ReGeo ISSN: 2177-3246

AUTOMAÇÃO DA ILUMINAÇÃO COMO ESTRATÉGIA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ESCOLA PÚBLICA: UMA ABORDAGEM BASEADA EM INTERNET DAS COISAS

LIGHTING AUTOMATION AS AN ENERGY EFFICIENCY STRATEGY IN A PUBLIC SCHOOL: AN INTERNET OF THINGS-BASED APPROACH

AUTOMATIZACIÓN DE LA ILUMINACIÓN COMO ESTRATEGIA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA ESCUELA PÚBLICA: UN ENFOQUE BASADO EN EL INTERNET DE LAS COSAS

https://doi.org/10.56238/revgeov17n8-210

Data de submissão: 10/07/2026 **Data de publicação:** 24/08/2026

Fabiano Costa Ramos
Mestrando em Ambiente, Sociedade e Desenvolvimento
Instituição: Programa de Pós-Graduação Profissional em Ambiente, Sociedade e Desenvolvimento (PPG-ProASD), Instituto de Biodiversidade e Sustentabilidade (NUPEM), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
E-mail: fabianoramos.fr55@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0002-5819-2765

Elisa Pinto da Rocha
Doutora em Engenharia Metalúrgica
Instituição: Programa de Pós-Graduação Profissional em Ambiente, Sociedade e Desenvolvimento (PPG-ProASD), Instituto de Biodiversidade e Sustentabilidade (NUPEM), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
E-mail: elisarocha@macae.ufrj.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-9635-9496

RESUMO

As crescentes demandas por práticas sustentáveis nas instituições de ensino, alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, impulsionam a adoção de soluções tecnológicas voltadas à eficiência energética. Este estudo apresenta uma intervenção baseada em Internet das Coisas (IoT) aplicada ao sistema de iluminação de uma escola pública municipal em Rio das Ostras (RJ), integrando automação e educação ambiental. A pesquisa, de caráter aplicado e abordagem quali-quantitativa, envolveu a substituição de lâmpadas fluorescentes por LED, instalação de sensores de presença e controladores programáveis, além da realização de palestras sobre sustentabilidade e uso racional da energia. A aprendizagem dos estudantes foi avaliada por meio de quizzes submetidos à análise estatística. O diagnóstico energético indicou consumo médio mensal de 7.500 kWh. A intervenção piloto proporcionou economia estimada de 384 kWh/mês, equivalente a 5,12% do consumo total da escola, principalmente pela redução do tempo de funcionamento das luminárias de 24 para 8 horas diárias. Os resultados evidenciaram melhoria significativa na compreensão dos estudantes sobre eficiência energética e sustentabilidade; a análise revelou um alto índice de proficiência, no qual 55,98% da amostra obteve aproveitamento integral. O grupo registrou uma média de apenas 0,81 erros por discente, com convergência da moda e da mediana no patamar de acerto total. Conclui-se que a integração entre tecnologias IoT de baixo custo e ações educativas constitui estratégia eficaz para promover eficiência energética e fortalecer a cultura da sustentabilidade em escolas públicas, com potencial de replicação em outras instituições de ensino.

Palavras-chave: Internet das Coisas. Iluminação Inteligente. Eficiência Energética. Escola Pública. Sustentabilidade.

ABSTRACT
The growing demand for sustainable practices in educational institutions, aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs) of the United Nations 2030 Agenda, has encouraged the adoption of technological solutions aimed at improving energy efficiency. This study presents an Internet of Things (IoT)-based intervention applied to the lighting system of a public school in Rio das Ostras, Rio de Janeiro, Brazil, integrating automation and environmental education. The applied research adopted a mixed-methods approach and involved the replacement of fluorescent lamps with LED technology, the installation of occupancy sensors and programmable controllers, and educational lectures on sustainability and rational energy use. Students' learning outcomes were assessed through quizzes subjected to statistical analysis. The energy diagnosis indicated an average monthly consumption of 7,500 kWh. The pilot intervention achieved an estimated energy saving of 384 kWh per month, corresponding to 5.12% of the school's total electricity consumption, mainly due to the reduction in lighting operating time from 24 to 8 hours per day through IoT automation. The results showed a significant improvement in students' understanding of energy efficiency and sustainability; the analysis revealed a high proficiency rate, with 55.98% of the sample achieving full success. The group recorded an average of only 0.81 errors per student, with the mode and median converging at the level of total correct answers. It is concluded that the integration of low-cost IoT technologies with environmental education actions represents an effective strategy for promoting energy efficiency and strengthening sustainability practices in public schools, with potential for replication in other educational institutions.

Keywords: Internet of Things. Smart Lighting. Energy Efficiency. Public School. Sustainability.

RESUMEN
Las crecientes demandas de prácticas sostenibles en las instituciones educativas, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, impulsan la adopción de soluciones tecnológicas orientadas a la eficiencia energética. Este estudio presenta una intervención basada en el Internet de las Cosas (IoT) aplicada al sistema de iluminación de una escuela pública municipal en Rio das Ostras (RJ), integrando automatización y educación ambiental. La investigación, de carácter aplicado y enfoque cuali-cuantitativo, conllevó la sustitución de lámparas fluorescentes por LED, la instalación de sensores de presencia y controladores programables, además de la realización de charlas sobre sostenibilidad y uso racional de la energía. El aprendizaje de los estudiantes se evaluó mediante cuestionarios sometidos a análisis estadístico. El diagnóstico energético indicó un consumo medio mensual de 7.500 kWh. La intervención piloto proporcionó un ahorro estimado de 384 kWh/mes, equivalente al 5,12% del consumo total de la escuela, principalmente por la reducción del tiempo de funcionamiento de las luminarias de 24 a 8 horas diarias. Los resultados evidenciaron una mejora significativa en la comprensión de los estudiantes sobre eficiencia energética y sostenibilidad; el análisis reveló un alto índice de proficiencia, en el que el 55,98% de la muestra obtuvo un aprovechamiento integral. El grupo registró un promedio de tan solo 0,81 errores por discente, con convergencia de la moda y la mediana en el nivel de acierto total. Se concluye que la integración entre tecnologías IoT de bajo costo y acciones educativas constituye una estrategia eficaz para promover la eficiencia energética y fortalecer la cultura de la sostenibilidad en escuelas públicas, con potencial de replicación en otras instituciones educativas.

Palabras clave: Internet de las Cosas. Iluminación Inteligente. Eficiencia Energética. Escuela Pública. Sostenibilidad.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas e a crescente demanda por energia têm ampliado a necessidade de estratégias voltadas à eficiência energética e ao uso sustentável dos recursos naturais. Em 2023, as emissões globais de CO_2 associadas ao setor energético atingiram 37,4 bilhões de toneladas, evidenciando os desafios para a mitigação dos impactos ambientais decorrentes do consumo de energia (International Energy Agency, 2024). Nesse contexto, a eficiência energética é reconhecida como um dos principais instrumentos para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), contribuindo simultaneamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a diminuição dos custos operacionais das instituições.

Entre as tecnologias emergentes associadas a esse processo, a Internet das Coisas (IoT) destaca-se por possibilitar monitoramento em tempo real, automação de processos e gerenciamento inteligente do consumo energético (Motlagh *et al.*, 2020). No ambiente construído, sensores, dispositivos conectados e sistemas automatizados têm sido amplamente empregados para otimizar o funcionamento de equipamentos, especialmente em sistemas de iluminação, climatização e controle predial. Estudos apontam que sensores de presença e mecanismos de acionamento automatizado podem reduzir significativamente o desperdício energético em edificações, ao adequar o funcionamento dos sistemas à ocupação efetiva dos ambientes (Motlagh *et al.*, 2020).

Apesar do potencial dessas soluções, sua adoção em instituições públicas de ensino brasileiras ainda é limitada. Dados do Censo Escolar de 2024 indicam que apenas três escolas do município de Rio das Ostras (RJ) registraram a utilização de fontes alternativas ou renováveis de energia, sendo apenas uma delas pertencente à rede pública. Essa realidade evidencia uma lacuna entre os princípios de sustentabilidade frequentemente abordados no ambiente escolar e as práticas efetivamente implementadas na gestão das instituições.

A discussão sobre IoT e sustentabilidade, entretanto, demanda uma abordagem crítica. Embora essas tecnologias possam promover ganhos de eficiência, o próprio setor de Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) responde por parcela crescente das emissões globais de gases de efeito estufa. Nesse sentido, o conceito de Green IoT propõe o desenvolvimento de sistemas capazes de minimizar tanto o consumo energético dos dispositivos quanto os impactos ambientais dos processos que controlam (Arshad *et al.*, 2017). Para Freitag *et al.* (2021), aplicações voltadas à redução do consumo energético em edifícios representam exemplos de uso da IoT com potencial de gerar benefícios ambientais líquidos, compensando os impactos associados à expansão da infraestrutura digital.

No contexto das escolas públicas, a adoção dessas tecnologias transcende a dimensão econômica e operacional. A Agenda 2030 reconhece a educação como elemento central para a construção de sociedades sustentáveis, atribuindo às instituições de ensino papel estratégico na formação de cidadãos conscientes dos desafios socioambientais contemporâneos. Dessa forma, a incorporação de práticas de eficiência energética ao cotidiano escolar pode transformar a própria escola em um espaço de aprendizagem experiencial, no qual os estudantes observam e participam de processos concretos de gestão sustentável dos recursos.

Diante desse cenário, este estudo investiga a aplicação de uma solução baseada em Internet das Coisas (IoT) para automação do sistema de iluminação da Escola Municipal Simar Machado Sodré, localizada em Rio das Ostras (RJ). A pesquisa avalia o potencial da intervenção para redução do consumo energético da unidade escolar e discute sua contribuição como ferramenta de educação para a sustentabilidade. Parte-se da hipótese de que a combinação entre tecnologias acessíveis de automação, substituição de equipamentos convencionais por soluções mais eficientes e ações de sensibilização ambiental pode gerar benefícios simultaneamente energéticos, econômicos e educacionais em instituições públicas de ensino.

2 METODOLOGIA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO E ÁREA DE PESQUISA

A pesquisa caracteriza-se como estudo aplicado, de natureza interventiva, com abordagem quali-quantitativa. O campo empírico é a Escola Municipal Simar Machado Sodré, localizada no município de Rio das Ostras, no estado do Rio de Janeiro. A seleção da unidade escolar fundamentou-se em análise prévia dos dados do Censo Escolar 2024, que identificou a escola como representativa da realidade predominante no município: dependência exclusiva da rede pública de energia elétrica e ausência de histórico de implementação de tecnologias renováveis ou de automação.

A escola atende à educação básica em tempo integral, com funcionamento em turno regular. O consumo médio mensal de energia elétrica da unidade é de 7.500 kWh, obtido por meio de medição direta dos três medidores instalados na instituição, em intervalo temporal delimitado. Esse padrão de consumo posiciona a escola como unidade de porte energético representativo dentro do cenário municipal, tornando-a campo adequado para análise de viabilidade de racionalização energética.

2.2 LEVANTAMENTO DE DADOS TÉCNICO-ENERGÉTICO

A etapa de diagnóstico consistiu no levantamento completo dos equipamentos responsáveis pelo consumo elétrico da unidade escolar e pode ser visualizado na Tabela 1. Antes da intervenção,

verificou-se que parte significativa das luminárias internas e externas permanecia acionada durante 24 horas diárias, independentemente da presença de pessoas nos ambientes, prática resultante da ausência de qualquer sistema de controle automatizado.

Tabela 1. . Equipamentos totais referentes a gastos elétricos.

Equipamentos	Quantidade	Observações
Lâmpadas	271	Média de 36w/h
Refletores	11	Média de 40w/h
Postes de luz	3	Cada poste possui 3 lâmpadas (luz pública)
Ventiladores	40	Média de 150w/h
Ar-condicionado	9 splint, 12 janela	12.000 btus / Média de 1150w/h
Detectores de Fumaça	8	Bateria
Sirene	1	Média de 1,6 w/h
Bomba de Água	1	Média de 850w/h
Televisão	7	Média de 110w/h
Câmeras	32	Média de 229w/h
Micro-ondas	1	Média de 300w/h
Cafeteira	1	Média de 500w/h
Geladeira	3	Média de 60w/h
Freezer	3	Média de 80w/h
Computadores	13	Média de 100w/h

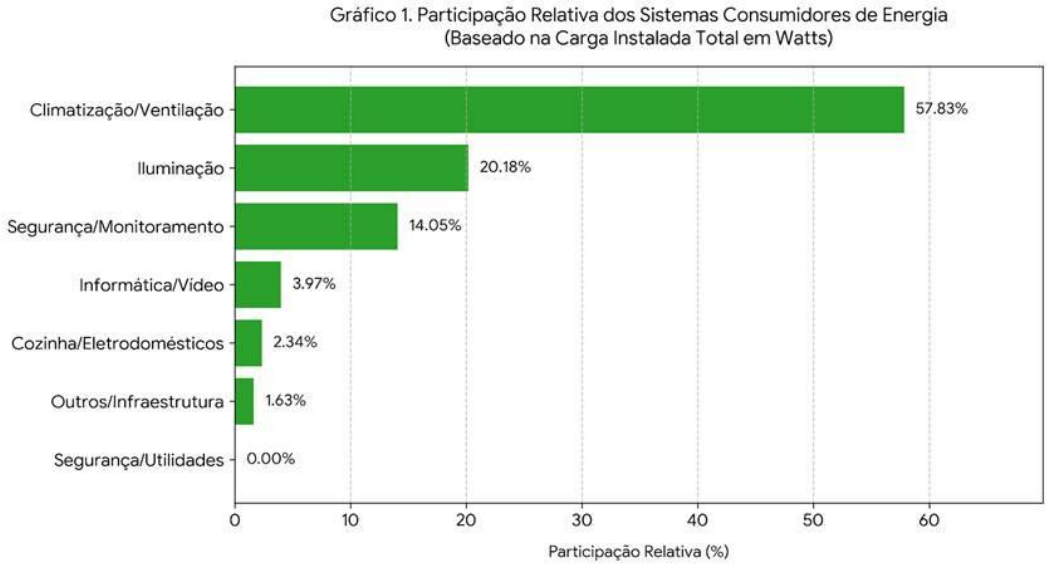
Fonte: Elaborado pelos autores

Para efeito de diagnóstico, foram utilizados dados secundários do Censo Escolar 2024 (INEP), complementados por levantamento técnico in loco realizado pelo pesquisador. A análise considerou variáveis estratégicas relacionadas à infraestrutura energética, hídrica e de gestão de resíduos. No que tange ao sistema elétrico, foram registradas as especificações técnicas de cada equipamento (potência nominal em watts), o tempo médio de funcionamento diário e a frequência semanal de uso, parâmetros essenciais para o cálculo do consumo energético mensal. Este consumo foi estimado pela soma dos produtos entre a potência nominal de cada dispositivo e seu respectivo tempo médio de funcionamento

diário, de modo que o consumo total em quilowatt-hora corresponde ao somatório de todas essas parcelas individuais, conforme modelado na equação 1:

$$\text{Consumo (kWh)} = \Sigma\ (\text{Potência_i} \times \text{Tempo_i}) \quad (1)$$

A partir do somatório quantitativo e das potências individuais discriminadas no inventário, realizou-se o agrupamento dos dispositivos por categorias funcionais para determinar o peso de cada macrosistema no consumo elétrico potencial da instituição. A distribuição percentual e a participação de cada setor sobre a carga total instalada da unidade escolar encontram-se plotadas e ordenadas de forma crescente no Gráfico.



Fonte: Elaborado pelos autores

Conforme dados do Gráfico, o macrosistema de climatização e ventilação desponta como o principal componente do consumo energético, concentrando mais da metade de toda a carga ativa predial. O setor de iluminação posiciona-se logo em seguida como a segunda maior fonte de demanda, o que justifica e valida a sua escolha como o alvo prioritário das intervenções de automação voltadas à eficiência energética conduzidas no escopo metodológico desta pesquisa.

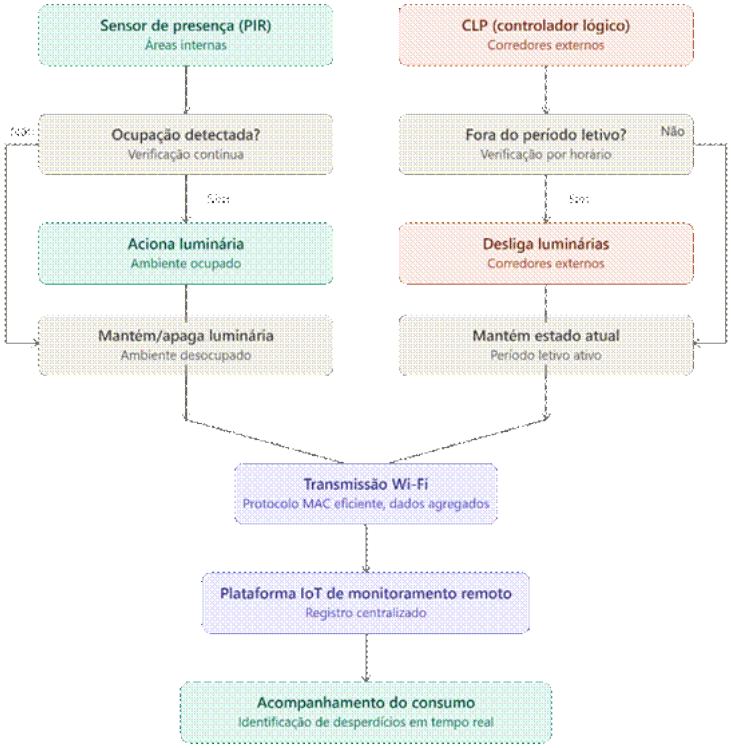
2.3 IMPLEMENTAÇÃO DA INTERVENÇÃO TECNOLÓGICA E ESTIMATIVA DE REDUÇÃO DE CO_2

A intervenção tecnológica integrou sensores de presença, controladores programáveis e dispositivos de monitoramento remoto para automação do sistema de iluminação da escola. Os sensores foram instalados em ambientes internos para detectar a ocupação dos espaços e acionar as

luminárias apenas quando necessário, enquanto controladores foram empregados em áreas externas para programar o desligamento automático da iluminação fora do período letivo.

Os dispositivos foram conectados a uma plataforma IoT de monitoramento remoto, possibilitando o acompanhamento do funcionamento do sistema e a identificação de oportunidades de redução do consumo energético. Conforme destacado por Motlagh *et al.* (2020), a automação baseada em IoT contribui para a eficiência energética em edificações ao adequar a operação dos equipamentos às condições reais de uso. A Figura apresenta o fluxograma simplificado do sistema de automação implementado.

Gráfico 2. Fluxograma do funcionamento lógico do sistema de automação IoT implementado.



Fonte: Elaborado pelos autores

Foram instalados 4 sensores de presença, banheiros e corredores e 3 controladores programáveis em áreas externas da unidade escolar.

A avaliação dos impactos da intervenção baseou-se na comparação entre os cenários pré e pós-implantação, considerando a redução da potência instalada e do tempo de operação das luminárias. Para a estimativa da economia financeira, adotou-se a tarifa de referência de R$ 0,92 kWh^{-1}, correspondente ao valor médio praticado pela concessionária responsável pelo fornecimento de energia elétrica na região.

A instalação de sensores automatizados permitiu estimar a redução potencial das emissões de dióxido de carbono equivalente, CO_2eq, pela multiplicação da energia economizada, Eecon,(384 kWh) e o fator de emissão, FE, do Sistema Interligado Nacional (SIN) referente ao período analisado (0,1264 $kgCO_2eq\ kWh^{-1}$)(International Energy Agency, 2024), permitindo estimar os benefícios ambientais associados à diminuição do consumo energético da unidade escolar. ⟶

$$CO_2eq = Eecon \times FE \longrightarrow CO_2eq = 485{,}376 \qquad (2)$$

2.4 INTERVENÇÃO EDUCATIVA E SENSIBILIZAÇÃO AMBIENTAL

Paralelamente à intervenção tecnológica, foram desenvolvidas ações educativas voltadas à promoção da sustentabilidade e ao uso racional da energia. As atividades tiveram como objetivo ampliar a compreensão dos estudantes sobre mudanças climáticas, eficiência energética, Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), consumo consciente de recursos naturais e tecnologias aplicadas à sustentabilidade, articulando, em linguagem acessível ao público infantil, os conteúdos técnicos do diagnóstico e da automação descritos nos itens anteriores com a realidade cotidiana vivenciada pelos próprios estudantes na unidade escolar.

A intervenção pedagógica foi estruturada em dez apresentações multimídia, organizadas em duas séries narrativas complementares e direcionadas aos alunos do 1º segmento do Ensino Fundamental (3º, 4º e 5º anos) da Escola Municipal Simar Machado Sodré. A primeira série, intitulada “Missão Escola do Futuro”, propõe uma narrativa de aventura na qual os estudantes assumem o papel de “exploradores” responsáveis por identificar os pontos de desperdício energético da escola e compreender o funcionamento dos novos dispositivos de automação instalados na unidade. A introdução do módulo e a caracterização do problema através da figura alegórica do “Monstro do Desperdício” são apresentadas nos materiais digitais das Figuras 4 (a e b), enquanto a dinâmica participativa real com a turma se encontra registrada na Figura 5.

Figura 1. Intervenção Pedagógica por meio do "Monstro do Desperdício".

	
(a) Tela inicial da projeção multimédia "Missão Escola do Futuro" voltada ao 3º ano.	(b) Slide de problematização pedagógica introduzindo o "Monstro do Desperdício".

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 2.Aplicação da série narrativa "Missão Escola do Futuro" com participação ativa dos discentes.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A segunda série, intitulada “Missão Simar 2.0”, retoma os mesmos indicadores diagnósticos 271 luminárias, 40 ventiladores, 21 aparelhos de ar-condicionado e consumo hídrico aproximado de 15.000 litros, sob uma identidade visual de caráter tecnológico, apresentando de forma sequencial o conceito de Internet das Coisas, o funcionamento dos sensores de presença instalados no sistema de iluminação e a redução do tempo de operação das luminárias de 24 para 8 horas diárias.

A identidade de *gameficação* inicial e o detalhamento cartográfico da infraestrutura escolar como uma “Base Secreta” são ilustrados nas Figuras 6 (a e b). As figuras 7 (a, b e c) são fotos da transposição didática dos conceitos de sensoriamento e Internet das Coisas (IoT).

Figura 3. Interface digital de abertura da série tecnológica "Missão: Simar Machado Sodré 2.0"

	
(a) Detalhamento cartográfico da infraestrutura escolar como uma "Base Secreta"	(b) Slide técnico em alta definição contendo o inventário do "Raio-X" de consumo da unidade.

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 4. Imagens das palestras didáticas sobre conceitos de sensoriamento e Internet das Coisas (IoT).

		
(a) Apresentação da planta analítica da escola ("Nossa Base Secreta").	(b) Exposição dialógica do conceito de IoT aplicado à automação escolar.	(c) Visão geral do envolvimento da turma durante a execução da Missão Simar 2.0.

Fonte: Elaborado pelos autores

Do ponto de vista metodológico, a escolha por uma linguagem narrativa, lúdica e fortemente ilustrada, justifica-se pela necessidade de promover a transposição didática de conceitos tecnicamente complexos como automação predial, sensoriamento e eficiência energética para um público infantil, em consonância com a perspectiva segundo a qual a formação de sujeitos ecologicamente conscientes

demanda metodologias capazes de articular conteúdo técnico, participação ativa e identificação do estudante com o ambiente escolar enquanto objeto de transformação.

As atividades buscaram relacionar conceitos de sustentabilidade, eficiência energética e mudanças climáticas com a realidade cotidiana dos estudantes, valendo-se de recursos narrativos e visuais como estratégia de transposição didática para o público do 1º segmento do Ensino Fundamental. Participaram das atividades 259 estudantes matriculados no 3º, 4º e 5º anos do Ensino Fundamental. Tais ações de educação ambiental desenvolvidas ao longo do projeto são apresentadas no Quadro.

Tabela 2. Ações de educação ambiental desenvolvidas na intervenção pedagógica.

Atividade	Público / Formato	Conteúdos abordados
Série "Missão Escola do Futuro"	1º segmento do Ensino Fundamental (3º ano); 12 telas multimídia narrativas	Diagnóstico energético da escola (luminárias, ventiladores, ar-condicionado); desperdício de energia e água; conceito de Internet das Coisas como automação inteligente
Série "Missão Simar 2.0"	1º segmento do Ensino Fundamental (4º e 5º anos); 12 telas multimídia em formato de mapa de missão tecnológico	Funcionamento dos sensores de presença; redução do tempo de operação das luminárias (24h para 8h); plataforma digital RAM Sustentável; papel dos estudantes como agentes multiplicadores
Instrumento de verificação de aprendizagem	Quiz aplicado a 259 alunos do 1º segmento do Ensino Fundamental, ao término das apresentações	Sustentabilidade, eficiência energética, mudanças climáticas, consumo consciente e tecnologias ambientais

Fonte: Elaborado pelos autores

Ao final da intervenção pedagógica, foi aplicado o instrumento de verificação de aprendizagem cujos resultados são apresentados e discutidos no item 3.5.

O instrumento de verificação de aprendizagem foi composto por 8 (oito) questões objetivas relacionadas à sustentabilidade, eficiência energética e IoT. A análise do corpus de dados concentrou-se no campo da estatística descritiva, organizando as respostas dos estudantes em escalas métricas categorizadas segundo o número de questões respondidas incorretamente. Os resultados são apresentados de forma tabular e gráfica por meio do mapeamento de frequências absolutas, relativas e acumuladas, recursos empregados para mensurar a aderência pedagógica e a eficácia da transposição didática das intervenções realizadas. Essa organização permite identificar os índices de acerto integral, os padrões de erro mais recorrentes e o desempenho geral da amostra, articulando os dados quantitativos com as observações qualitativas de campo coletadas durante a aplicação das atividades.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DA UNIDADE ESCOLAR

No sistema de iluminação analisado, a situação anterior à intervenção era composta por vinte lâmpadas de 36W, resultando em uma potência instalada total de 0,72 kW. Considerando que essas luminárias permaneciam acionadas de forma contínua durante as 24 horas do dia, o consumo diário alcançava 17,28 KWh. (Consumo diário pré-intervenção = 0,72 kW × 24h = 17,28 kWh)

Após a intervenção, a substituição de dez lâmpadas por modelos LED de 20W, mantidas as demais dez lâmpadas originais de 36W, reduziu a potência total do conjunto para 0,56 kW. Com a automação limitando o tempo de funcionamento a 8 horas diárias, o consumo passou a ser de 4,48 KWh por dia. (Consumo diário pós-intervenção = 0,56 kW × 8h = 4,48 kWh)

A redução percentual obtida no consumo diário do sistema de iluminação foi de aproximadamente 74%, calculada pela diferença entre os consumos anterior e posterior dividida pelo consumo inicial. Esse resultado expressa o impacto combinado da eficiência tecnológica das lâmpadas LED e, sobretudo, da reconfiguração do regime operacional promovida pela automação IoT. (Redução = (17,28 – 4,48) / 17,28 × 100 ≈ 74,07%)

Projetando a economia diária de 12,80 quilowatt-hora para o ciclo mensal de 30 dias, obtém-se uma redução de 384 kWh por mês. Em relação ao consumo global médio da unidade escolar, de 7.500 kWh mensais, essa economia representa aproximadamente 5,12% do total consumido, evidenciando que mesmo uma intervenção localizada e de baixo custo é capaz de produzir impacto mensurável na eficiência energética da escola como um todo. (Impacto global = 384 / 7.500 × 100 ≈ 5,12%)

Em termos financeiros, a economia estimada corresponde a R$353,28 mensais, com base na tarifa de R$0,92/kWh. Esses resultados evidenciam que a combinação entre eficiência tecnológica (LED) e otimização do regime operacional (automação IoT) produz economias substancialmente superiores às obtidas pela simples troca de equipamentos, reforçando o argumento de Motlagh *et al.* (2020) de que a IoT é um habilitador central da eficiência energética em edificações.

3.2 ANÁLISE DO FATOR DETERMINANTE DA REDUÇÃO ENERGÉTICA E IMPACTO AMBIENTAL

A análise dos dados revela que o fator de maior impacto na redução do consumo não foi a substituição tecnológica das lâmpadas, mas a reconfiguração do tempo de operação. Para ilustrar esse ponto, considere o cenário hipotético em que apenas a troca das 10 lâmpadas de 36W para 20W fosse realizada, mantendo o regime de 24 horas diárias: a redução diária seria de 3,84 kWh (de 17,28 para

13,44 kWh), correspondendo a uma economia de apenas 22,2%. Em contraste, mantendo as lâmpadas originais de 36W mas reduzindo o tempo de funcionamento para 8 horas diárias, a redução diária seria de 11,52 kWh, economia de 66,7%. A combinação dos dois fatores resultou na redução de 74,07% observada.

Esse achado tem implicações diretas para a formulação de políticas de eficiência energética em escolas públicas. Ele indica que desperdícios estruturais estão mais associados à ausência de controle operacional, luminárias permanecendo acesas em ambientes vazios, durante todo o período noturno ou em dias sem aula, do que à obsolescência tecnológica dos equipamentos. Arshad *et al.* (2017) reforçam esse argumento ao proporem cinco princípios para uma IoT verde, entre os quais destaca-se a necessidade de reduzir o tempo de atividade dos dispositivos e sistemas por meio de mecanismos inteligentes de controle de presença e luminosidade. Nesse sentido, o resultado obtido também dialoga com a advertência de Freitag *et al.* (2021) sobre os "efeitos rebote": ao demonstrar que a simples troca de lâmpadas por modelos mais eficientes, sem reconfiguração do regime operacional, geraria uma economia muito inferior (22,2% versus 74,07%), este estudo evidencia que ganhos tecnológicos isolados podem ser insuficientes para produzir impactos climáticos significativos, sendo a mudança comportamental e operacional, viabilizada pela automação IoT, o fator verdadeiramente transformador.

A transposição desse ganho de eficiência operacional para a dimensão da sustentabilidade ecológica permite quantificar a contribuição direta do projeto para a mitigação das mudanças climáticas. Ao reduzir o desperdício de eletricidade diretamente na fonte, a automação baseada em IoT diminui de forma sistemática a pegada de carbono da instituição de ensino, alinhando a gestão pública local às metas globais de descarbonização preconizadas pela Agenda 2030. Essa contribuição pode ser quantificada pela aplicação da equação $CO_2eq = Econ \times FE$ aos valores anuais de economia energética (4.608 kWh/ano × 0,1264 kg CO_2eq/kWh), cujos resultados encontram-se sistematizados na Tabela.

Tabela 3. Impactos ambientais e mitigação de emissões da intervenção piloto.

Indicador	Valor
Energia economizada	4.608 kWh/ano
Fator de emissão (SIN)	0,1264 kg CO_2eq/kWh
CO_2 evitado	582,45 kg CO_2eq/ano

Fonte: Elaborado pelos autores

A partir da análise dos dados consolidados na Tabela, observa-se que a redução do desperdício elétrico evitou a liberação de 582,45 kg CO_2eq anualmente na atmosfera. Esse indicador expressa o

volume de gases de efeito estufa que deixaram de ser gerados pelas usinas termoelétricas complementares da matriz energética nacional para suprir o acionamento desnecessário das luminárias do campus, corroborando a perspectiva de Freitag *et al.* (2021) de que aplicações de IoT voltadas à eficiência energética predial podem gerar benefícios ambientais líquidos capazes de compensar os impactos da própria infraestrutura digital.

Embora esse valor absoluto apresente um caráter discreto quando confrontado com o panorama das emissões globais associadas ao setor energético — que atingiram a marca de 37,4 bilhões de toneladas (International Energy Agency, 2024) —, o resultado adquire relevância científica quando analisado sob a ótica da escalabilidade e do efeito cumulativo. É fundamental destacar que a mitigação de mais de meia tonelada de CO_2eq ao ano foi obtida a partir de um projeto piloto restrito a apenas 20 das 285 luminárias da escola, o que dialoga diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, em particular o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível) e o ODS 13 (Ação Climática).

Ao projetar esse cenário de descarbonização para uma automação expandida, abrangendo os subsistemas de climatização e carga auxiliar da unidade — cuja estimativa original prevê uma redução global de 15% no consumo total de energia —, os benefícios ambientais líquidos assumem um patamar significativamente superior. Multiplicado pelo número de escolas públicas municipais que compartilham do mesmo padrão de desperdício estrutural por ausência de controles inteligentes, o conceito de Green IoT consolida-se como um vetor de alta eficiência e baixo custo para a transição energética do patrimônio público edificado, transformando a escola em um laboratório vivo de educação ambiental experiencial e de mitigação climática aplicada.

3.3 PROJEÇÃO DO IMPACTO DA AUTOMAÇÃO EXPANDIDA

Embora a intervenção realizada tenha sido limitada ao sistema de iluminação e a apenas 20 das 285 luminárias da escola, os resultados obtidos permitem projetar o impacto potencial de uma automação abrangente. O levantamento técnico identificou que o sistema de climatização (21 aparelhos de ar-condicionado e 40 ventiladores) e os equipamentos auxiliares (televisões, computadores, micro-ondas e outros) também apresentam padrões de uso com elevado potencial de racionalização. Considerando a extensão do modelo de automação proposto para esses sistemas, a pesquisa original estimou uma redução global da ordem de 15% no consumo total da unidade, valor que posiciona a escola dentro dos parâmetros de eficiência energética alcançados em projetos internacionais de escolas sustentáveis (Ramos, 2025).

3.4 AVALIAÇÃO DA APRENDIZAGEM E PERCEPÇÃO DOS ESTUDANTES

A avaliação dos impactos educacionais foi realizada por meio da aplicação de um instrumento de verificação de aprendizagem em formato de quiz, conduzido ao término das dez apresentações descritas no item 3.4. O instrumento foi composto por questões relacionadas a sustentabilidade, eficiência energética, mudanças climáticas, consumo consciente e tecnologias ambientais, e foi respondido por 259 alunos do 1º segmento do Ensino Fundamental (3º, 4º e 5º anos) da Escola Municipal Simar Machado Sodré. Os resultados foram organizados em cinco categorias, conforme o número de questões respondidas incorretamente por aluno, conforme apresentado na Tabela.

Tabela 4. Distribuição dos resultados do instrumento de verificação de aprendizagem (n = 259).

Categoria de desempenho	Nº de alunos	Frequência relativa (%)	Frequência acumulada (%)
0 erros (acerto total)	145	55,98	55,98
1 erro	50	19,31	75,29
2 erros	35	13,51	88,80
3 erros	26	10,04	98,84
Erro em todas as questões	3	1,16	100,00
Total	259	100,00	—

Fonte: Elaborado pelos autores

A leitura dos dados evidencia que 145 alunos, correspondentes a 55,98% do total de respondentes, obtiveram acerto integral no instrumento aplicado, indicando elevada compreensão dos conteúdos abordados nas apresentações. Quando considerados conjuntamente os alunos que cometeram, no máximo, um erro, a proporção se eleva para 75,29% (195 estudantes), o que sugere que aproximadamente três quartos do público atingido demonstraram domínio consolidado, ou próximo do consolidado, das temáticas relacionadas à automação predial, à IoT e à eficiência energética. Em contrapartida, observa-se que 64 alunos (24,71%) cometeram três ou mais erros, dos quais 26 (10,04%) erraram exatamente três questões e apenas 3 alunos (1,16%) não acertaram nenhuma questão, o que sugere que, mesmo entre os estudantes com maior dificuldade de retenção dos conteúdos, houve algum grau de assimilação parcial da temática apresentada.

Os resultados do instrumento de verificação de aprendizagem corroboram, em caráter quantitativo, as observações qualitativas de campo realizadas durante a execução das atividades pedagógicas, segundo as quais se constatou aumento do interesse discente e maior participação em debates relacionados à temática socioambiental. A elevada taxa de acerto integral (55,98%) e a

concentração de mais de 88% dos respondentes nas três primeiras categorias de desempenho (zero, um ou dois erros) constituem indícios de que a estratégia narrativa e visual adotada nas apresentações "Missão Escola do Futuro" e "Missão Simar 2.0" favoreceu a compreensão, por parte do público infantil, de conceitos tecnicamente complexos, como IoT, automação de iluminação e eficiência energética. Cabe ressaltar que tais resultados possuem natureza descritiva e exploratória, não tendo sido empregados testes inferenciais de significância estatística, tampouco grupo de controle ou aplicação de instrumento avaliativo em momento anterior à intervenção (pré-teste), devendo ser interpretados como indicadores complementares de aderência ao conteúdo pedagógico desenvolvido.

Considerando o público-alvo estudantes do 1º segmento do Ensino Fundamental e a complexidade técnica inerente aos temas de automação predial e IoT, os resultados sugerem que a transposição didática realizada por meio de recursos narrativos, ilustrativos e interativos constitui estratégia pedagógica adequada para a disseminação de conceitos de sustentabilidade e tecnologia em contextos de educação básica. Esses achados reforçam que a sensibilização ambiental promovida pela intervenção educativa constitui dimensão complementar e indissociável dos resultados técnicos de eficiência energética apresentados nos itens 3.1 a 3.3, reafirmando que a transformação da escola em um laboratório vivo de práticas sustentáveis, conforme proposto na seção 2, depende tanto da automação dos sistemas físicos quanto da formação de sujeitos ecologicamente conscientes.

4 CONCLUSÃO

Este artigo demonstrou que a automação da iluminação por meio de tecnologias IoT acessíveis constitui estratégia tecnicamente viável e financeiramente relevante para a redução do consumo energético em escolas públicas brasileiras. A intervenção realizada na Escola Municipal Simar Machado Sodré resultou em uma economia estimada de 384 kWh mensais, equivalente a 5,12% do consumo total da unidade, com potencial de ampliação para aproximadamente 15% mediante a expansão da automação para os demais sistemas da escola.

O principal achado da pesquisa reorienta o foco das políticas de eficiência energética em edificações públicas: o fator determinante da redução não foi a modernização tecnológica dos equipamentos, mas a eliminação do funcionamento desnecessário por meio de controle automatizado baseado em sensores de presença e programadores horários. Esse resultado confirma o argumento de Motlagh *et al.* (2020) de que a IoT habilita uma transformação do setor energético de um modelo centralizado para um modelo distribuído, inteligente e integrado, capaz de responder em tempo real às condições reais de uso.

A perspectiva da Green IoT, proposta por Arshad *et al.* (2017), é igualmente validada por este estudo: ao reduzir o tempo de atividade de sistemas de iluminação, a automação IoT não apenas otimiza o consumo das edificações, mas concretiza o princípio de que a própria tecnologia deve ser orientada à sustentabilidade ambiental. Em um país onde a rede pública de energia alimenta a quase totalidade das escolas e onde o desperdício por ausência de controle operacional é generalizado, a IoT representa uma alavanca de alto impacto para a transição energética no setor educacional.

A sustentabilidade escolar, conforme evidenciado, não emerge de intervenções isoladas, mas de processos progressivos, fundamentados tecnicamente e sustentados institucionalmente. O modelo eco-tecnológico proposto inaugura um caminho possível para a transformação das escolas públicas em ambientes mais eficientes, pedagógicos e alinhados aos compromissos da Agenda 2030.

A ausência de autorização institucional para identificar formalmente qual dos três medidores de energia alimenta o setor onde a automação foi instalada inviabilizou a análise comparativa direta entre consumo pré e pós-intervenção por circuito específico. Adicionalmente, a impossibilidade de acesso às faturas de energia elétrica durante o período da pesquisa restringiu a validação empírica dos resultados ao campo das estimativas técnicas baseadas em modelagem. Essas limitações são inerentes ao contexto de pesquisa em ambiente público e reforçam a necessidade de maior integração entre iniciativas acadêmicas e gestão institucional escolar para viabilizar estudos longitudinais com dados empíricos completos.

Quando confrontados com a literatura internacional, os resultados aqui obtidos encontram respaldo e, ao mesmo tempo, revelam um diferencial metodológico relevante. Do ponto de vista técnico, a viabilidade da automação de iluminação por sensoriamento de presença já havia sido demonstrada por Montalbo e Enriquez (2020), que desenvolveram um controlador IoT baseado em NodeMCU (placa de desenvolvimento programável) e sensor infravermelho passivo para o acionamento automático de luzes em salas de aula universitárias, validando a arquitetura de sensor-controlador-atuador adotada neste estudo, ainda que em nível de ensino distinto.

Do ponto de vista pedagógico e de eficiência energética em escolas, Paganelli *et al.* (2019), no âmbito do projeto europeu GAIA, relatam economia de aproximadamente 21 kWh/dia em uma escola italiana obtida por conscientização comportamental dos estudantes para o desligamento manual de luminárias, sem uso de automação IoT plena. Esse patamar, alcançado exclusivamente por mudança de comportamento, é proporcionalmente inferior ao observado neste estudo (74,07% de redução), sugerindo que a automação IoT, ao eliminar a dependência da ação humana consciente e contínua, constitui uma estratégia mais robusta e escalável do que a sensibilização isolada. Os mesmos autores também empregaram questionários de satisfação e provas escritas para avaliar o engajamento e a

apropriação dos conceitos de sustentabilidade pelos estudantes, abordagem conceitualmente análoga ao instrumento de verificação de aprendizagem aplicado neste estudo, ainda que este tenha adotado uma escala de erros mais objetiva e voltada ao público do 1º segmento do Ensino Fundamental.

A convergência entre os três estudos, realizados em contextos escolares, culturais e de ensino distintos (Brasil, Itália e Filipinas), reforça a validade externa da proposta de integrar automação IoT e educação ambiental como estratégia replicável de eficiência energética em ambientes escolares.

REFERÊNCIAS

Agência das Nações Unidas. (2015). Transformando nosso mundo: A Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. ONU. https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf

Arshad, R., Zahoor, S., Shah, M. A., Wahid, A., & Yu, H. (2017). Green IoT: An investigation on energy saving practices for 2020 and beyond. IEEE Access, 5, 15667–15681. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2686092

Freitag, C., Berners-Lee, M., Widdicks, K., Knowles, B., Blair, G. S., & Friday, A. (2021). The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations. Patterns, 2(9), 100340. https://doi.org/10.1016/j.patter.2021.100340

Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. (2024). INEP-DATA estatísticas censo escolar 2024. INEP.

International Energy Agency. (2024). CO2 emissions in 2023. IEA. https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023

Montalbo, F. J., & Enriquez, E. (2020). An IoT smart lighting system for university classrooms. 2020 International Symposium on Educational Technology (ISET), 3–7. https://doi.org/10.1109/ISET49818.2020.00011

Motlagh, N. H., Mohammadrezaei, M., Hunt, J., & Zakeri, B. (2020). Internet of Things (IoT) and the energy sector. Energies, 13(2), 494. https://doi.org/10.3390/en13020494

Padmannavar, S., & Patil, C. C. (2025). Energy-efficient protocols for IoT-based smart cities. International Journal of Scientific Research and Engineering Development, 8(4), 1281–1289. DOI :10.5281/zenodo.16750680

Paganelli, F., Mylonas, G., Cuffaro, G., & Nesi, I. (2019). Experiences from using gamification and IoT-based educational tools in high schools towards energy savings. Em I. Chatzigiannakis, B. De Ruyter, & I. Mavrommati (Eds.), Ambient Intelligence: AmI 2019 (Lecture Notes in Computer Science, vol. 11912). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34255-5_6