


METODOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE CONDUTORES ELÉTRICOS DE BT: UMA ABORDAGEM INTEGRADA DE CUSTOS, FLUXO DE POTÊNCIA E EMISSÃO DE CO₂

METHODOLOGY FOR THE ECONOMIC SIZING OF LOW-VOLTAGE ELECTRICAL CONDUCTORS: AN INTEGRATED APPROACH TO COSTS, POWER FLOW, AND CO₂ EMISSIONS

METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO ECONÓMICO DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS DE BAJA TENSIÓN: UN ENFOQUE INTEGRADO DE COSTOS, FLUJO DE POTENCIA Y EMISIÓN DE CO₂

 <https://doi.org/10.56238/arev7n11-012>

Data de submissão: 04/10/2025

Data de publicação: 04/11/2025

Cláudio Gonçalves de Azevedo

DSc. em Engenharia Elétrica

Instituição: Escola Superior de Tecnologia - Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

E-mail: cgoncalves@uea.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5584-3414>

Vinícius Emanuel Barroso

Engenheiro Eletricista

Instituição: Escola Superior de Tecnologia - Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

E-mail: veb.eng20@uea.edu.br

Levi Lima da Silva

Técnico em Eletrotécnica

Instituição: Escola Superior de Tecnologia - Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

E-mail: levilima995@gmail.com

Heinrich David Rodrigues Marques Neto

Graduando em Engenharia Elétrica

Instituição: Escola Superior de Tecnologia - Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

E-mail: hdrmn.eng19@uea.edu.br

Lucas Souza de Freitas

Graduando em Engenharia Elétrica

Instituição: Escola Superior de Tecnologia - Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

E-mail: lsdf.eng21@uea.edu.br

José Gomes da Silva

Esp. em Robótica Educacional

Instituição: Escola Superior de Tecnologia - Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

E-mail: jgmsilva@uea.edu.br

Jucimar Maia da Silva Junior

DSc. em Engenharia Elétrica

Instituição: Escola Superior de Tecnologia - Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

E-mail: jjunior@uea.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-1382-6100>

RESUMO

Esse trabalho apresenta uma metodologia para o dimensionamento econômico e a análise técnico-econômica de cabos alimentadores de baixa tensão, integrando estudos de custo, fluxo de potência e emissões de CO₂ para apoiar decisões mais eficientes e sustentáveis na escolha da seção de condutores. A metodologia foi validada em um estudo de caso, no qual foi analisado o circuito alimentador do QGBT2 (46 kVA/220 V), instalado na Escola Superior de Tecnologia (EST/UEA). O resultado inicial indicou uma seção econômica de 226 mm², conduzindo à análise de duas seções padronizadas: 185 mm² e 240 mm². O cabo de 240 mm² apresentou o menor custo total (R\$ 237.176,56) e um custo operacional 60 % inferior ao do cabo de 95 mm² (atualmente alimentador do QGBT2), além de dissipar 2,61 vezes menos energia. O desvio de tensão no cabo de 95 mm² foi de 2,5 % e de 0,97 % no cabo de 240 mm². A análise de viabilidade econômica indicou payback de 13 anos e valor presente líquido de R\$ 12.995,80. Os resultados reforçam a importância do dimensionamento técnico e econômico, conforme as normas NBR 5410:2004 e NBR 15920:2011, bem como estudos complementares que contribuem para decisões mais assertivas.

Palavras-chave: Análise Técnico-Econômica. Dimensionamento Econômico de Condutor. Eficiência Energética. Emissão de CO₂. Fluxo de Potência.

ABSTRACT

This study presents a methodology for the economic sizing and techno-economic analysis of low-voltage feeder cables, integrating cost, power flow, and CO₂ emission assessments to support more efficient and sustainable conductor section selection. The proposed approach was validated through a case study analyzing the QGBT2 feeder circuit (46 kVA/220 V) installed at the School of Technology of the Amazonas State University (EST/UEA). The results indicated an economic cross-section of 226 mm², leading to the evaluation of two standardized options: 185 mm² and 240 mm². The 240 mm² cable achieved the lowest total cost (R\$ 237,176.56) and an operational cost 60% lower than the 95 mm² cable currently in service, while dissipating 2.61 times less energy. Voltage drop was reduced from 2.5% to 0.97%. The economic feasibility analysis showed a payback period of 13 years and a net present value of R\$ 12,995.80. The findings highlight the importance of technical and economic sizing in accordance with NBR 5410:2004 and NBR 15920:2011 standards, complemented by additional studies aimed at improving decision-making efficiency.

Keywords: Techno-Economic Analysis. Economic Conductor Sizing. Energy Efficiency. CO₂ Emission. Power Flow.

RESUMEN

Este trabajo presenta una metodología para el dimensionamiento económico y el análisis técnico-económico de cables alimentadores de baja tensión, integrando estudios de costos, flujo de potencia y emisiones de CO₂, con el objetivo de apoyar decisiones más eficientes y sostenibles en la selección de la sección de los conductores. La metodología fue validada mediante un estudio de caso en el que se analizó el circuito alimentador del QGBT2 (46 kVA/220 V), instalado en la Escuela Superior de Tecnología (EST/UEA). El resultado inicial indicó una sección económica de 226 mm², lo que condujo al análisis de dos secciones normalizadas: 185 mm² y 240 mm². El cable de 240 mm² presentó el menor

costo total (R\$ 237.176,56) y un costo operativo un 60% inferior al del cable de 95 mm² (actual alimentador del QGBT2), además de disipar 2,61 veces menos energía. La caída de tensión en el cable de 95 mm² fue del 2,5%, mientras que en el cable de 240 mm² fue del 0,97%. El análisis de viabilidad económica indicó un período de recuperación de 13 años y un valor presente neto de R\$ 12.995,80. Los resultados refuerzan la importancia del dimensionamiento técnico y económico conforme a las normas NBR 5410:2004 y NBR 15920:2011, así como de los estudios complementarios que contribuyen a decisiones más precisas y sostenibles.

Palabras clave: Análisis Técnico-Económico. Dimensionamiento Económico de Conductores. Eficiencia Energética. Emisión de CO₂. Flujo de Potencia.

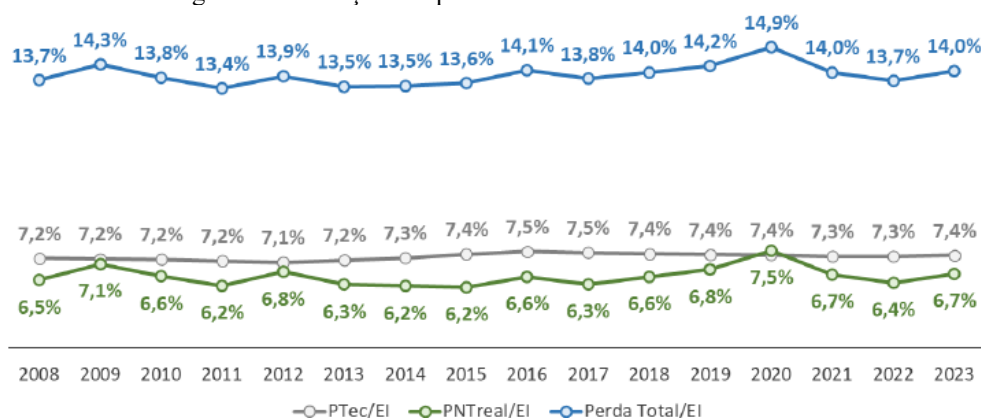
1 INTRODUÇÃO

O Brasil, país de dimensões continentais, com área territorial superior a 8 milhões de km² e população acima de 203 milhões de habitantes, apresenta elevados índices de perdas de energia em diversos setores. No caso específico da energia elétrica, as perdas na rede de distribuição correspondem à diferença entre a energia adquirida pelas distribuidoras e aquela efetivamente faturada aos consumidores, sendo classificadas em perdas técnicas e perdas não técnicas.

As perdas técnicas decorrem, principalmente, da dissipação de energia por efeito Joule em cabos e condutores que transportam correntes elétricas em diferentes comprimentos e seções transversais nas redes de distribuição. Em 2023, corresponderam a 7,4% da energia elétrica injetada (EI), o que equivale a 42 TWh. Já as perdas não técnicas, associadas a furtos de energia, fraudes em medições, falhas e defeitos em equipamentos ou erros em sistemas de medição, totalizaram 6,7% da EI, ou aproximadamente 38,2 TWh.

Dessa forma, em 2023, as perdas técnicas e não técnicas somaram 80,2 TWh, correspondendo a 14,1% da energia elétrica injetada no sistema nacional. A Figura 1 ilustra a evolução histórica dessas perdas no Brasil, período de 2008 a 2023 (ANEEL, 2024). As perdas de energia elétrica possuem ainda um forte impacto financeiro, refletindo diretamente nas tarifas, uma vez que as distribuidoras repassam seus custos aos consumidores. Segundo a ANEEL (2024), o custo aproximado das perdas técnicas em 2023 foi de R\$ 10,3 bilhões, valor calculado a partir da multiplicação dos montantes de energia perdida pelo preço médio da energia nos processos tarifários, sem a inclusão de tributos.

Figura 1 – Evolução das perdas no sistema elétrico brasileiro



Fonte: ANEEL (2024).

Em estudo sobre perdas em redes elétricas, Barbosa e Amorim (2025) destacam a relevância das perdas elétricas, técnicas e não-técnicas, como um desafio significativo para a eficiência energética. Os autores concluem que projetos de redes de distribuição planejados e construídos

segundo normas e padrões técnicos específicos promovem maior eficiência, confiabilidade do sistema e, conseqüentemente, reduzem custos operacionais e impactos socioeconômicos.

A eficiência energética compreende um conjunto de atividades e processos voltados não apenas para a redução do consumo de energia, mas também para a mitigação da emissão de gases poluentes. Conforme destaca Viana (2012), a eficiência energética é aumentada quando um serviço é realizado ou um bem é produzido com menor quantidade de energia em relação ao consumo anteriormente necessário.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo propor uma metodologia para o dimensionamento da seção econômica e para a análise técnico-econômica de cabos alimentadores de circuitos elétricos de baixa tensão. A abordagem contempla, adicionalmente, a avaliação das emissões de dióxido de carbono, o estudo das perdas de energia elétrica e a análise de fluxo de potência, de modo a fornecer subsídios mais robustos para a escolha da seção de condutor mais adequada ao atendimento de um Quadro de Distribuição de Baixa Tensão (QGBT2).

O estudo foi conduzido na Escola Superior de Tecnologia (EST), unidade acadêmica vinculada à Universidade do Estado do Amazonas (UEA), que abriga cursos de engenharia e dispõe de uma área predial composta por salas de aula, coordenações de curso e setores administrativos, além de laboratórios, auditório, quadra esportiva, restaurante universitário e outras instalações.

O dimensionamento adequado da seção dos cabos elétricos é fundamental para assegurar a segurança das pessoas, a durabilidade da instalação elétrica e a eficiência energética do sistema. De acordo com Teixeira Júnior (2004), o correto dimensionamento técnico dos condutores exige a consideração de diversas variáveis relacionadas às condições de operação e instalação.

No que se refere às condições de operação, o autor destaca a necessidade de se conhecer a tensão nominal, a frequência do sistema, a potência aparente em regime normal e de emergência, o fator de potência, a corrente máxima de curto-circuito, o tempo de atuação dos dispositivos de proteção e o tipo de aterramento adotado. Já entre os fatores ligados às condições de instalação, incluem-se o comprimento do circuito, a disposição dos condutores (forma de agrupamento), as características do ambiente de instalação, a profundidade (no caso de cabos subterrâneos), a resistividade térmica do solo, a temperatura média do local e a exposição à radiação solar.

2 METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo proposto, realizou-se uma pesquisa aplicada com abordagem qualitativa e quantitativa no sistema elétrico de baixa tensão (BT) da Escola Superior de Tecnologia (EST). A infraestrutura analisada contempla salas de aula, coordenações de curso, setores

administrativos, laboratórios, auditório, quadra esportiva e restaurante universitário, entre outros espaços.

A metodologia adotada contemplou o dimensionamento da seção econômica e a análise técnico-econômica de cabos de circuitos de potência em BT, complementada por cálculos de emissões de CO₂ e estudo de fluxo de potência, de modo a fornecer subsídios mais abrangentes para a escolha da seção ideal do cabo alimentador.

O desenvolvimento metodológico foi baseado em métodos analíticos, com a aplicação de equações estabelecidas na norma NBR 15920:2011 e em literatura técnica especializada, além do uso de ferramenta computacional para a modelagem e análise do sistema elétrico. A metodologia foi estruturada em 07 (sete) etapas principais:

Para o desenvolvimento da metodologia foram aplicados métodos analíticos por meio de equações disponíveis na norma NBR 15920:2011 e literatura especializada, bem como ferramenta computacional para o estudo de rede elétrica. A metodologia desenvolvida foi dividida em 07 (sete) etapas:

1. Vistoria e medições no sistema elétrico;
2. Dimensionamento da seção econômica e definição de seções padronizadas;
3. Análise de custos das seções econômicas selecionadas;
4. Cálculo das emissões de CO₂ associadas aos cabos alimentadores;
5. Estudo do fluxo de potência do circuito alimentador;
6. Avaliação econômica das alternativas de seções dos cabos;
7. Integração e análise dos resultados para subsidiar a decisão quanto à seção de cabo mais adequada.

2.1 ESTUDO DE CASO NA ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA

A metodologia proposta foi aplicada para determinar a seção econômica e realizar a análise técnico-econômica de um circuito alimentador para um Quadro Geral de Distribuição em BT, trifásico com neutro, tensões 220V/127V - QGBT2, instalado no bloco A da EST. A análise é complementada por estudos de emissões de CO₂ e fluxo de potência. Na Tabela 1 constam valores coletados e medidos no QGBT2.

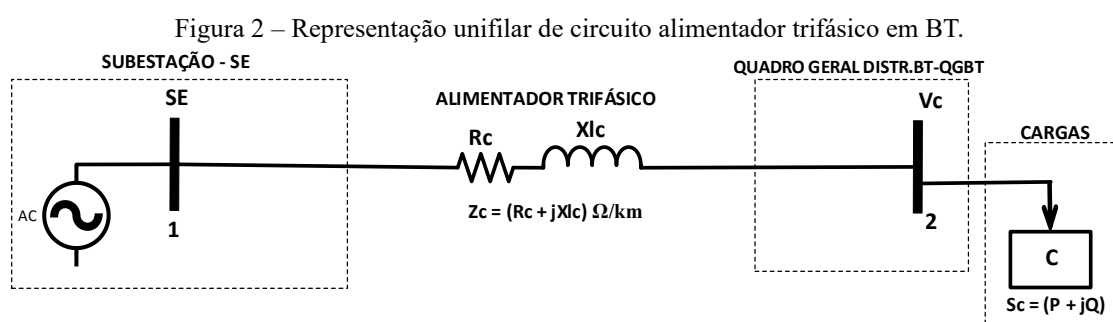
Tabela 1 – Dados de instalação elétrica de QGBT2

Data: 9/7/24	Hora: 14h	Temp. interna QGBT (°C): 34	Temp. Conexões/cabos (°C): 47,7
Seção cabo fase (mm²): 95	Seção cabo neutro (mm²): 95	Carga do QGBT: Bloco A	
Corrente fase A (A): 95,2	Corrente fase B (A): 80,4	Corrente fase C (A): 113,1	
Tensão fase A (V): 125,7	Tensão fase B (V): 125,4	Tensão fase C (V): 126,3	

Tensão fase AB (V): 222,3	Tensão fase BC (V): 221,6	Tensão fase CA (V): 222,8
P. Ativa fase A (kW): 11,25	P. Ativa fase B (kW): 9,4	P. Ativa fase C (kW): 13,93
Fator de potência A: 0,94	Fator de potência B: 0,93	Fator de potência C: 0,97
Dist. SE - QGBT2 (m): 123	Corrente disjuntor geral (A): 600	

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 2 apresenta o diagrama unifilar do circuito elétrico em análise. Além deste, existem outros três sistemas alimentadores com configurações semelhantes, denominados QGBT3, QGBT4 e QGBT5. A Figura 3 mostra a vista frontal do quadro QGBT2 e a medição do fator de potência na fase A.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 3 – Medições no QGBT2



Fonte: Elaboração Própria.

Para a aplicação da metodologia proposta, considera-se o seguinte estudo de caso: circuito alimentador em baixa tensão trifásico com neutro, operando em 220/127 V e 60 Hz, composto por cabos unipolares de cobre, com isolamento em EPR, temperatura máxima de operação de 90 °C e cobertura em PVC, tensão nominal de 0,6/1 kV. Os cabos estão instalados em eletrodutos de PVC rígido, embutidos em solo ou alvenaria, a uma profundidade aproximada de 0,60 m. O método de instalação corresponde ao 61A, com método de referência D, e não há outros circuitos no conduto do alimentador do QGBT2.

O circuito possui comprimento total de 123 m, temperatura ambiente média de 40 °C, corrente de projeto máxima de 120 A no primeiro ano e taxa de crescimento anual de 1%. O fator de potência é 0,93 indutivo e a queda de tensão admissível no circuito alimentador é de 2,5%. O sistema elétrico opera 2.880 horas por ano, considerando-se uma tarifa média de energia de 0,68761 R\$/kWh no primeiro ano. A variação anual da demanda foi desconsiderada, adotando-se um reajuste médio anual da tarifa de energia de 3%, sem considerar a inflação.

Para fins de cálculo econômico, adotou-se o valor médio unitário dos cabos elétricos, incluindo mão de obra de instalação e acessórios, representado por $A = 1,0303 \text{ R\$/m} \cdot \text{mm}^2$. A análise financeira considera um período de 30 anos como vida econômica dos cabos e uma taxa de capitalização de 5% ao ano.

Em relação à vida útil dos cabos elétricos, o engenheiro eletricista Hilton Moreno, professor e consultor técnico, observa que não há normas técnicas específicas que estabeleçam um valor exato. No entanto, com base em ensaios de envelhecimento acelerado realizados em laboratório, bem como na análise de cabos retirados de instalações antigas, estima-se que, desde que sejam rigorosamente seguidas as recomendações técnicas de projeto, instalação, operação e manutenção, a vida útil dos cabos pode variar entre 20 e 30 anos.

A perda de energia nos cabos elétricos compromete a eficiência do sistema de transporte de eletricidade, exigindo maior geração de energia para suprir a mesma demanda. Esse processo acarreta aumento nos custos operacionais e contribui significativamente para a elevação das emissões de dióxido de carbono (CO₂). Entre os efeitos associados às perdas elétricas, destacam-se: a queda de tensão, a degradação da qualidade do fornecimento de energia, o uso ineficiente da eletricidade pelo consumidor final e o agravamento das perdas com o crescimento da demanda energética (Myat, Myint e Phyu, 2018).

Diante desse cenário, o projeto de uma instalação elétrica deve considerar não apenas os critérios técnicos convencionais para o dimensionamento da seção dos cabos, mas também aspectos econômicos e ambientais. Isso inclui avaliar o dimensionamento econômico, que visa otimizar o custo total do cabo ao longo de sua vida útil, considerando os gastos com energia elétrica e os impactos das emissões de CO₂ (Cotrim, 2009). Ademais, análises complementares como o cálculo das emissões de CO₂ nas etapas de fabricação e operação dos cabos (Moreno, 2014), bem como o estudo do fluxo de potência, são essenciais para uma abordagem mais sustentável e eficiente do projeto elétrico (Grainger e Stevenson, 1994; Melo, 2023).

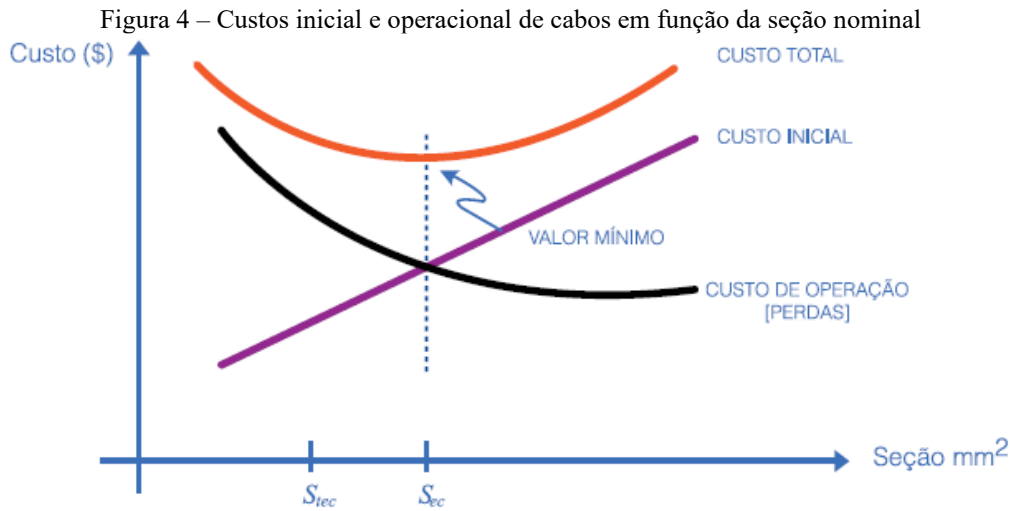
2.2 DIMENSIONAMENTOS TÉCNICO E ECONÔMICO DA SEÇÃO DO CONDUTOR

O planejamento da instalação elétrica é uma etapa fundamental no desenvolvimento de um projeto elétrico, pois envolve a coleta e análise de informações essenciais, tais como: o tipo de atividade do empreendimento, tensão disponível no local (baixa ou média tensão), implantação de geração distribuída, influências externas nas instalações, plantas arquitetônicas e demais documentos técnicos do local. O dimensionamento adequado dos condutores exige uma análise criteriosa das condições de instalação, bem como o conhecimento detalhado das características da carga a ser alimentada.

Um condutor mal dimensionado pode resultar em funcionamento inadequado dos equipamentos, aquecimento excessivo dos cabos e, em casos mais graves, risco de incêndio (Mamede Filho, 2023). De acordo com (ABNT, 2004), a seção técnica dos condutores fase de um circuito deve ser a seção normalizada que atenda simultaneamente aos critérios de: Capacidade de condução de corrente; Proteção contra sobrecargas; Proteção contra curtos-circuitos e solicitações térmicas; Proteção contra choques elétricos; Limites de queda de tensão e Seções mínimas, conforme NBR 5410:2004.

Além da determinação da seção técnica do cabo, é igualmente importante calcular a seção econômica, que adquire relevância diante das crescentes exigências de eficiência e conservação de energia elétrica. Essa avaliação mostra-se particularmente vantajosa em circuitos alimentadores com seções iguais ou superiores a 25 mm² (Cotrim, 2009). As diretrizes para o dimensionamento econômico de condutores encontram-se definidas na norma NBR 15920:2011 (ABNT, 2011).

A Figura 4 ilustra as curvas típicas dos custos iniciais e operacionais dos condutores. A soma ponto a ponto dessas curvas, para cada seção nominal considerada, resulta no custo total do condutor ao longo de sua vida útil, expresso em valor presente. A curva resultante apresenta um ponto de mínimo custo total, que corresponde à seção econômica do cabo, a qual é definida como aquela que proporciona o menor custo agregado de instalação e operação durante todo o seu ciclo de vida econômica (Moreno, 2014).



Fonte: Moreno (2014).

O custo total de um cabo elétrico (CT) é composto pelo custo inicial (CI), que inclui aquisição, instalação e acessórios, e pelo custo das perdas de energia ao longo de sua vida útil (CJ), ambos expressos em valores presentes, calculado por:

$C_T = C_I + C_J$ (1). Segundo (ABNT, 2011), o custo total pode ser obtido por: $C_T = C_I + I_{max}^2 \cdot R \cdot l \cdot F$ (2), sendo I_{max} a corrente de carga no primeiro ano (A); R a resistência c.a. aparente do condutor (Ω/m); l o comprimento do cabo (m).

O fator F é dado por: $F = N_p \cdot N_c \cdot (T \cdot P + D) \cdot \frac{Q}{(1 + \frac{i}{100})}$ (3), sendo N_p o número de condutores de fase por circuito; N_c o número de circuitos com carga equivalente; T o tempo de operação anual (h/ano); P o custo da energia (\$/W.h); D a variação anual da demanda (\$/W.ano); i a taxa de capitalização (%); N a vida econômica do cabo (anos). O coeficiente Q considera o aumento da carga ao longo do tempo, sendo calculado por:

$$Q = \sum_{n=1}^N (r^{n-1}) = \frac{1 - r^N}{1 - r} \quad (4)$$

O fator r é calculado pela expressão:

$$r = \frac{\left(1 + \frac{a}{100}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{b}{100}\right)}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)} \quad (5)$$

na qual a representa o aumento anual da carga (%) e b o aumento anual do custo da energia, desconsiderando a inflação (%). Segundo (ABNT, 2011), a resistência aparente do condutor é expressa em função da seção transversal (S) e da temperatura média de operação (θ_m) por:

$$R(S) = \frac{\rho_{20} \cdot B [1 + \alpha_{20} \cdot (\theta_m - 20)]}{S} \cdot 10^6 \quad (6)$$

na qual $R(S)$ é a resistência em corrente alternada (Ω/m); ρ_{20} é a resistividade em corrente contínua do condutor, adotando-se $\rho_{20} = 18,35 \times 10^{-9}$ (Ω/m); α_{20} é o coeficiente de temperatura da resistividade do condutor a 20 °C, com valor $\alpha_{20} = 4,3 \times 10^{-3} K^{-1}$; S é a área da seção transversal do cabo (mm^2).

O fator B é determinado por: $B = (1 + \gamma_p + \gamma_s) \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2)$ (7), em que γ_p e γ_s representam os efeitos de proximidade e pelicular, respectivamente; λ_1 e λ_2 correspondem às perdas na cobertura e na armação. Conforme Moreno (2010), esses fatores podem ser desprezados em cabos de baixa tensão (≤ 1 kV) e média tensão ($\leq 36,2$ kV). A temperatura média de operação do condutor (°C) é calculada, segundo a NBR 15920, por:

$$\theta_m = \frac{(\theta - \theta_a)}{3} + \theta_a \quad (8)$$

sendo θ a temperatura máxima nominal conforme o tipo de cabo; θ_a é a temperatura ambiente média e o fator 3 é de origem empírica. A seção econômica ótima do condutor, S_{ec} (mm^2), é obtida pela expressão:

$$S_{ec} = 1000 \left[\frac{I_{max}^2 \cdot F \cdot \rho_{20} \cdot B \cdot [1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)]}{A} \right]^{0,5} \quad (9)$$

na qual A é o custo médio do custo do cabo e acessórios de instalação ($\$/m.mm^2$).

De acordo com a NBR 15920, a seção calculada dificilmente coincide com uma seção nominal padronizada. Assim, o custo deve ser avaliado para as seções padronizadas adjacentes, escolhendo-se aquela que apresentar menor custo total.

2.3 ANÁLISE AMBIENTAL DE CABOS ELÉTRICOS

Durante a vida útil de um cabo, ocorrem emissões de CO₂ principalmente devido às perdas de energia elétrica. As emissões associadas às fases de fabricação e descarte são relativamente pequenas.

Assim, há um ganho ambiental quando as emissões evitadas durante a operação superam aquelas geradas na fabricação do condutor.

Considerando o uso da seção econômica, a redução total de emissões de CO₂, Z_1 (kg·CO₂), segundo Moreno (2014), pode ser calculada pela expressão:

$$Z_1 = N \cdot [N_p \cdot N_c \cdot I^2 \cdot (R_1 - R_2) \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot l \cdot K_1] \quad (10)$$

sendo N o período de vida econômica do cabo; N_p o número de condutores de fase por circuito; N_c o número de circuitos; I a corrente de carga (A); R_1 a resistência do condutor com seção técnica (Ω/km), conforme a equação (6); R_2 a resistência do condutor com seção econômica (Ω/km), obtida pela equação (6); T o tempo de operação anual (h/ano); l o comprimento do cabo (m); e K_1 o fator de emissão de CO₂ na geração de energia, adotando-se $K_1 = 0,081 \text{ kg} \cdot \text{CO}_2 / \text{kWh}$ (Moreno, 2014).

Entretanto, o uso de condutores com seção econômica acarreta um aumento das emissões de CO₂ durante a fabricação, pois seções maiores demandam mais material e energia no processo produtivo. O principal acréscimo de emissões está associado à produção do cobre, que representa a etapa mais intensiva em carbono. O aumento anual das emissões de CO₂, decorrente do uso de seções maiores, pode ser estimado por (Moreno, 2014):

$$Z_2 = N_p \cdot N_c \cdot [(W_2 - W_1) \cdot l \cdot K_2] \quad (11),$$

na qual Z_2 é o incremento anual de emissões de CO₂ (kg·CO₂); W_1 e W_2 são os pesos dos condutores de seção técnica e econômica, respectivamente (kg/km); l é o comprimento do cabo (km); e K_2 é o fator de emissão de CO₂ na produção do cabo, adotando-se $K_2 = 4,09 \text{ kg} \cdot \text{CO}_2 / \text{kg} \cdot \text{Cu}$ (Moreno, 2014). A Tabela 18 de Moreno (2014) apresenta os pesos aproximados dos cabos de cobre (kg/km), utilizados para o cálculo de W_1 e W_2 . A quantidade final de emissões de CO₂ é obtida por:

$$ECO_2 = Z_1 - Z_2 \quad (12).$$

Quando $Z_1 - Z_2 > 0$, as reduções nas emissões de CO₂ resultantes do uso de cabos com seção econômica, ao longo de sua vida útil, superam as emissões adicionais geradas na fabricação. Nesse caso, a escolha de um condutor de maior seção representa um ganho ambiental.

2.4 ANÁLISE FINANCEIRA DE CONDUTORES ELÉTRICOS

A capacidade de analisar, avaliar e decidir sobre um investimento é uma premissa fundamental, tanto para pessoas físicas quanto para empresas. Tais decisões devem ser embasadas em técnicas de análise adequadas, dada a sua importância no competitivo ambiente de negócios. Exemplos de dilemas estratégicos que exigem tal análise incluem (Moreira *et al.*, 2021): participar ou não de um leilão de compra e venda de energia; optar por geração própria de energia ou aplicar o recurso em fundos de investimento; investir na própria geração ou adquiri-la de terceiros; investir ou não em um projeto de eficiência energética; adquirir um equipamento ou máquina nova *versus* sua recuperação total.

Tomando como exemplo a análise financeira de um projeto na área de energia elétrica, é necessário considerar variáveis como: custos de investimento inicial, custos de projeto e instalação, custo da energia elétrica gerada, vida útil dos sistemas/equipamentos e custos de operação e manutenção. Neste trabalho, a análise financeira será conduzida utilizando os métodos de avaliação de investimentos: *payback* simples, *payback* descontado e valor presente líquido.

O *Payback* Simples (PBS) é um indicador inicial da liquidez e permite o cálculo do tempo necessário para que o fluxo de caixa gerado recupere o investimento inicial, mas, não considera o valor do dinheiro no tempo, já que os valores dos fluxos acumulados são tomados por seu valor de face (ou nominal) até o ponto de equiparação com o investimento realizado (Moreira *et al.*, 2021). O cálculo do PBS é dado por:

$$I_0 = FC_1 + FC_2 + \dots + FC_n \quad (13)$$

sendo I_0 o investimento inicial; FC_1, FC_2, FC_n os fluxos de caixa positivos e n é o número de períodos (dias, meses, anos). No caso de fluxos de caixa iguais, o PBS pode ser determinado por:

$$PBS = \frac{I_0}{FC} \quad (14)$$

O *Payback* Descontado (PBD) é semelhante ao PBS, porém incorpora o valor do dinheiro no tempo, permitindo determinar o período de retorno do investimento a partir do ajuste dos fluxos de caixa por uma taxa de desconto. O PBD é obtido por:

$$I_0 = \frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \quad (15)$$

sendo i a taxa de desconto ($i\%/100$). O fluxo de caixa ajustado é obtido pelo cálculo de seu valor presente (VP_{FC}), expresso por:

$$VP_{FC} = \frac{FC}{(1+i)^n} \quad (16)$$

O Valor Presente Líquido (VPL) é uma técnica amplamente utilizada na análise de investimentos, na qual os fluxos de caixa futuros são trazidos ao valor presente por meio de uma taxa de desconto, considerando o valor do dinheiro no tempo. Esse método é geralmente reconhecido como o mais apropriado para avaliar a viabilidade econômica de projetos de investimento.

Segundo Nascimento (2010), o método do VPL consiste em determinar o valor atual das entradas (VAE) e o valor atual das saídas (VAS), aplicando-se a taxa de desconto, e somar algebricamente ambos os valores. Quando o VPL é positivo, o investimento é considerado viável para a taxa adotada; se for negativo, o investimento é inviável; e, no caso de o VPL ser nulo, a decisão depende do critério do investidor. O VPL pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$VPL = -I_0 + \frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \quad (17).$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO E ANÁLISE DE CUSTOS DO CABO ALIMENTADOR

Os custos dos cabos, da instalação e dos acessórios estão apresentados na Tabela 2, sendo o valor médio unitário obtido igual a $A = 1,0303 \text{ R\$/m} \cdot \text{mm}^2$. Em (7) o parâmetro auxiliar B foi considerado igual a 1,00, desconsiderando-se os efeitos pelicular, de proximidade, perdas na cobertura e na armação (Moreno, 2016). Aplicando-se (9) obteve-se uma seção econômica inicial de $S_{ec} = 226 \text{ mm}^2$. Como esse valor não corresponde a uma seção padronizada, foram selecionadas duas seções comerciais adjacentes: uma imediatamente inferior ($S_{ec1} = 185 \text{ mm}^2$) e outra superior ($S_{ec2} = 240 \text{ mm}^2$).

A Tabela 3 apresenta os dados e resultados obtidos na etapa de dimensionamento econômico do cabo alimentador, bem como os custos correspondentes, incluindo o cabo de 95 mm^2 do QGBT2, adotado como seção técnica de referência. Os custos totais foram calculados considerando quatro alimentadores de QGBT semelhantes. Assim, com base nos resultados de custo global, conclui-se que a seção econômica mais adequada para o cabo alimentador do QGBT2 é $S_e = 240 \text{ mm}^2$.

Tabela 2 – Custos de cabos, instalação e acessórios

CUSTO INICIAL				
Seção (mm ²)	Cabo (R\$/m)	Inst./Aces. (R\$/m)	Total (R\$/m)	Variável A (R\$/m.mm ²)
25	27,33	21,00	48,33	
35	32,45	22,89	55,34	0,7010
50	45,45	25,18	70,63	1,0193
70	63,30	27,95	91,25	1,0310
95	86,06	31,30	117,36	1,0446
120	110,52	35,37	145,89	1,1412
150	137,24	40,32	177,56	1,0557
185	169,00	46,37	215,37	1,0802
240	209,81	53,79	263,60	0,8769
300	278,49	62,94	341,43	1,2971
400	372,80	74,27	447,07	1,0564
Média			1,0303	

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 3 – Dados e resultados obtidos - seção econômica e custos

DADOS		
Corrente de projeto ano 1 – I (A): 120,00	Comprimento do circuito – l (m): 123,00	Vida econômica – N (anos): 30,00
Resistividade do cobre - ρ_{20} (Ω/m): $18,35 \times 10^{-9}$	Coefficiente de temperatura cobre - α_{20} (K^{-1}): $4,3 \times 10^{-3}$	Taxa de capitalização – i (%): 5,00
Taxa de crescimento – a (%): 1,00	Taxa de aumento de energia - b (%): 3,00	Tempo operação circuito – T (h): 2.880,00
Variação anual da demanda – D (R\$/kW.ano): 0,00	Tarifa média energia – P (R\$/kWh): 0,68761	Média preço cabo instalado - A (R\$/m.mm ²): 1,0303
Quantidade circuitos - Nc : 1	Quantidade fases circuito - Np : 3	Temp. oper. Cond. - θ_{cond} (°C): 90
Temperatura média ambiente - θ_{amb} (°C): 40	Seção técnica - S_{tec} (mm ²): 95	Preço cabo 95 mm ² e instalação (R\$/m): 117,36
Preço cabo 185 mm ² e instalação (R\$/m): 215,37	Preço cabo 240 mm ² e instalação (R\$/m): 263,60	
RESULTADOS		
Temperatura média condutor – θ_m (°C) (8): 57	Variável auxiliar r (5): 1,0007	Variável auxiliar Q (4): 30,2931
Variável auxiliar B (7): 1,00	Variável auxiliar F (3): 171,3993	Seção econômica - S_{ec} (mm ²): 226
Seção econômica 1 - S_{ec1} (mm ²): 185	Seção econômica 2 - S_{ec2} (mm ²): 240	Resistência R(S)185 - RS_{ec1} (Ω/m) (6): $1,15 \times 10^{-4}$
Resistência R(S) 240 - RS_{ec2} (Ω/m) (6): $8,85 \times 10^{-5}$	Resistência R(S)95 - RS_{tec} (Ω/m) (6): $2,24 \times 10^{-4}$	
Custo inicial cabo 185 mm ² – CI_{ec1} (R\$): 105.963,28	Custo inicial cabo 240 mm ² - CI_{ec2} (R\$): 129.692,24	Custo inicial cabo 95 mm ² - CI_{tec} (R\$): 57.742,37
Custo operacional 185 mm ² – CJ_{ec1} (R\$): 139.439,11	Custo operacional 240 mm ² - CJ_{ec2} (R\$): 107.484,32	Custo operacional 95 mm ² - CJ_{tec} (R\$): 271.539,33
Custo total cabo 185 mm ² - CT_{ec1} (R\$): 245.402,39	Custo total cabo 240 mm ² - CT_{ec2} (R\$): 237.176,56	Custo total cabo 95 mm ² - CT_{tec} (R\$): 329.281,69

Fonte: Elaboração Própria.

3.2 ANÁLISE AMBIENTAL DOS CABOS ALIMENTADORES DO QGBT

Na análise ambiental, foram consideradas tanto a seção econômica selecionada quanto a seção técnica existente do alimentador do QGBT, com o objetivo de calcular a quantidade final de emissões de CO₂ ao longo da vida útil dos cabos. Admitindo-se N = 30 anos e aplicando-se (10), obteve-se uma

redução total de emissões de $Z_1 = 4.045,33 \text{ kg} \cdot \text{CO}_2$ por circuito durante o período considerado. Assim, para quatro circuitos alimentadores, o total de redução de emissões é de $Z_{1T} = 16.181,34 \text{ kg} \cdot \text{CO}_2$.

A adoção da seção de 240 mm^2 , entretanto, implica um aumento nas emissões de CO_2 durante o processo de fabricação, devido à maior quantidade de material utilizada. Esse incremento é calculado por (11). Com base na Tabela 18 de Moreno (2014), tem-se $W_1 = 853 \text{ kg/km}$ para o cabo de 95 mm^2 e $W_2 = 2.170,00 \text{ kg/km}$ para o cabo de 240 mm^2 , resultando em $Z_2 = 1.987,63 \text{ kg} \cdot \text{CO}_2$ por circuito. Considerando-se quatro alimentadores, obtém-se um total de emissões adicionais de $Z_{2T} = 7.950,52 \text{ kg} \cdot \text{CO}_2$.

A avaliação final das emissões de carbono foi obtida pela aplicação de (12), resultando em uma redução líquida de emissões de $ECO_2 = 2.057,70 \text{ kg} \cdot \text{CO}_2$ por circuito. Considerando os quatro alimentadores, a quantidade total evitada ao longo da vida operacional dos cabos é de $ECO_{2T} = 8.230,82 \text{ kg} \cdot \text{CO}_2$. A redução anual média de emissões, de $274,36 \text{ kg} \cdot \text{CO}_2$, pode ser expressa em termos de ganho financeiro ambiental.

Adotando-se a precificação do carbono de US\$ 37,52 por tonelada de CO_2 equivalente (tCO_2e), conforme dados do Observatório de Bioeconomia da Fundação Getúlio Vargas (FGV) o benefício econômico anual corresponde a US\$ 10,29. Considerando a taxa de câmbio de $1 \text{ USD} = \text{R\$ } 5,57$ (Banco Central do Brasil, 22/07/2025), obtém-se um ganho anual estimado de R\$ 57,34.

3.3 ANÁLISE DAS PERDAS TÉCNICAS NOS CABOS ALIMENTADORES DO QGBT2

Além da análise dos custos unitário, operacional e total, que possibilitam a escolha da seção econômica dos cabos alimentadores do QGBT2, foi realizado um estudo de fluxo de potência com o objetivo de determinar perdas técnicas associadas aos cabos selecionados, tais como potência e energia ativa dissipadas, queda e o perfil de tensão no QGBT2. Para o cálculo da potência e energia ativa dissipadas, foram consideradas apenas as componentes resistivas dos cabos alimentadores de 95 mm^2 , 185 mm^2 e 240 mm^2 , além de outros parâmetros do estudo de fluxo de potência, cujos valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados e resultados obtidos de perdas técnicas

DADOS		
Corrente ano 1 – I (A): 120,00	Comprimento trecho – l (m): 123,00	Tensão barra 1 – SEB1 – V1 (V): 220,00
Resistência R(S) cabo 185 mm^2 (Ω/m): $1,15 \times 10^{-4}$	Resistência R(S) cabo 240 mm^2 (Ω/m): $8,85 \times 10^{-5}$	Resistência R(S) cabo 95 mm^2 (Ω/m): $2,24 \times 10^{-4}$
Potência base – Sb (MVA): 100,00	Tensão base – Vb (kV): 0,22	Tempo de operação – T (h): 2.880,00
Quantidade circuitos - Nc: 1	Quantidade fases circuito - Np: 3	Queda tensão adotada trecho – $\Delta V = 2,5\%$

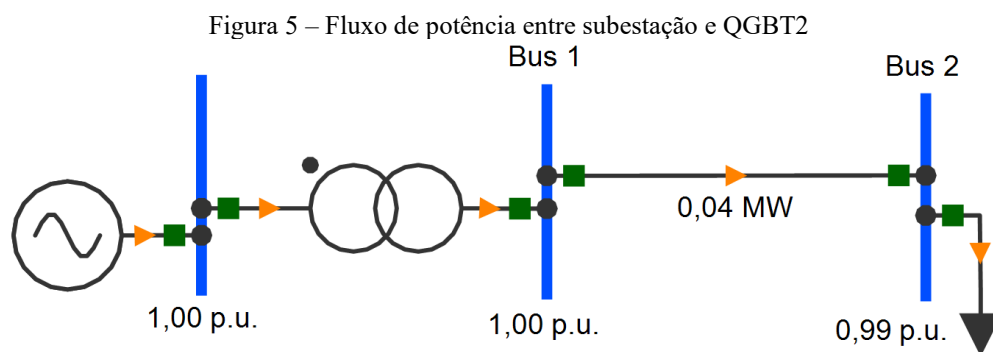
RESULTADOS

Potência perdida cabo 240 mm ² – Pla240 (kW): 0,48	Energia perdida anual cabo 240 mm ² – EPla240 (kWh): 1.379,30	Potência perdida cabo 185mm ² – Pla185 (kW): 0,63
Energia perdida anual cabo 185 mm ² (kWh): 1.802,97	Potência perdida alimentador 95 mm ² (kW): 1,25	Energia perdida cabo 95 mm ² (kWh): 3.600,78
Tensão no QGBT com cabo de 240 mm ² – V2 (pu): 0,9903	Tensão no QGBT com cabo de 240 mm ² – V2 (V): 217,87	Desvio de tensão no QGBT com cabo de 240 mm ² – ΔV (%): 0,97
Tensão barra 2 – cabo 185 mm ² QGBT – V2 (pu): 0,9874	Tensão barra 2 – cabo 185 mm ² QGBT – V2 (V): 217,23	Desvio de tensão no QGBT com cabo de 185 mm ² – ΔV (%): 1,26
Tensão barra 2 – cabo 95 mm ² QGBT – V2 (pu): 0,9751	Tensão barra 2 – cabo 95 mm ² QGBT – V2 (V): 214,52	Desvio de tensão QGBT com cabo de 95 mm ² – ΔV (%): 2,49

Fonte: Elaboração Própria.

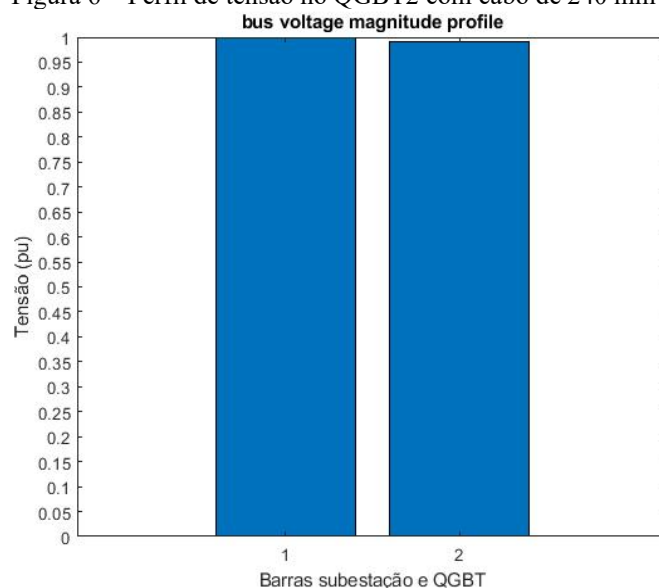
Conforme os resultados apresentados na Tabela 4, considerando quatro alimentadores idênticos para os QGBTs, as perdas de energia ativa em 30 anos totalizam 108,02 MWh com cabos de 95 mm² e 41,4 MWh com cabos de 240 mm², ou seja, a energia dissipada com a menor seção é 2,61 vezes superior. A Figura 5 apresenta o esquema de fluxo de potência entre a subestação (barra 1) e o QGBT2 (barra 2), com os respectivos valores de tensão em p.u.

As Figuras 6 e 7 ilustram os perfis de tensão nas barras de alimentação para os cabos de 240 mm² e 95 mm², respectivamente. Com base nas perdas de potência e energia ativa, bem como nos perfis e desvios de tensão observados, conclui-se que a seção de 240 mm² é a mais adequada para a alimentação dos QGBTs.



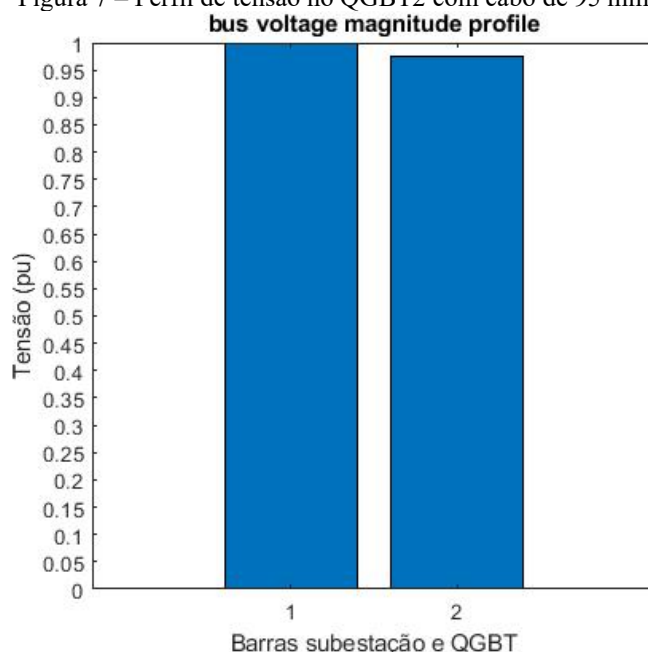
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 6 – Perfil de tensão no QGBT2 com cabo de 240 mm²



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 7 – Perfil de tensão no QGBT2 com cabo de 95 mm²



Fonte: Elaboração Própria.

3.4 AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DOS CABOS ALIMENTADORES DO QGBT

A avaliação técnica e econômica do trabalho foi realizada com base em dados econômicos e nos resultados de custos apresentados na Tabela 4 e na análise ambiental. A Tabela 5 detalha os resultados dos custos inicial e operacional, considerando os cabos dimensionados pelos critérios técnico e econômico, e a Tabela 6 apresenta os resultados obtidos do cálculo do tempo de retorno, utilizando os métodos PBS, PBD e VPL.

Tabela 5 – Análise financeira dos cabos resultantes dos critérios técnico e econômico

Critério de dimensionamento	Seção nominal (mm ²)	Custo inicial – CI (R\$)	Relação eco/tec (%)	Custo operacional – CJ (R\$)	Relação eco/tec (%)	Custo total – CT (R\$)	Relação eco/tec (%)
Econômico	240	129.692,24	225	107.484,32	40	237.176,56	72
Técnico	95	57.742,37	100	271.539,33	100	329.281,69	100
Quantidade QGBT	4	Investimento (R\$)		71.949,87	Economia Total (R\$)		164.055,01
Ganho anual (R\$)	5.468,50	Ganho anual CO ₂ (R\$)		57,34	Ganho anual total (R\$)		5.525,84

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 6 – Tempo de retorno do investimento

Taxa de capitalização - i (%)	5,00	Vida econômica - N (anos)	30
Tempo de retorno – <i>payback</i> (anos)	13,02	Tempo de retorno – <i>payback</i> descontado (anos)	21,58
Valor presente líquido – VPL (R\$)	12.995,80		

Fonte: Elaboração Própria.

4 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi apresentada uma metodologia para o dimensionamento da seção econômica de condutores alimentadores em baixa tensão, integrando as análises técnica, econômica e ambiental, além do fluxo de potência. A efetividade da metodologia foi comprovada em um estudo de caso real para o dimensionamento econômico do cabo alimentador do QGBT2, instalado na Escola Superior de Tecnologia da UEA.

O dimensionamento técnico de cabos alimentadores é uma prática amplamente empregada em projetos elétricos. Contudo, os resultados obtidos no estudo de caso demonstram a relevância de tornar o dimensionamento econômico também usual, assegurando melhor desempenho técnico e maior eficiência energética das instalações.

Na análise financeira realizada verificou-se, por exemplo, que o custo total do cabo de 95 mm² é aproximadamente 1,4 vez superior ao do cabo de 240 mm², e que as perdas anuais de energia são reduzidas de 3.600,78 kWh para 1.379,30 kWh, representando uma economia de 62%.

Nesse contexto, conclui-se que a metodologia proposta permitiu integrar de forma eficiente as análises técnica, econômica e ambiental, indicando que a seção nominal mais adequada dos cabos alimentadores de cada QGBT é de 240 mm².

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Perdas de Energia Elétrica na Distribuição 2025/2024. Disponível: www.gov.br. Acesso em 12 out 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Norma NBR 5410:2004. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Norma NBR 15920:2011. Rio de Janeiro, 2011.

COTRIM, A. A. M. B. Instalações Elétricas. 5ª Ed. São Paulo: Pearson, 2009.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. Power System Analysis. New Delhi: McGraw-Hill, 1994.

BARBOSA, L. H. S.; AMORIM, J. J. Reguladores de Tensão, Perdas em Sistemas de Distribuição e Projeto de Redes de Distribuição de Energia. DOI: <https://doi.org/10.38087/2595.8801.588>. v.8.n.1. p.01-21. e588. 2025.

MAMEDE FILHO, J. Instalações Elétricas Industriais. 10ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2023.

MELO, I. D. de. Fluxo de Potência: teoria e implementação de códigos computacionais. São Paulo: Blücher, 2023.

MORENO, H. Cabos Elétricos de Baixa Tensão – Conforme a NBR 5410. São Paulo: COBRECUM, 2014.

MORENO, H. Dimensionamento Econômico e Ambiental de Condutores Elétricos - Um caminho para economizar energia e preservar o meio ambiente. São Paulo: PROCOBRE, 2010.

MOREIRA, J. R. S. et al. Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética. 2ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

NASCIMENTO, Sebastião V. do. Engenharia Econômica – Técnica de Avaliação e Seleção de Projetos de Investimentos. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2010.

MYAT, S. S; MYINT, W. K; PHYU, E. E. Comparison for Loss and Cost Reduction in Power System Distribution by Utilization of Larger Conductor Size and Voltage Upgrading, International Journal of Science and Engineering Applications, n. 7-11, p. 459-464, 2018, ISSN: 2319 – 7560

TEIXEIRA JUNIOR, M. D. R. Cabos de Energia. 2ª Ed. São Paulo: Artliber, 2004.

VIANA, A. N. C. V. et al. Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações. Campinas (SP): ANEEL, 2012.