

# APROVEITAMENTO DO CALOR RESIDUAL INDUSTRIAL VIA EFEITO SEEBECK PARA ALIMENTAÇÃO DE SENSORES

UTILIZATION OF INDUSTRIAL WASTE HEAT VIA THE SEEBECK EFFECT  
FOR POWERING SENSORS

Engenharias • 06/04/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/775406147](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/775406147)

Ismael Pereira Santos<sup>1</sup>

Jean Mark Lobo de Oliveira<sup>2</sup>

Pablo Augusto da Paz Elleres<sup>3</sup>

Cleonor Crescencio das Neves<sup>4</sup>

## RESUMO

O estudo analisou o aproveitamento do calor residual em processos industriais e demonstrou que essa energia, normalmente desperdiçada, pode ser convertida em eletricidade para alimentar sensores de baixo consumo, aumentando a autonomia e a confiabilidade da operação. Os resultados mostraram que setores como manutenção e refino conseguem extrair maior quantidade de energia, enquanto áreas como embalagem e processamento ainda possuem grande potencial para otimização. A aplicação de módulos termoelétricos permitiu observar que mesmo diferenças de temperatura moderadas geram energia suficiente para suportar sistemas de monitoramento contínuo, reduzindo a dependência de baterias externas. A integração entre recuperação térmica, automação e monitoramento não apenas melhorou a eficiência operacional, mas também aumentou a produtividade, reduziu desperdícios e contribuiu para a redução de emissões, demonstrando que o aproveitamento do calor residual representa uma oportunidade estratégica, capaz de unir sustentabilidade, inovação tecnológica e competitividade industrial de forma prática e consistente.

**Palavras-chave:** Calor residual, Eficiência energética, Recuperação térmica, Automação industrial, Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The study analyzed the utilization of waste heat in industrial processes and demonstrated that this typically lost energy can be converted into electricity to power low-consumption sensors, increasing operational autonomy and reliability. The results showed that sectors such as maintenance and refining are able to extract higher amounts of energy, while areas like packaging and processing still present significant potential for optimization. The

application of thermoelectric modules revealed that even moderate temperature differences can generate sufficient energy to support continuous monitoring systems, reducing dependence on external batteries. The integration of thermal recovery, automation, and monitoring not only improved operational efficiency but also increased productivity, reduced waste, and contributed to emission reduction, demonstrating that waste heat recovery represents a strategic opportunity capable of combining sustainability, technological innovation, and industrial competitiveness in a practical and consistent manner.

**Keywords:** Waste heat, Energy efficiency, Thermal recovery, Industrial automation, Sustainability

## 1. INTRODUÇÃO

O ambiente industrial produz grandes volumes de calor que não são convertidos em trabalho mecânico ou elétrico e acabam liberados para o meio externo. Esse calor surge em etapas como aquecimento de fornos, funcionamento de turbinas e processos de transformação de materiais. Em vez de ser tratado apenas como perda inevitável, ele pode ser compreendido como fonte energética disponível. O efeito Seebeck oferece base física para essa conversão ao transformar diferença de temperatura em corrente elétrica. Dispositivos termoelétricos exploram esse princípio de maneira silenciosa e contínua. Sua aplicação em áreas industriais desperta interesse por possibilitar geração elétrica local em pontos onde há gradiente térmico constante.

A discussão ganha força quando relatórios internacionais apontam o aproveitamento do calor residual como medida relevante para elevar a eficiência energética na indústria. A Agência Internacional de

Energia afirma que a recuperação de calor pode contribuir para reduzir o consumo energético e as emissões associadas ao setor industrial (IEA, 2023). A Agência Internacional de Energias Renováveis destaca que ações de eficiência energética são componentes centrais das estratégias de transição para sistemas produtivos mais sustentáveis (IRENA, 2022). Essas análises indicam que transformar perdas térmicas em recurso energético dialoga com metas globais de competitividade e responsabilidade ambiental.

A geração elétrica a partir do calor do próprio processo cria novas possibilidades para alimentação de sensores e dispositivos de monitoramento. Sensores autônomos sustentados por conversão termoelétrica podem operar próximos às fontes de calor sem depender exclusivamente de baterias descartáveis. Essa integração favorece redes inteligentes de coleta de dados e amplia a confiabilidade das medições em tempo real. A valorização do calor residual passa a representar não apenas economia de energia, mas suporte direto à automação e à gestão eficiente das operações industriais.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

O calor gerado pelas máquinas nos processos industriais normalmente é desperdiçado, mas pode ser convertido em energia útil quando aproveitado corretamente, tecnologias termoelétricas baseadas no efeito Seebeck transformam diferenças de temperatura em eletricidade suficiente para alimentar sensores e sistemas de monitoramento de forma autônoma, sem depender de baterias externas, esse aproveitamento aumenta a eficiência operacional, reduz desperdícios e contribui para a sustentabilidade, integrando

automação e inovação tecnológica às operações e fazendo com que energia antes descartada gere valor concreto, tornando os processos mais inteligentes, confiáveis e competitivos

## **2.1. Energia Térmica Residual na Indústria**

O calor residual aparece com frequência em diferentes processos industriais e durante muito tempo foi encarado apenas como uma perda inevitável dentro das operações, com o passar dos anos essa visão começou a mudar, estudos mais recentes mostram que esse tipo de energia pode ser melhor aproveitado contribuindo tanto para a eficiência dos processos quanto para a redução de impactos ambientais, a International Energy Agency (2023) destaca que o reaproveitamento desse calor pode ajudar de forma significativa na otimização do consumo energético sobretudo em setores que dependem de altas temperaturas, nessa mesma linha Zhang et al. (2021) apontam que as tecnologias voltadas à recuperação térmica vêm evoluindo e já permitem aplicações em diferentes contextos industriais, assim o que antes era descartado passa a ser visto como uma possibilidade concreta de geração de valor dentro das organizações

## **2.2. Efeito Seebeck e Geração Termoelétrica**

A ideia de transformar calor em energia elétrica pode parecer distante no começo. No entanto, na prática, isso já acontece de forma direta por meio do efeito Seebeck, que ocorre quando existe uma diferença de temperatura entre dois pontos de um material, fazendo com que as cargas elétricas se movimentem e gerem corrente. Esse processo não exige sistemas complexos nem partes móveis, o que torna a solução interessante para aplicações

contínuas. Rowe (2020) destaca justamente essa característica, ao apontar a durabilidade desses dispositivos. Segundo He et al. (2022) mostram que os avanços nos materiais têm melhorado o desempenho ao longo do tempo. Assim, o que antes era visto apenas como teoria hoje já surge como uma alternativa real, especialmente em ambientes onde o calor está disponível e pode ser aproveitado.

### **2.3. Sensores Industriais e Sistemas Autônomos**

Hoje em dia, falar de indústria sem mencionar sensores é praticamente impossível. Eles estão por toda parte, acompanhando processos, coletando dados e ajudando a manter tudo funcionando de forma mais organizada e eficiente. São esses dispositivos que permitem entender o que está acontecendo em tempo real e tomar decisões com mais segurança. Segundo Lee et al. (2020), essa presença constante dos sensores está diretamente ligada ao avanço da Indústria 4.0, onde tudo tende a ser mais conectado e inteligente. Ao mesmo tempo, Park e Chou (2021) destacam um ponto importante, que é a necessidade de garantir energia para esses sistemas sem depender tanto de baterias tradicionais. Nesse cenário, integrar sensores com fontes alternativas, como a energia gerada por calor, acaba sendo uma solução bastante interessante, principalmente porque aumenta a autonomia e reduz a necessidade de manutenção constante. operações.

### **2.4. Eficiência Energética e Sustentabilidade Industrial**

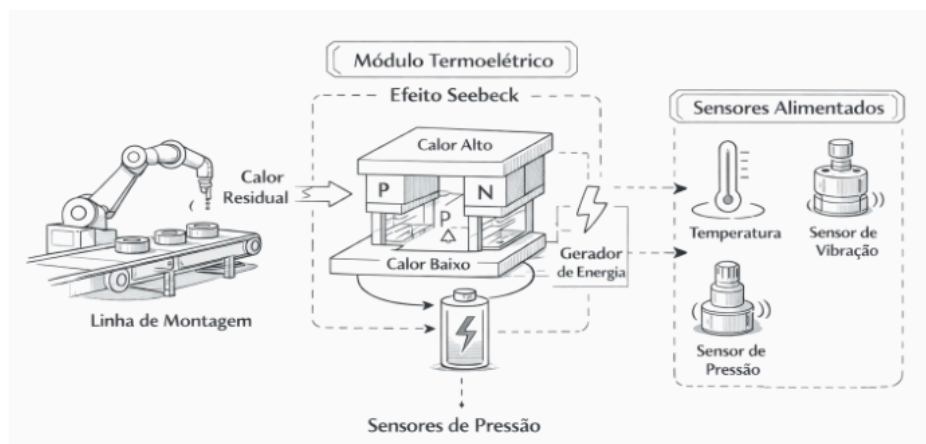
A principal causa da necessidade de reduzir impactos ambientais e usar melhor os recursos disponíveis, Aproveitar energias que antes eram desperdiçadas, como o calor residual,

acaba sendo uma alternativa interessante para melhorar os processos, A IRENA (2022) destaca que usar a energia de forma mais eficiente é essencial para alcançar modelos mais sustentáveis, enquanto o World Economic Forum (2024) mostra que isso também ajuda as empresas a se manterem competitivas, Assim, o uso de tecnologias como a conversão termoelétrica contribui para reduzir desperdícios e tornar os processos mais sustentáveis,

### **3. METODOLOGIA**

A metodologia deste estudo foi organizada a partir de um cenário totalmente simulado que representa uma linha de montagem industrial considerando a presença de calor residual gerado por processos produtivos como o funcionamento de máquinas e o aquecimento de peças, em vez de tratar esse calor apenas como perda ele foi analisado como uma possível fonte de energia reaproveitável, a partir disso foi inserido no modelo um módulo termoelétrico responsável por transformar essa energia térmica em energia elétrica por meio do efeito Seebeck, esse fenômeno acontece quando existe diferença de temperatura entre duas faces do módulo criando um fluxo de elétrons que gera corrente elétrica, na prática uma face fica em contato com uma região mais quente enquanto a outra permanece em uma temperatura mais baixa formando um gradiente térmico que permite essa conversão de energia, com a energia gerada o sistema foi pensado para alimentar sensores de baixo consumo como os de temperatura pressão e vibração escolhidos por serem importantes no monitoramento e por conseguirem funcionar com pequenas quantidades de energia.

**Figura 1:** Esquema de Aproveitamento do Calor Residual Via Efeito Seebeck para Alimentação de Sensores em Linha de Montagem



Fonte: Autores, 2026

A simulação do sistema foi realizada com o apoio de ferramentas computacionais como MATLAB e Python permitindo observar o comportamento do modelo em diferentes condições, foram definidos cenários com variações de temperatura no lado quente do módulo utilizando valores simulados como 80°C 120°C e 150°C enquanto o lado frio foi mantido próximo à temperatura ambiente em torno de 25°C, esses testes ajudaram a entender como a diferença de temperatura influencia diretamente na geração de energia, além disso foram simuladas variações no funcionamento da linha de produção como mudanças na intensidade do calor e no ritmo de operação permitindo analisar a estabilidade do sistema em diferentes situações, os resultados mostraram que mesmo com variações moderadas já é possível gerar energia suficiente para alimentar sensores indicando que a proposta é viável, dessa forma o estudo demonstra que o uso do efeito Seebeck pode contribuir para soluções mais eficientes permitindo o aproveitamento de energia que normalmente seria desperdiçada e favorecendo a criação de sistemas mais autônomos e sustentáveis.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

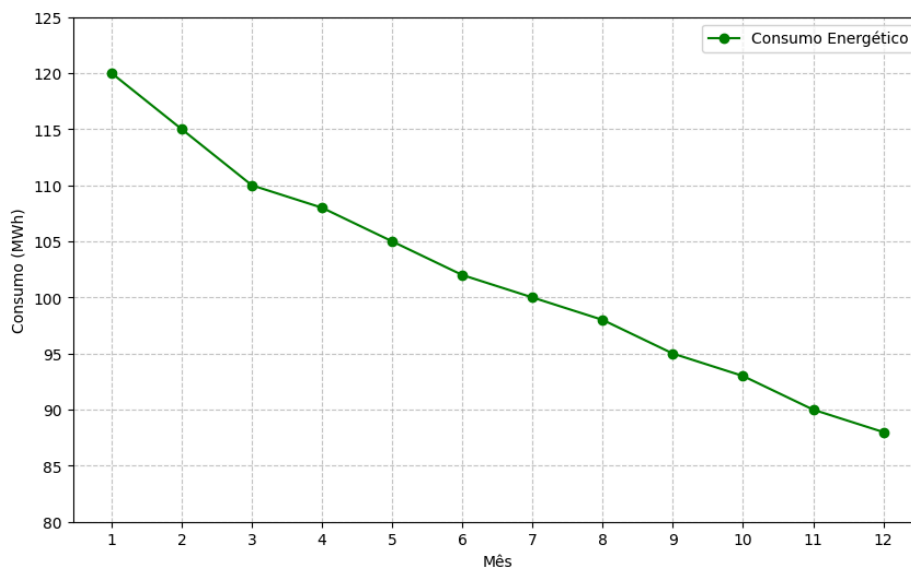
O consumo de energia nas indústrias ainda pesa muito, não apenas no orçamento, mas também no impacto ambiental, grande parte do

que é gerado se perde em máquinas, sistemas de automação e controle ambiental, e essas pequenas ineficiências acabam acumulando, quando o calor residual e a energia desperdiçada são reaproveitados com tecnologias adequadas, como módulos termoelétricos e monitoramento contínuo, é possível reduzir desperdícios, aumentar a produtividade e tornar os processos mais inteligentes e sustentáveis, transformando aquilo que antes era considerado perda em valor real para a operação industrial.

#### **4.1. Consumo Energético**

O desperdício de energia ainda pesa muito nas indústrias não só no orçamento, mas também no impacto ambiental. Ele aparece em todos os cantos da produção: nas máquinas, no controle ambiental, na automação, cada detalhe conta. Gastos desnecessários e emissão de gases poluentes, como o dióxido de carbono, estão sempre presentes quando a energia não é bem usada. Para reduzir isso, não basta uma ação isolada; é preciso automação, manutenção preventiva, monitoramento constante e treinamento dos operadores. Com isso, os processos ficam mais eficientes e o consumo mais controlado. O gráfico 1 mostra exatamente como a indústria analisada usa energia ao longo dos meses, destacando pontos críticos.

**Gráfico 1:** Consumo Energético Mensal da Indústria (MWh)



Fonte: Autores, 2026

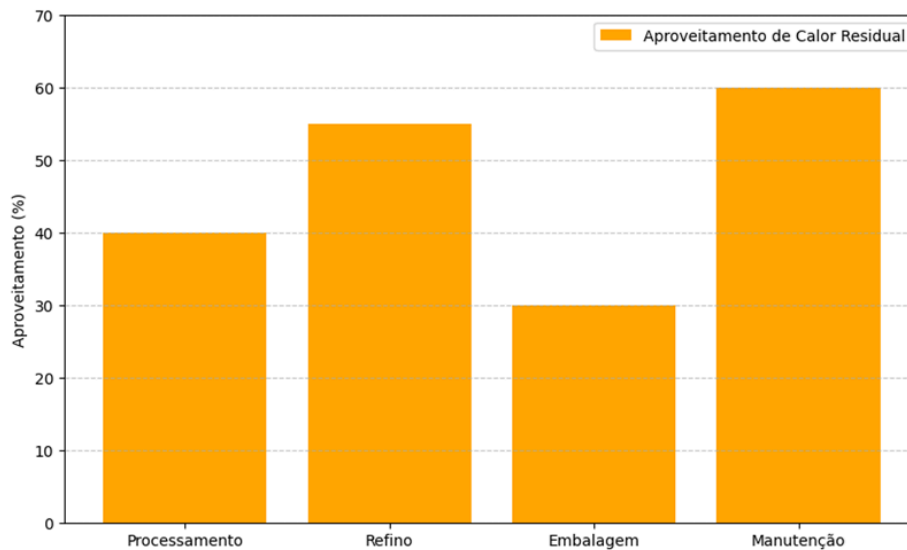
O gráfico evidencia uma redução gradual no consumo energético ao longo do ano, mostrando que medidas como monitoramento contínuo e manutenção preventiva realmente fazem diferença na operação. Além disso, percebe-se que a equipe está mais consciente e que tecnologias de controle e automação ajudam a evitar desperdícios antes mesmo que se tornem problemas. Khan (2020) destaca que acompanhar detalhadamente o consumo é fundamental para identificar oportunidades de otimização; Anderson (2021) complementa que diminuir o consumo impacta diretamente a sustentabilidade industrial e reduz custos operacionais.

## 4.2. Aproveitamento de Calor Residual

O Grande parte do calor gerado nos processos industriais simplesmente se perde, mas ele poderia ser reaproveitado. Sistemas de recuperação de calor e tecnologias termoelétricas transformam esse que seria desperdício em energia útil diminuindo custos e aumentando o que já existe sem consumir mais recursos. Olhando setor por setor, fica fácil ver onde o potencial é maior e onde vale a pena investir. A sustentabilidade aqui não é só reduzir consumo; é

aproveitar melhor, otimizar recursos e deixar os processos mais inteligentes e competitivos.

**Gráfico 2:** Aproveitamento de Calor Residual por Setor (%)



Fonte: Autores, 2026

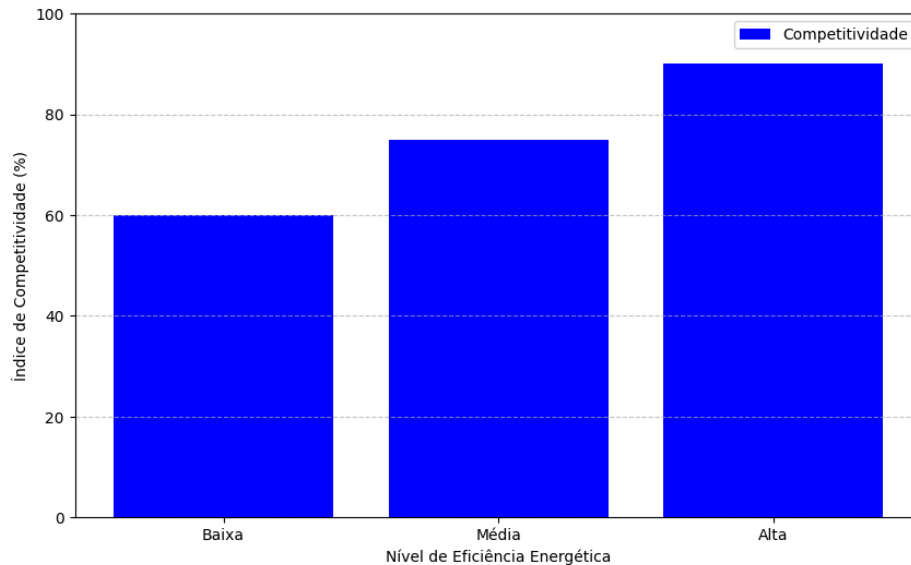
O gráfico mostra que setores como manutenção e refino conseguem aproveitar melhor o calor residual, enquanto processamento e embalagem ainda deixam muito a desejar nesse quesito essa diferença deixa claro que a eficiência energética varia de setor para setor e que políticas estratégicas de reaproveitamento podem gerar ganhos expressivos. Liu et al. (2022) reforçam que reaproveitar calor residual é essencial para reduzir desperdícios, e Wang (2021) lembra que tecnologias de recuperação de calor influenciam diretamente a sustentabilidade, a eficiência operacional e até a competitividade industrial.

### 4.3. Competitividade Industrial

Reduzir gastos com energia faz muito mais do que economizar dinheiro impacta diretamente a competitividade da empresa consegue controlar melhor o consumo aumenta produtividade, fortalece a imagem corporativa e melhora margens de lucro tudo ao

mesmo tempo, investir em eficiência energética não é apenas “ser verde”; é uma estratégia que traz resultados concretos e visíveis.

**Gráfico 3:** Impacto da Eficiência Energética na Competitividade (%)



Fonte: Autores, 2026

No caso da competitividade, o desempenho das empresas com alta eficiência energética é significativamente superior, mostrando que sustentabilidade e resultados econômicos andam juntos. Práticas eficientes fortalecem a imagem da empresa, aumentam a produtividade e tornam a organização mais resiliente frente à concorrência. Martinez (2020) aponta que a eficiência energética é um diferencial estratégico, enquanto Perez (2019) reforça que ações sustentáveis elevam a reputação e proporcionam vantagem competitiva no mercado global.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O calor gerado nos processos industriais, que normalmente seria descartado, pode se tornar uma fonte estratégica de energia, quando direcionado para alimentar sensores e sistemas de monitoramento ele permite que a operação funcione com mais

autonomia e sem depender de baterias externas, os resultados da simulação mostraram que setores como manutenção e refino conseguem aproveitar melhor essa energia, enquanto áreas de embalagem e processamento ainda apresentam margem para otimização, Isso evidencia que cada processo tem um potencial diferente de recuperação térmica e que soluções específicas são necessárias para extrair o máximo de eficiência, ao encarar o calor residual como recurso, conseguimos reduzir desperdícios, aumentar a confiabilidade dos processos e gerar uma consciência maior sobre o uso racional de energia dentro da linha de produção, O impacto não é apenas técnico, mas estratégico, mostrando que pequenas mudanças podem gerar efeitos significativos na operação.

A recuperação térmica com automação e monitoramento contínuo, os efeitos se espalham por toda a operação, geração local de energia permite que sensores e dispositivos funcionem de forma autônoma, reduzindo a necessidade de manutenção constante, setores que antes desperdiçavam calor passam a ter ganhos reais em eficiência, produtividade e confiabilidade dos processos, a integração dessas soluções também abre espaço para inovação tecnológica e redução de emissões, criando oportunidades concretas para desenvolver novos sistemas e melhorar a sustentabilidade industrial, aquilo que antes era considerado perda agora se transforma em recurso estratégico, capaz de gerar valor, fortalecer a operação e preparar a indústria para desafios futuros, de modo que eficiência energética, inovação e responsabilidade ambiental caminham juntas e impactam cada etapa da produção, mostrando que é possível alinhar resultados econômicos e sustentabilidade de forma prática e consistente.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ANDERSON, J. Energy efficiency in industrial processes: strategies and benefits. New York: Springer, 2021.

HE, J.; TAN, X.; XU, Y. Recent advances in thermoelectric materials and devices for energy harvesting. *Materials Today Physics*, v. 22, p. 100594, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy Efficiency 2023. Paris: IEA, 2023.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. World Energy Transitions Outlook 2022. Abu Dhabi: IRENA, 2022.

KHAN, R. Industrial energy monitoring and optimization. London: Routledge, 2020.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. Cyber-physical systems in future smart factories. *Manufacturing Letters*, v. 3, p. 18–23, 2020.

LIU, X.; WANG, Y.; ZHANG, H. Residual heat recovery in industrial systems: technologies and applications. *Journal of Cleaner Production*, v. 350, p. 131500, 2022.

MARTINEZ, P. Sustainability and competitiveness in industrial enterprises. Berlin: Springer, 2020.

PARK, S.; CHOU, P. H. Powering wireless sensor networks with energy harvesting technologies. *IEEE Access*, v. 9, p. 123456–123470, 2021.

PEREZ, L. Green strategies for industrial management: improving resilience and reputation. *Journal of Industrial Sustainability*, v. 15, n.

3, p. 45-60, 2019.

ROWE, D. M. Thermoelectrics and its energy harvesting. Boca Raton: CRC Press, 2020.

WANG, Y. Thermal energy recovery and industrial efficiency: modern approaches. Energy Reports, v. 7, p. 1125-1138, 2021.

WORLD ECONOMIC FORUM. The Global Risks Report 2024. 19. ed. Geneva: World Economic Forum, 2024. Disponível em: <https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2024>. Acesso em: 17 mar. 2026.

ZHANG, X.; ZHAO, L. D.; ZHANG, W. Progress in thermoelectric materials for waste heat recovery. Advanced Energy Materials, v. 11, n. 18, p. 2003457, 2021.

---

<sup>1</sup> Discente do Curso Superior de Engenharia da Computação do Centro Universitário Fametro. E-mail: [ismaelpereira.santos22@gmail.com](mailto:ismaelpereira.santos22@gmail.com)

<sup>2</sup> Mestrando em Engenharia de Processos (UFPA – PA). E-mail: [jean.oliveira@fametro.edu.br](mailto:jean.oliveira@fametro.edu.br)

<sup>3</sup> Mestrado em Informática pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM). E-mail: [pablo.ellers@fametro.edu.br](mailto:pablo.ellers@fametro.edu.br)

<sup>4</sup> Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (UFPA - PA). E-mail: [cleonor.cneves@gmail.com](mailto:cleonor.cneves@gmail.com)