cities tend to show an increase due to higher cooling demands. Despite the use of photovoltaic generation, many schools are not expected to achieve energy independence, particularly in the future, when air conditioning usage is projected to intensify. The study underscores the need for region-specific strategies and passive architectural solutions to mitigate the impacts of climate change and enhance energy efficiency.

Keywords:
Climate change; carbon emissions; energy efficiency; emission factor; school buildings.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são um dos principais desafios contemporâneos, com impactos em diversos setores da sociedade. O agravamento do aquecimento global, impulsionado pelo aumento da emissão de Gases Efeito Estufa (GEE) resultante das atividades humanas, tem provocado alterações significativas nos padrões climáticos globais, como o aumento da temperatura média do ar, elevação do nível do mar e eventos climáticos extremos mais frequentes e intensos. Sem reduções rápidas e contundentes nas emissões de GEEs, os impactos sobre os ecossistemas e a sociedade serão cada vez mais severos e potencialmente irreversíveis, afetando diretamente a qualidade de vida humana (IPCC, 2022).

Neste cenário, a arquitetura e a indústria da construção civil assumem um papel estratégico na promoção de ambientes mais sustentáveis e adaptados às novas condições climáticas. Especificamente, as edificações escolares, com alta densidade de ocupação e longos períodos de funcionamento, representam uma tipologia representativa para a avaliação do consumo eletroenergético e das emissões associadas ao carbono operacional, ou seja, aquelas provenientes do uso de energia para climatização, iluminação, equipamentos e ventilação (EPE, 2022). O desempenho ambiental destas edificações torna-se um critério fundamental de projeto, com a incorporação de soluções bioclimáticas, materiais de baixo impacto ambiental e tecnologias passivas e ativas de climatização e ventilação (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). Além disso, é essencial considerar as especificidades regionais e socioeconômicas na proposição de soluções arquitetônicas resilientes e inclusivas.

Neste contexto, estratégias arquitetônicas que incorporem eficiência eletroenergética e geração fotovoltaica são fundamentais para mitigar os impactos ambientais e adaptar os edifícios às condições climáticas futuras. Assim, esse estudo tem como objetivo quantificar as emissões de carbono operacional em uma tipologia representativa de edificações escolares públicas brasileiras utilizando simulações termo energéticas e considerando a diferentes zonas bioclimáticas e cenários climáticos (histórico e futuro), considerando as projeções de consumo e geração de energia até o ano de 2050.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. CARBONO OPERACIONAL

O carbono operacional refere-se às emissões de dióxido de carbono (CO2) associadas à energia necessária para a operação do edifício, englobando climatização, iluminação, equipamentos e ventilação. Os sistemas prediais consomem quantidade expressiva de energia para atender às necessidades de operação do edifício. Especialmente, em ambientes escolares, que operam por longos períodos e têm alta densidade de ocupação, esse tipo de emissão é considerável.

As emissões GEE no setor de energia ocorrem principalmente por duas vias: a queima de combustíveis e as emissões fugitivas. A primeira decorre da combustão de matéria prima para geração de calor, força motriz, eletricidade ou outras formas de energia. Já as emissões fugitivas resultam de vazamentos, evaporação ou perdas durante processos industriais, especialmente nos setores de petróleo, gás natural e mineração de carvão, quando não há aproveitamento energético. Os principais gases relacionados a essas emissões no setor energético são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O) (EPE, 2022), com destaque para o primeiro.

2.2. QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (do inglês Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) apresenta duas abordagens (top-down e bottom-up) como procedimentos metodológicos. Estas podem ser aplicados individualmente ou combinadas para a estimativa de emissão de GEE. A principal diferença está no tipo de emissão, sendo as diretas

resultantes do local onde a geração ocorre e as indiretas, decorrentes de atividades que ocorrem em outros locais, como edifícios (IPCC, 2022).

A abordagem top-down quantifica as emissões diretas pela concentração de GEEs e como esses gases dispersam na atmosfera. Essa abordagem compreende todo o carbono disponível no sistema, mesmo aquele que ainda não foi queimado, e será liberado como emissão fugitiva por evaporação ou vazamento na produção e/ou transformação (Brasil, 2022). A abordagem bottom-up estima as emissões indiretas e fornece informações sobre consumo de energia para operacionalização de edifícios e sobre emissões que resultam da aquisição da eletricidade e da rede de abastecimento urbana (IPCC, 2022). Esta abordagem também abrange o ciclo de vida das usinas, considerando os estágios de aquisição de matéria-prima, processamento do material, fabricação, uso, recuperação e descarte (Wiebe; Gandy; Luts, 2016).

Como exemplo, Bousado (2025) adotou uma metodologia para quantificar emissões de GEEs em anos futuros utilizando a abordagem bottom-up com avaliação das emissões diretas pela geração de energia elétrica. Entretanto, o procedimento não contabiliza emissões ao longo do ciclo de vida das usinas, limitando as emissões àquelas oriundas da queima de combustíveis prevista para compor o Sistema Interligado Nacional (SIN) no ano de 2050. Apesar disto, o estudo incluiu a eficiência de cada tecnologia a fim de contabilizar as perdas pela transformação de energia primária em energia útil.

2.3. MATRIZ ENERGÉTICA

A matriz energética é formada a partir de um conjunto de fontes de energia utilizadas em um país, ou no mundo, para atender a demanda de energia (EPE, 2022). O *Annual Energy Outlook* (AEO) (2020) prevê um aumento anual de 3,1% até 2050 e considera que 38% das fontes de energia podem se tornar renováveis, com destaque para a solar e a eólica. Da mesma forma que a energia é um pré-requisito para o desenvolvimento, a energia sustentável é um pré-requisito para um desenvolvimento sustentável (Østergaard et al., 2020). Portanto, pensar na diversificação e na renovabilidade da matriz energética é fundamental para o crescimento econômico e social.

Conforme o Relatório Nacional de Balanço Energético de 2024, referente ao ano de 2023, a repartição da oferta interna de energia foi composta em 49,1% por fontes renováveis e 50,9% não renováveis. As principais renováveis foram a biomassa da cana-de-açúcar (16,9%) e a energia hidráulica (12,1%) e as principais não-renováveis, o petróleo e seus derivados (35,1%) e o gás natural (9,6%). A repartição da energia refere-se a toda a demanda e produção necessária para os diversos setores da economia, com 65% destinados ao transporte de cargas e de passageiros, 11% ao setor industrial, 9% a residências e 5% a serviços (BEN, 2024).

Apesar do avanço nacional positivo a respeito da adoção de fontes de energia renováveis, diversificar a matriz energética é importante para garantir maior eficiência na produção de energia. A maior participação das usinas hidrelétricas pode ser um ponto positivo, porém, tornar-se dependente do regime de chuvas ameaça a sustentabilidade da produção de energia, uma vez que em épocas de estiagem, o país complementa a geração utilizando usinas térmicas baseadas na queima de combustíveis fósseis (Baitelo, 2009).

3. MÉTODOS

A metodologia foi dividida em duas etapas: A primeira refere-se à estimativa dos fatores de emissão histórico e futuro da matriz elétrica brasileira e a segunda, à quantificação das emissões de GEEs com base no consumo e geração energética do edifício.

3.1. FATOR DE EMISSÃO

O fator de emissão (FE) é divulgado mensal e anualmente pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação. Portanto, para o período histórico, o FE utilizado foi do ano de 2024, resgatados do Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE), relativo à 0,0545 tCO_2eq/MWh.

Para o FE de 2050, foi utilizada a metodologia de cálculo definida por Bousado (2025) que, a partir da abordagem *bottom-up,* contabilizou emissões diretas de GEEs provenientes da queima dos combustíveis pelas usinas previstas para compor o Sistema Integrado Nacional em 2050. Ainda, foi analisada a eficiência de cada tecnologia a fim de contabilizar as emissões e perdas decorrentes da transformação de energia primária em útil. Esta análise foi feita a partir da projeção estabelecida pelo Plano Nacional de Energia 2050, cujo FE foi de 0,0104 $kgCO_2eq/kWh$.

A simulação energética do edifício proveu dados para o cálculo do balanço energético (em MWh), ou seja, a diferença entre a geração elétrica pelos painéis fotovoltaicos e o consumo de energia elétrica. Este balanço é necessário para a quantificação das emissões de GEE e para análise da independência energética do edifício, conforme Equação 1 (Bousado, 2025).

$E_{total} = CE_{edíficio}\ x\ EF$ (Equação 1)
Onde:
E_{total}: emissão total de GEEs pelo consumo do edifício (kgCO2eq/m²);
$CE_{edíficio}$: consumo de energia elétrica do edifício, descontando a geração pelo sistema fotovoltaico (kWh/m²);
EF = fator de emissão médio da matriz elétrica (kgCO2eq/kWh).

3.2. CIDADES DE ESTUDO

As cidades para o estudo foram escolhidas pautadas no Zoneamento Bioclimático Brasileiro (Silva Machado et al., 2024), no qual o território nacional é dividido em seis zonas com duas subdivisões cada, diferenciando os invernos moderados e intensos e umidades relativas abaixo e acima de limite pré-estabelecidos por zona. Ao final, totalizam-se 24 cidades, duas em cada zona, diferenciadas pela latitude, importante para avaliar a geração fotovoltaica. Trata-se, portanto, de uma amostragem intencional, fundamentada em critérios técnicos estabelecidos na literatura especializada.

3.3. DEFINIÇÃO DO ARQUETIPO DE SIMULAÇÃO

O arquétipo é um modelo de edificação virtual construído a partir de um conjunto de propriedades representativas, obtidas por meio de levantamento estatístico de uma determinada categoria tipológica de edifícios. Seu propósito é de representar, de forma sintética, as características construtivas, técnicas e de uso e de ocupação comuns a uma determinada tipologia de edificação (Gnecco, 2021), servindo de referência para a classificação de desempenho de edificações existentes da mesma tipologia. Os arquétipos também têm sido amplamente empregados em estudos voltados à avaliação do desempenho de tecnologias e estratégias de conservação de energia, como evidenciado nas pesquisas de Guiaretta (2022) e Silva (2022).

Nesse contexto, definir um único modelo de simulação com propriedades imutáveis para diferentes regiões garante que a avaliação tenha como enfoque apenas as características variáveis, neste caso, as condições climáticas e geográficas. Ou seja, um modelo padrão permite isolar os efeitos do clima sobre o comportamento térmico e energético da edificação, o que reforça a utilidade dos arquétipos como ferramenta comparativa entre zonas bioclimáticas distintas.

O modelo de edificação selecionado é o arquétipo escolar para Ensino Fundamental e Ensino Médio desenvolvido pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) (2021). O modelo do CBCS foi escolhido pela grande amostragem de edificações para construção do arquétipo (até 18 estados), o que garante maior representatividade das edificações escolares de mesma tipologia no território nacional (CBCS, 2021). Além disto, Neto (2022) demonstrou a sua qualidade estatística do modelo, principalmente para o percentual de desvio no consumo de energia (6%) em comparação a um caso real e modelos semelhantes. A geometria desse arquétipo é retangular, podendo ser implantado em qualquer orientação cardinal.

3.4. SIMULAÇÕES TERMOENERGÉTICAS

A partir da definição das cidades e da edificação, foram realizadas 48 simulações, com o arquétipo implementado nas 24 cidades do estudo, em dois períodos climáticos, o histórico 1985-2014 e a projeção futura do cenário SSP2-4.5 do IPCC para 2050 (IPCC, 2022). A simulação realizada através do *EnergyPlus* versão 22.1.0 utilizou como dados de entradas as características dos arquétipos definidas pelo CBCS (2021) e o arquivo climático do período avaliado.

Adotou-se um sistema de condicionamento artificial do tipo *Packaged Terminal Heat Pump* (PTHP), modelado por meio do objeto *HVACTemplate:Zone:PTHP*. Este sistema simula uma bomba de calor ar-ar com serpentina de arrefecimento, serpentina de aquecimento principal, serpentina de aquecimento suplementar elétrica e misturador de ar exterior, emulando o funcionamento de um sistema split (*EnergyPlus*, 2022). A operação do sistema de ar-condicionado foi vinculada à presença de ocupantes, sendo acionado para aquecimento quando a temperatura do ambiente está abaixo de 18 °C e para resfriamento quando ultrapassa 24 °C, de acordo com os *setpoints* fixos definidos para a simulação.

A ocupação das salas foi programada no *Schedule:Compact* considerando um ano letivo. Portanto, não há ocupação nas salas nos períodos que correspondem as férias, até 31 de janeiro, entre 30/06 e 14/07 e depois do dia 16/12. Já nos períodos de aula, 01/02 a 01/07 e 15/07 a 15/12, foi considerada uma ocupação de segunda a sexta de 90% das 7h às 16h e 20% das 16h às 22h e nenhuma ocupação aos finais de semana. O uso e ocupação inseridos no modelo está de acordo com as indicações do CBCS para o arquétipo adotado (CBCS, 2021).

A orientação solar utilizada foi Norte/Sul a fim de maximizar o potencial de geração do sistema fotovoltaico. Os dados de saída da simulação foram a geração de energia solar e o consumo total de energia da edificação. A análise focou na identificação das emissões evitadas com instalação do sistema fotovoltaico, tanto no clima histórico quanto no cenário futuro, assim como, nas emissões totais decorrentes do balanço energético entre geração e consumo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados referem-se a simulações anuais dos arquétipos equipados com sistema fotovoltaico e bomba de calor considerando as maiores fachadas a Norte/Sul. A Tabela 1 apresenta estes dados que são as entradas para estimativa das emissões.

Cidade	ZB	HISTÓRICO (1985-2014)		FUTURO SSP 4.5 (2050)	
		Geração FV (kWh/m²)	Consumo Total (kWh/m²)	Geração FV (kWh/m²)	Consumo Total (kWh/m²)
Campos do Jordão	1M	98,5	68,0	95,3	73,0
Curitiba	1M	69,1	71,8	63,9	72,7
Caxias do Sul	1R	86,6	92,2	85,2	86,8
Urubici	1R	76,8	90,4	73,5	82,6
Juiz de Fora	2M	99,8	77,6	99,5	88,3
São Paulo	2M	92,5	75,2	89,0	83,2
Pelotas	2R	80,8	80,7	75,8	79,6
Porto Alegre	2R	82,6	81,8	78,5	87,2
Florianópolis	3A	74,7	75,5	68,9	83,3
Vitória da Conquista	3A	122,2	79,2	125,5	92,2
Brasília	3B	133,8	79,5	134,6	94,5
Londrina	3B	98,6	87,8	96,1	103,5
Rio de Janeiro	4A	143,7	104,7	145,5	125,7
Campina Grande	4A	99,8	102,1	96,7	117,9
Campo Grande	4B	157,5	102,1	160,1	123,1

Cidade	ZB	HISTÓRICO (1985-2014)		FUTURO SSP 4.5 (2050)	
		Geração FV (kWh/m²)	Consumo Total (kWh/m²)	Geração FV (kWh/m²)	Consumo Total (kWh/m²)
Arcoverde	4B	124,9	110,0	110,0	136,0
Salvador	5A	166,9	152,1	168,5	188,0
Natal	5A	147,3	123,8	147,2	150,6
Janaúba	5B	153,8	108,2	158,2	130,1
Juazeiro do Norte	5B	153,2	118,1	156,3	140,4
Fortaleza	6A	178,7	156,6	182,0	187,4
Teresina	6A	160,5	168,8	161,4	206,7
Palmas	6B	147,8	135,2	151,9	165,8
Petrolina	6B	157,7	138,5	162,8	166,3

Tabela 1 – Cidades por zonas bioclimáticas - consumo e geração históricos e futuros para cálculo das emissões.
Fonte: os autores (2025).

Na Tabela 2, as emissões evitadas indicam excedente de geração (verde), com devolução à rede de distribuição elétrica e produção de créditos de consumo. Neste caso, nota-se que não há valores positivos devido à geração fotovoltaica. Valores positivos indicam *déficit*, com necessidade de suplementação da rede elétrica e, por isso, emitindo GEE. Este padrão foi adotado devido à estimativa das emissões evitadas: emissões negativas representam aquelas evitadas (verde), enquanto valores positivos indicam emissões líquidas decorrentes do consumo de energia superior à geração (vermelho).

Cidade	ZB	HISTÓRICO (1985-2014)		FUTURO SSP 4.5(2050)	
		Emissões evitadas GEE (kgCO2eq/m²)	Emissões totais (kgCO2eq/m²)	Emissões evitadas GEE (kgCO2eq/m²)	Emissões totais (kgCO2eq/m²)
Campos do Jordão	1M	-5,37	0,00	-0,99	0,00
Curitiba	1M	-3,77	0,14	-0,66	0,09
Caxias do Sul	1R	-4,72	0,31	-0,88	0,02
Urubici	1R	-4,18	0,74	-0,76	0,09
Juiz de Fora	2M	-5,44	0,00	-1,03	0,00
São Paulo	2M	-5,04	0,00	-0,92	0,00
Pelotas	2R	-4,40	0,00	-0,79	0,04
Porto Alegre	2R	-4,50	0,00	-0,81	0,09
Florianópolis	3A	-4,07	0,04	-0,71	0,15
Vitória da Conquista	3A	-6,66	0,00	-1,30	0,00
Brasília	3B	-7,29	0,00	-1,39	0,00
Londrina	3B	-5,38	0,00	-1,00	0,08
Rio de Janeiro	4A	-7,83	0,00	-1,51	0,00
Campina Grande	4A	-5,44	0,13	-1,00	0,22
Campo Grande	4B	-8,59	0,00	-1,66	0,00
Arcoverde	4B	-6,81	0,00	-1,14	0,27
Salvador	5A	-9,10	0,00	-1,75	0,20
Natal	5A	-8,03	0,00	-1,53	0,03
Janaúba	5B	-8,38	0,00	-1,64	0,00
Juazeiro do Norte	5B	-8,35	0,00	-1,62	0,00
Fortaleza	6A	-9,74	0,00	-1,89	0,06
Teresina	6A	-8,75	0,45	-1,67	0,47
Palmas	6B	-8,05	0,00	-1,57	0,14
Petrolina	6B	-8,59	0,00	-1,69	0,04

Tabela 2 – Emissões evitadas em decorrência do uso do sistema fotovoltaico e emissões totais de GEE.
Fonte: os autores (2025).

Na análise do período histórico (1958-2014), observa-se que os menores valores de emissões evitadas, ocorrem majoritariamente em cidades de clima frio, no sul do país, implicando em maior demanda por sistemas de climatização para aquecimento. Além disso, as maiores latitudes e menores alturas solares implicam em menor incidência, reduzindo a geração de energia.

A exemplo, Curitiba, Caxias do Sul e Urubici apresentaram consumo final positivo para emissões totais, indicando necessidade de suprimento adicional da rede (respectivamente: +0,14 kgCO2eq/m², +0,31 kgCO2eq/m² e +0,74 kgCO2eq/m²). Estas situam-se nas zonas bioclimáticas 1M e 1R (climas frios), caracterizando o aumento no consumo energético como advindo da necessidade de aquecimento. Para o cenário futuro, a redução da necessidade de aquecimento dos ambientes internos em decorrência do aumento das temperaturas do ar externas, refletiu-se no consumo que, por sua vez, aproximou-o do balanço zero, gerando menores emissões.

Em relação à projeção do cenário SSP 4.5 para o ano de 2050, observa-se uma diminuição das emissões evitadas. Isto se deve à mudança nos padrões de consumo e geração por conta do aumento das temperaturas médias do ar. Regiões de clima quente, como Arcoverde e Salvador, apresentaram aumento nas emissões líquidas (respectivamente: +0,27 kgCO2eq/m² e +0,20 kgCO2eq/m²), resultado da intensificação no uso de sistemas de resfriamento, com consumo superior à geração fotovoltaica. De modo geral, houve um aumento nas emissões previstas para o cenário futuro. Emissões em diversas cidades são nulas no período histórico, então, são evitadas pela adoção da energia fotovoltaica. Contudo, é visto que a edificação não conseguirá manter esta condição em 2050, caso o cenário se concretize.

Nota-se que o consumo final de energia elétrica não apresenta, em muitos casos, um balanço sustentável em relação à geração fotovoltaica, o que se reflete em uma produção maior de CO_2. A maioria das cidades analisadas apresenta aumento nas emissões de GEE para o cenário futuro, principalmente aquelas com climas quentes, em decorrência do crescimento na demanda por resfriamento artificial. Cidades de clima frio tiveram comportamento mais variável, embora algumas tenham conseguido reduzir as emissões projetadas para um cenário futuro.

A Figura 1 mostra a independência energética de edificações localizadas em diferentes cidades, comparando os períodos histórico e futuro. A independência energética indica a capacidade de uma edificação gerar energia suficiente para atender ao próprio consumo (valores acima de 100%) ou a insuficiência dessa geração (valores abaixo de 100%). Cada ponto no gráfico representa uma cidade específica, e, portanto, há dois pontos por zona. A análise identificou três padrões principais.

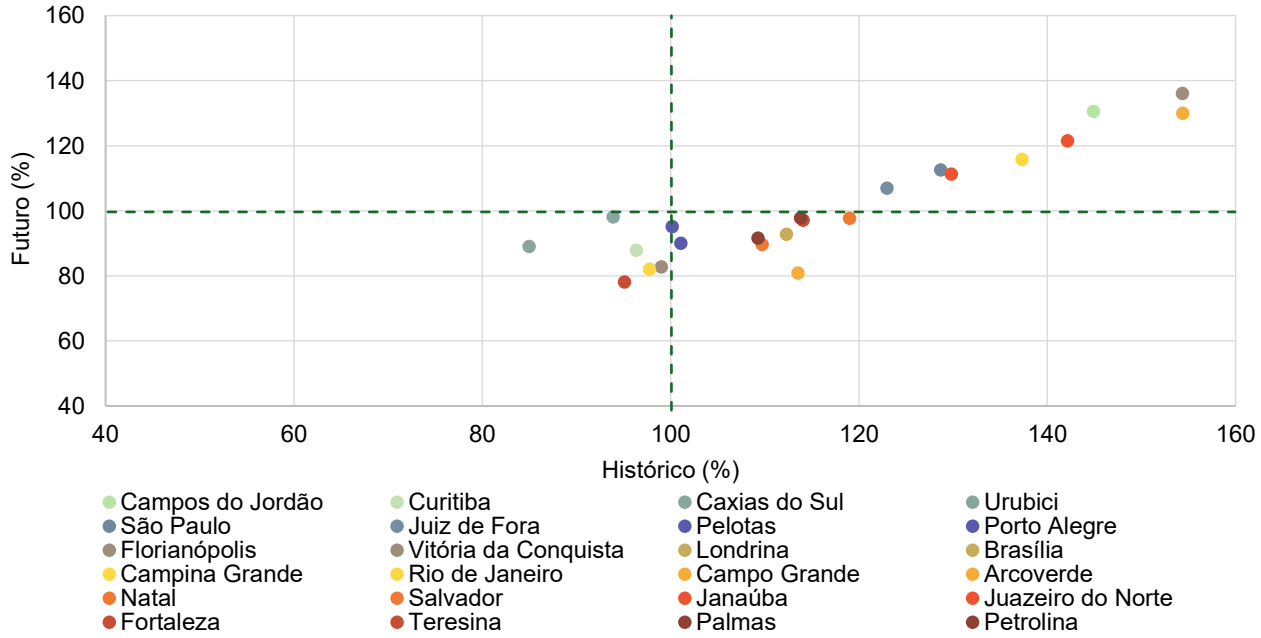

Figura 1 – Independência energética dos arquétipos condicionados artificialmente e com sistema fotovoltaico.
Fonte: os autores (2025).

No quadrante inferior esquerdo, encontram-se edificações que não atingiram 100% de independência energética em nenhum dos períodos analisados, variando entre 85% e 99% no período histórico e 79% a 99% no futuro. Destacam-se edificações de cidades como Curitiba, Caxias do Sul, Urubici, Florianópolis, Rio de Janeiro e Teresina. Observou-se aumento do consumo do período histórico para o cenário futuro na maioria dos casos.

No quadrante inferior direito, estão as edificações que conseguiram gerar mais energia do que consumiram no período histórico (acima de 100%), mas que tendem a perder essa independência no futuro (abaixo de 100%) caso o cenário proposto pelo IPCC se confirme. Este fenômeno é particularmente evidente em edificações localizadas em climas 4A, 4B, 5A, 6A e 6B, que são mais suscetíveis a picos de consumo para resfriamento artificial associados ao aquecimento global.

Por outro lado, as edificações localizadas no quadrante superior direito mantiveram a independência energética em ambos os períodos, com valores superiores a 100%. Esse desempenho reflete a adequação dessas edificações, combinada a uma capacidade de geração de energia elétrica que supera consistentemente a demanda. Isto também pode ocorrer pela melhor adequabilidade das estratégias construtivas em promover condicionamento passivo em certas regiões. Como o modelo representa o cenário brasileiro de forma homogênea, é compreensível que zonas bioclimáticas intermediárias apresentem melhor desempenho.

Com base na Figura 2, as emissões evitadas por uso do sistema fotovoltaico no clima futuro tendem a ser significativamente menores do que no histórico, em uma tendência linear. No entanto, a condição histórica e futura altera mais as emissões do que o clima em si. Como exemplo, em Fortaleza as emissões históricas chegam a -10 kgCO2eq/m², e as futuras a -2kgCO2eq/m² (diferença de 8kgCO2eq/m²); estas são menores que as emissões evitadas para o cenário histórico do clima mais frio, Curitiba com -4kgCO2eq/m² (diferença de 2kgCO2eq/m²).

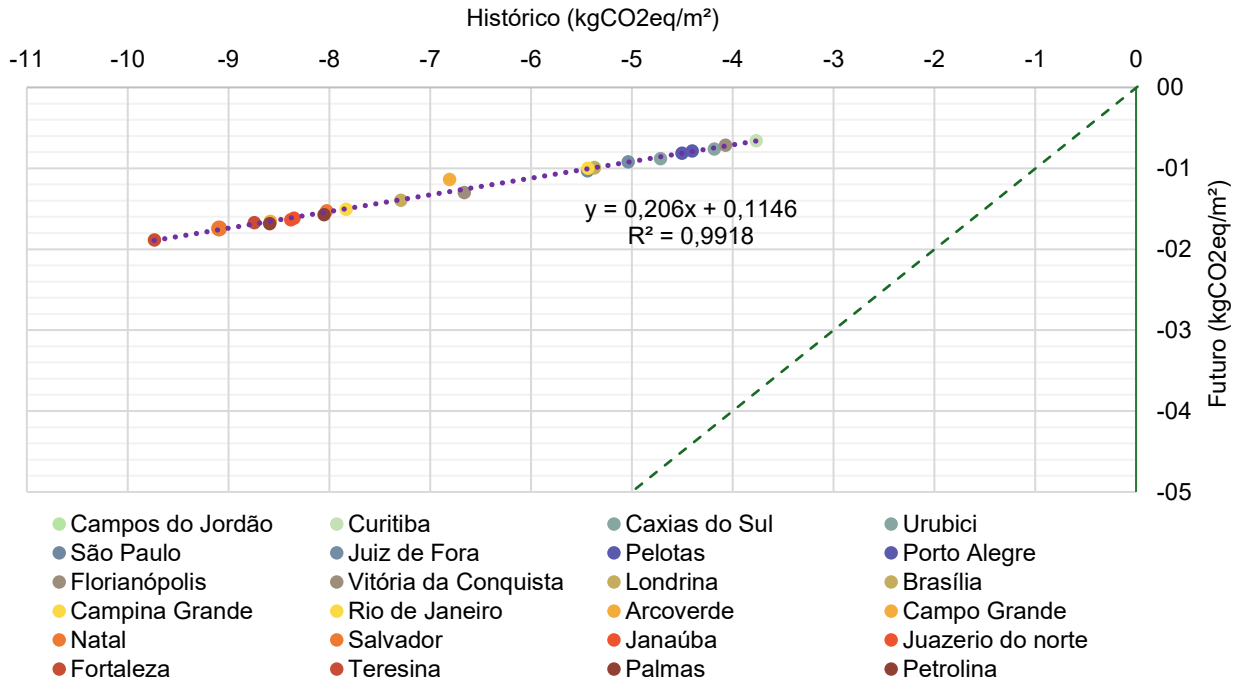

Figura 2 – Emissões GEE evitadas.
Fonte: os autores (2025).

O fator de emissão projetado, cuja adoção por uma energia mais limpa está embasada nas projeções do Plano Nacional de Energia (PNE 2050) (EPE, 2022), não se reduz, pois há um elevado aumento do consumo projetado para 2025 decorrente do aumento das temperaturas do ar. É possível estabelecer uma relação das emissões evitadas futuras para este modelo tendo o consumo histórico, possibilitando uma previsão para este cenário climático utilizando a equação da reta mostrada na Figura 2.

É importante destacar que os valores apresentados para as cidades analisadas foram obtidos a partir de simulações realizadas em uma edificação de uso e características específicas. Por essa razão, é fundamental compreender a independência energética de cada edificação individualmente para avaliar seu desempenho energético de forma abrangente.

5. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a influência das mudanças climáticas nas emissões de carbono operacional de um arquétipo de edificação escolar pública para o Brasil, considerando diferentes zonas bioclimáticas e cenários climáticos histórico e futuro. Os resultados indicaram que cidades situadas em climas frios, como Curitiba e Caxias do Sul, apresentam uma tendência futura à redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) atribuída à diminuição da demanda por aquecimento em relação ao período histórico. Este resultado ressalta a relevância da eficiência energética e da adoção de tecnologias sustentáveis na mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

Por outro lado, regiões de clima moderado demonstraram um aumento projetado nas emissões de carbono, resultante do incremento na necessidade de resfriamento, um fenômeno consequente do aquecimento global. Apesar da integração de sistemas fotovoltaicos, algumas instituições de ensino em regiões mais quentes ainda não lograram alcançar a independência energética, evidenciando lacunas na implementação de estratégias de eficiência energética em edificações escolares.

Considerando que o fator de emissão projetado para 2050 tende a ser cinco vezes inferior ao atual, há uma redução na intensidade de carbono por unidade de energia elétrica consumida. Todavia, essa emissão de GEE é progressivamente amortizada pelo crescimento contínuo da demanda energética, especialmente impulsionado por cargas associadas ao aquecimento e resfriamento das edificações. Assim, mesmo com a queda do fator de emissão, o aumento do consumo pode resultar em elevações absolutas nas emissões de CO_2, mitigando o potencial de emissões evitadas. Assim, a tendência de queda das emissões específicas é contrabalanceada pelo crescimento na adoção de tecnologias para geração local de energia elétrica, além da necessidade de estratégias regionais e soluções arquitetônicas passivas para mitigar os impactos das mudanças climáticas e melhorar a eficiência energética.

REFERÊNCIAS

Annual energy outlook 2020 - issue in focus - U.s. energy Information Administration (EIA). Disponível em: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/section_issue_policies.php>. Acesso em: 6 abr. 2025.

Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS). **Relatório RT2B.11: Desenvolvimento de arquétipo, modelo de simulação, análise de sensibilidade e equações de benchmark para a tipologia de Escola de Ensino Fundamental e Médio.** 2021.

Baitelo, R. **Lei de energias renováveis**: propostas para a sustentabilidade energética brasileira. Greenpeace. 2009.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 6 abr. 2025.

BOUSADO, J. T. **Avaliação do desempenho de telhado verde na eficiência energética e nas emissões de carbono para um edifício universitário em um cenário futuro de mudanças climáticas.** 2025. 125 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2025.

BRASIL. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Brasília: **MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações,** 2022b. Disponível em:

https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-omcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-GHG/arquivos/6a-edestimativas-anuais.pdf. Acesso em: 20 abr. 2025.

GNECCO, V. M. **Desenvolvimento de um modelo de benchmarking local para as escolas públicas de ensino infantil de Florianópolis.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

GIARETTA, R. F. **Avaliação do custo-benefício de medidas de eficiência energética em edificações de segurança pública em Santa Catarina visando retrofit para NZEB.** Dissertação (Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2006. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2 – Energy.** Disponível em: https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf. Acesso em: 06 abr. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022:** Mitigation of Climate Change. 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Acesso em: 06 abr. 2025.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ªEdição. Eletrobras/Procel, 2014.

NETO, A. B. **Desenvolvimento de benchmarks energéticos para edificações de ensino fundamental e médio.** Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

ØSTERGAARD, P. A.; DUIC, N.; NOOROLLAHI,Y.; MIKULCIC, H.; KALOGIROU, S. Sustainable development using renewable energy technology. **Renewable energy**, v. 146, p. 2430–2437, 2020.

PLANO NACIONAL DE ENERGIA - 2050. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050. Acesso em: 6 abr. 2025.

SILVA, M. K. P. da. **Desenvolvimento de benchmark energético em centros de saúde.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

SILVA MACHADO, R.; BRE, F.; MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Bioclimatic zoning for building performance using tailored clustering method and highresolution climate data. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 311, n. December 2023, p. 114157, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114157.

WIEBE, K. S.; GANDY, S.; LUTZ, C. Policies and consumption-based carbon emissions from a top-down and a bottom-up perspective. **Low Carbon Economy**, v. 7, n. 1, p. 21-35, 2016. https://doi.org/10.4236/lce.2016.71003.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto 406426/2022-8 - Tecnologias para Adaptação de Edificações às Mudanças no Clima: Eficiência Energética, Geração Fotovoltaica e Redução de Emissões em Escolas, financiado pelo CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico". Além de, parcialmente, apoiado pelo Programa Iberoamericano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento – CYTED (através da Rede TRAPECIO).