v7.n11.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

SISTEMA DE MONITORAMENTO PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA *INDÚSTRIA: ESTUDO EM UMA EMPRESA DE ARTEFATOS DE BORRACHA*

MONITORING SYSTEM FOR EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY IN INDUSTRY: A CASE STUDY IN A RUBBER PRODUCTS COMPANY

SISTEMA DE MONITOREO PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA: ESTUDIO EN UNA EMPRESA DE ARTEFACTOS DE CAUCHO

Luiz Renato Pastori[1], Valdecy Cardoso dos Santos[2]

e7119502
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i11.9502

PUBLICADO: 11/2026

RESUMO

Com os avanços industriais e a automação dos processos produtivos, a gestão do consumo energético em máquinas tem se tornado prioridade. Em parques fabris mais antigos, a presença de maquinário obsoleto, o desgaste natural de componentes e a falta de sistemas nativos de controle geram ineficiência, desperdícios operacionais e elevação nos custos de produção. Neste cenário, este trabalho analisa como o monitoramento contínuo, aliado ao tratamento estruturado de dados, pode promover a sustentabilidade na indústria de artefatos de borracha. A empresa analisada adotou uma solução baseada em um sistema de monitoramento que trabalha na coleta de dados via protocolo LoRaWAN e na transmissão de informações por meio do dispositivo RAK7431. O estudo demonstrou que a principal contribuição do sistema está na capacidade de proporcionar uma visualização sobre o cenário operacional da planta, permitindo mapear ineficiências e identificar subutilizações. O tratamento desses dados fornece aos gestores as informações necessárias para atuar de forma pontual e estratégica nos setores e equipamentos que demandam intervenção, fortalecendo a tomada de decisão e impulsionando a competitividade, a lucratividade e a sustentabilidade do negócio.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento energético. Sustentabilidade. Produtividade. Subutilização de equipamentos. Otimização de processos. RAK7431.

ABSTRACT

With industrial advances and the automation of production processes, managing energy consumption in machines has become a priority. In older manufacturing parks, the presence of obsolete machinery, natural wear and tear on components, and the lack of native control systems generate inefficiency, operational waste, and increased production costs. In this scenario, this work analyzes how continuous monitoring, combined with structured data processing, can promote sustainability in the rubber products industry. The company analyzed adopted a solution based on a monitoring system that works on data collection via the LoRaWAN protocol and the transmission of information through the RAK7431 device. The study demonstrated that the system's main contribution lies in its ability to provide a visualization of the plant's operational scenario, allowing for the mapping of inefficiencies and the identification of underutilization.

[1] Graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Araraquara (UNIARA) e Assistente Técnico na indústria de peças de borracha, com atuação no setor de vendas e engenharia de aplicação dos produtos. Universidade de Araraquara (UNIARA).
[2] Engenheiro Eletricista pela Universidade de Araraquara (UNIARA), especialista em sistemas de energia e automação e docente do curso de Engenharia Elétrica da UNIARA. Universidade de Araraquara (UNIARA).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

The processing of this data provides managers with the necessary data to act punctually and strategically in sectors and equipment that require intervention, strengthening decision-making and boosting the competitiveness, profitability, and sustainability of the business.

KEYWORDS: *Energy monitoring. Sustainability. Productivity. Equipment underutilization. Process optimization. RAK7431.*

RESUMEN
Con los avances industriales y la automatización de los procesos de producción, gestionar el consumo de energía en las máquinas se ha convertido en una prioridad. En los parques industriales más antiguos, la presencia de maquinaria obsoleta, el desgaste natural de los componentes y la falta de sistemas de control nativos generan ineficiencia, desperdicio operativo y mayores costos de producción. En este escenario, este trabajo analiza cómo el monitoreo continuo, combinado con el procesamiento estructurado de datos, puede promover la sostenibilidad en la industria de artefactos de caucho. La empresa analizada adoptó una solución basada en un sistema de monitoreo que trabaja sobre la recolección de datos a través del protocolo LoRaWAN y la transmisión de información a través del dispositivo RAK7431. El estudio demostró que la principal contribución del sistema reside en su capacidad para proporcionar una visualización del escenario operativo de la planta, permitiendo el mapeo de ineficiencias y la identificación de la subutilización. El procesamiento de estos datos proporciona a los gerentes los datos necesarios para actuar puntual y estratégicamente en sectores y equipos que requieren intervención, fortaleciendo la toma de decisiones e impulsando la competitividad, rentabilidad y sostenibilidad del negocio.

PALABRAS CLAVE: *Monitoreo energético. Sostenibilidad. Productividad. Subutilización de equipos. Optimización de procesos. RAK7431.*

INTRODUÇÃO

No setor industrial, a eficiência energética tem sido o foco principal, impulsionando pesquisas e desenvolvimentos de novas tecnologias. A análise dessa eficiência está ligada ao monitoramento contínuo dos equipamentos. Antes de implementar medidas voltadas à otimização da relação entre consumo e produtividade, é indispensável realizar uma auditoria detalhada nos equipamentos para estabelecer um diagnóstico preciso da operação. Nesse contexto, a prática da mensuração constitui um requisito fundamental para a implementação de melhorias.

Soares (2015) ressalta que, além da redução dos custos operacionais, um sistema de gerenciamento integrado de energia possibilita que a indústria tenha uma atitude responsável e econômica no processo de produção. Além disso, a redução da pegada de carbono também vem se tornando pilar central da sustentabilidade corporativa, exigindo uma transição para práticas que minimizem a emissão de gases de efeito estufa.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

De acordo com Camioto (2013), as empresas que eram vistas apenas como instituições econômicas com responsabilidades referentes a resolver os problemas econômicos fundamentais (o que produzir, como produzir e para quem produzir) têm presenciado o surgimento de novos papéis que devem ser desempenhados, como resultado das alterações no ambiente em que operam.

Tendo em vista esse cenário, a indústria de artefatos de borracha desempenha um papel estratégico e desafiador na economia brasileira. Juntamente com o setor de plásticos, figurou em quinto lugar no consumo de energia elétrica industrial em 2025, segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2026 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Caracterizado pelo intenso consumo energético e pela dependência de maquinário de grande porte — como injetoras e prensas —, o setor enfrenta uma pressão crescente para conciliar competitividade, qualidade, produtividade e responsabilidade ambiental. A modernização do parque fabril, impulsionada por metas de descarbonização, exige uma gestão baseada em dados confiáveis. Entender a dinâmica de consumo nesses processos mostra como o monitoramento energético pode atuar como o elo entre os objetivos estratégicos de sustentabilidade e a operação diária das máquinas.

Conforme o Balanço Energético Nacional (EPE, 2023), a indústria é responsável por aproximadamente 32% do consumo total de energia no Brasil e por 37% da demanda de energia elétrica. Dados da Confederação Nacional da Indústria (CNI) e do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) (CNI, 2017) indicam que o parque fabril brasileiro possui, em média, 14 anos de operação. Esse cenário reflete um alto nível de depreciação e obsolescência das máquinas, resultando em equipamentos que operam abaixo de seu nível ótimo de eficiência.

Diante desse problema, surge a seguinte questão: como o monitoramento contínuo do consumo elétrico pode identificar ineficiências operacionais e fornecer dados para otimizar a relação entre gasto energético e produtividade? Ao mesmo tempo, busca-se entender em que grau a arquitetura de medição utilizando medidores Acrel com transmissão via protocolo LoRaWAN assegura a precisão necessária para esta análise. Como hipótese, assume-se que o protocolo LoRaWAN integrado aos medidores viabiliza uma coleta de dados robusta e imune a ruídos e interferências eletromagnéticas do maquinário pesado, fornecendo informações confiáveis para a tomada de decisões.

O monitoramento de injetoras e prensas de borracha exige atenção aos ciclos térmicos e mecânicos. Esses equipamentos demandam grande volume de energia tanto para o aquecimento de moldes e canhões de injeção quanto para o acionamento dos sistemas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

hidráulicos. Caso este recurso seja subutilizado, podem ser gerados desperdícios consideráveis ao longo do tempo. A instalação de medidores em pontos estratégicos permite identificar o consumo específico por peça produzida, revelando picos, oscilações semanais e divergências entre turnos de trabalho.

Este trabalho apresenta um estudo de caso em uma empresa do setor de artefatos de borracha, na qual se analisou o perfil de consumo energético por meio de métodos de medição automatizados voltados à sustentabilidade, lucratividade e redução das emissões de CO_2.

O objetivo geral deste trabalho é demonstrar como o monitoramento contínuo do consumo energético contribui para a eficiência operacional por meio do sistema implementado na empresa estudada.

Para contribuir com essa demonstração, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o consumo de energia dos equipamentos;
- Descrever os medidores e o método de comunicação LoRaWAN;
- Abordar o tratamento e a visualização de dados no Power BI;
- Mapear oportunidades de melhoria no perfil de consumo energético para propor estratégias de otimização;
- Trazer dados da aplicação prática do sistema na gestão energética.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. O Balanço Energético Nacional (BEN) 2023

O Balanço Energético Nacional (BEN) 2023 é utilizado neste trabalho como base de dados para a análise da produção e do consumo energético, fornecendo indicadores numéricos sobre a matriz brasileira, com destaque para o setor industrial. Elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) com dados consolidados de 2022, o documento reafirma a posição do Brasil entre as nações com alto índice de fontes renováveis na matriz energética global. Segundo o relatório, a participação dessas fontes na Oferta Interna de Energia (OIE) atingiu 47,4%, superando a média mundial e apresentando evolução contínua em relação aos 44,7% registrados no período anterior.

O relatório evidencia ainda que a demanda final de energia no país cresceu 2,9%, impulsionada pela retomada das atividades produtivas. Os setores de transportes e indústria mantiveram-se como os maiores consumidores de energia, respondendo por 32,5% e 32,3% do consumo total, respectivamente.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A análise da intensidade energética e das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) reforça a necessidade de implementar sistemas de monitoramento e políticas de eficiência energética para sustentar o crescimento nacional. Embora o Brasil apresente uma intensidade de carbono favorável em comparação a diversos outros países desenvolvidos, os dados do BEN 2023 indicam que o principal desafio para a descarbonização é a substituição progressiva de combustíveis fósseis em processos térmicos e produtivos.

1.2. Sistema de gerenciamento de energia

A eficiência energética é definida como a relação entre a quantidade de energia utilizada e o volume de bens produzidos ou serviços prestados, focando na minimização do consumo por unidade de produção. No cenário brasileiro, o setor industrial está entre os maiores consumidores e, como os recursos energéticos apresentam um impacto expressivo nos custos de fabricação, a implementação de ações para o seu uso racional reduz despesas e gera benefícios sociais e ambientais.

Um sistema de gestão energética, com base nas diretrizes da norma ISO 50001, consiste em um conjunto de elementos que estabelece políticas e metas para otimizar o desempenho energético organizacional. O sistema de gerenciamento atua como suporte operacional, trabalhando com dispositivos de medição e controle para monitorar grandezas elétricas em tempo real. Essa ferramenta é essencial para identificar sazonalidades, eliminar desperdícios e fornecer dados precisos para a gestão dos custos por setor, e facilita as atividades de operação e manutenção dos equipamentos.

Para comprovar a eficácia dessas intervenções, utiliza-se a metodologia de Medição e Verificação (M&V). Estudos de caso demonstram que a substituição de controles analógicos por digitais, somada ao ajuste de parâmetros de operação, gera economias significativas e garante um rápido retorno sobre o investimento (*payback*).

1.3. Eficiência energética na indústria

A energia não deve ser vista apenas como a capacidade de realizar trabalho, mas como o elemento que viabiliza alterações na configuração de um sistema. Nesse sentido, a auditoria energética é o passo inicial para qualquer programa de uso eficiente de recursos, fornecendo um diagnóstico detalhado do perfil de consumo. Por meio de uma abordagem sistemática, essa análise identifica onde, quanto e de que forma a energia é utilizada, permitindo rastrear perdas e fundamentar projetos de melhoria. Ações de gestão reduzem não apenas custos operacionais,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

mas também viabilizam a adequação tarifária e a correção do fator de potência, aumentando a sustentabilidade e a eficiência do setor produtivo.

> Em princípio, qualquer capacidade instalada poderia atender qualquer necessidade de energia, desde que lhe seja dado tempo suficiente, o que evidentemente não atende às necessidades impostas pela realidade. Por isso, podemos afirmar que a sociedade moderna, que busca atender suas demandas energéticas de forma rápida, é tão ávida em potência quanto em energia (VIANA, 2012, p. 15).

1.4. Gateway WIFI-LoRaWAN para integração de medidores inteligentes de energia

A integração entre medidores inteligentes equipados com Wi-Fi e a tecnologia LoRaWAN é uma solução estratégica para o monitoramento de energia. Enquanto a rede Wi-Fi oferece uma taxa alta de transmissão de dados, seu alcance é restrito a aproximadamente 50 metros e apresenta elevado consumo energético. A tecnologia LoRa (Long Range) permite comunicações a quilômetros de distância com baixo consumo de energia, atuando como uma ponte de longo alcance para o fluxo de dados de sensores inteligentes integrados a gateways — dispositivos de rede que podem conectar barramentos diferentes e traduzir protocolos — interligados à rede LoRaWAN.

Apesar do alcance, a implementação de sistemas de medição via LoRaWAN enfrenta desafios relacionados à perda de pacotes e ao cumprimento de regulamentações de rede, como o Duty Cycle e a Fair Access Policy. Testes experimentais indicam que o tamanho dos pacotes transmitidos por medidores inteligentes (em média 110 bytes) pode restringir o uso de fatores de espalhamento (Spreading Factors), limitando o alcance máximo para assegurar a integridade das informações. Além disso, em ambientes com alta densidade de dispositivos, o tráfego intenso de sinais pode causar colisões nos canais de transmissão, evidenciando que essa solução é mais adequada para cenários em que o tempo de atualização não é crítico e a quantidade de sensores conectados é moderada (FREITAS *et al.*, 2024).

1.5. IoT para monitoramento energético na indústria

No cenário da Indústria 4.0, surge um novo paradigma relacionado à integração de sistemas físicos e digitais. Nesse contexto, a Internet das Coisas (IoT) desponta como tecnologia fundamental, permitindo que máquinas e dispositivos se conectem à rede para coletar e compartilhar dados em tempo real. Vale destacar que a IoT não se limita à conectividade básica, mas possui uma infraestrutura complexa de hardware e software capaz de transformar ativos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

industriais passivos em componentes inteligentes, capazes de fornecer informações precisas sobre seu próprio estado operacional e desempenho.

> O monitoramento de energia permite identificar rapidamente qualquer problema de eficiência energética e tomar medidas para corrigi-lo, o que pode levar a uma redução significativa de custos e a um aumento na eficiência da produção (SANTOS *et al.*, 2022, p. 14).

O setor industrial é historicamente um dos maiores consumidores de energia elétrica, representando uma parcela significativa da demanda energética global. No contexto brasileiro, os dados do Balanço Energético Nacional reforçam a necessidade de desenvolver estratégias de gestão voltadas à redução de custos e à otimização de recursos. O monitoramento energético destaca-se, portanto, como ferramenta indispensável: por meio dele, é possível identificar desperdícios e corrigir desvios no fator de potência.

1.6. Consumo energético nos setores industriais brasileiros

O consumo energético industrial no Brasil está no centro das discussões sobre o desenvolvimento sustentável, visto que o setor responde por uma grande parcela do consumo final de energia e das emissões de GEE. Embora o país possua uma matriz elétrica relativamente limpa quando comparada à média mundial, com grande participação de fontes renováveis, a indústria ainda possui forte dependência de combustíveis em seus processos térmicos. Em relação à sustentabilidade industrial, destaca-se a relevância de trabalhar nas três frentes: econômica, social e ambiental, alinhadas ao conceito de produção sustentável.

Abordagens como a ecoeficiência — que significa maximizar o uso dos recursos para reduzir o consumo de matérias-primas e, consequentemente, os impactos ambientais — e a Produção mais Limpa (P+L) aparecem como estratégias fundamentais para diminuir os impactos sem comprometer a competitividade das organizações. Nesse sentido, o uso de ferramentas quantitativas como, por exemplo, a Análise Envoltória de Dados (DEA), permite avaliar o desempenho dos setores industriais ao correlacionar, ao mesmo tempo, variáveis como consumo energético, emissões de CO_2, geração de valor econômico e postos de trabalho.

Por fim, é de responsabilidade das políticas públicas e órgãos reguladores incentivar a eficiência energética e a descarbonização do parque fabril brasileiro. Programas governamentais e iniciativas privadas têm contribuído para a expansão de fontes renováveis e a mitigação de emissões, ainda que de forma desigual entre os segmentos. A gestão da eficiência energética, a diversificação da matriz, a inovação tecnológica e os indicadores de desempenho constituem

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

o caminho mais consistente para a redução de CO_2 e para o fortalecimento da sustentabilidade na indústria.

1.7. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2026

O cenário energético industrial atual evidencia a necessidade de desenvolver ferramentas de auditoria e monitoramento, considerando a participação expressiva do setor produtivo no consumo nacional de eletricidade. Segundo dados oficiais da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo total de energia elétrica na indústria atingiu a marca de 199,3 TWh, sendo a maior classe consumidora do país, responsável por 35,2% da demanda nacional. Mesmo que o crescimento global dessa frente tenha registrado um aumento moderado de 0,7%, o comportamento entre os setores continuou heterogêneo, com um crescimento na demanda observado em 22 dos 37 segmentos manufatureiros analisados.

Analisando a distribuição por setores, o segmento de "Borracha e Material Plástico" está entre os dez maiores centros de consumo do cenário de manufatura brasileiro. Esse consumo está diretamente ligado às características do processamento de elastômeros, no qual grandes volumes de energia térmica e mecânica são necessários para manter ciclos estáveis de plastificação e vulcanização do composto. Portanto, ao relacionar esse consumo elevado com os requisitos de sustentabilidade e lucratividade corporativa, entende-se a necessidade de implementar uma arquitetura de monitoramento em tempo real.

2. METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida a partir de um projeto implementado na empresa em 2025. A coleta de dados operacionais utilizou o protocolo LoRaWAN para enviar as medições realizadas pelos medidores Acrel por meio de conversores/transmissores RAK7431.

Como forma de viabilizar uma análise mais eficiente do processo, o método proposto fundamenta-se em um sistema automatizado de monitoramento. Esse sistema realiza a captação contínua de parâmetros elétricos nas células de fabricação, atuando diretamente no maquinário. As informações são transmitidas via rádio sem fio de longo alcance, sendo centralizadas, padronizadas e armazenadas em um banco de dados integrado. Por fim, os dados alimentam painéis dinâmicos na plataforma Power BI, permitindo a visualização em tempo real do perfil energético por equipamento e fornecendo às equipes de Automação e Industrialização uma base quantitativa robusta para a otimização de processos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Esse estudo se limita a abordar os benefícios proporcionados pela implantação do monitoramento energético como ferramenta de acompanhamento e gestão. Assim, a prioridade é apresentar a capacidade do sistema de tornar visíveis os padrões de consumo por equipamento, período e condição operacional, bem como ajudar a identificar situações que mereçam investigação ou intervenção.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. O panorama da eficiência energética na indústria nacional

Para compreender o impacto do monitoramento de ativos no chão de fábrica, é necessário analisar o panorama do consumo energético na indústria brasileira. Historicamente, o setor produtivo tem se mostrado como um dos segmentos de maior demanda elétrica no país, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2. Nesse cenário, a eficiência energética deixa de ser apenas uma estratégia para redução de custos e passa a funcionar como um pilar para o cumprimento de metas de sustentabilidade e para o aumento da competitividade do mercado.

Tabela 1. Consumo de energia elétrica por classe e variação anual

Classe de Consumo	Consumo (GWh)	Participação (%)	Variação Anual (%)
Industrial	199.341	35,20%	0,70%
Residencial	179.648	31,70%	1,70%
Comercial	104.031	18,40%	0,30%
Rural	32.370	5,70%	2,90%
Serviço Público	17.793	3,10%	1,30%
Poder Público	17.448	3,10%	-1,00%
Iluminação Pública	12.704	2,20%	-4,10%
Consumo Próprio	3.414	0,60%	-1,80%
TOTAL	566.749	100,00%	—

Fonte: EPE, 2026.

Tabela 2. Consumo industrial de energia elétrica por segmento

Segmento Industrial	Participação	Consumo (GWh)
Metalúrgico	25,30%	50.010
Produtos Alimentícios	14,00%	27.809
Químico	9,30%	18.533
Extração de Minerais Metálicos	7,90%	15.639
Produtos Minerais Não Metálicos	7,60%	15.122
Borracha e Material Plástico	6,00%	11.807
Papel e Celulose	5,00%	9.960
Automotivo	3,50%	6.966
Têxtil	3,10%	6.226

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Produtos Metálicos (exceto máquinas/equipamentos)	2,20%	4.303
Total (10 maiores)	84%	166.466

Fonte: EPE, 2026.

Atualmente, a classe industrial lidera a demanda nacional com 199.341 GWh, o que representa 35,2% de toda a energia elétrica consumida no país, superando o consumo residencial (31,7%). Esse volume expressivo, alinhado ao crescimento contínuo de 0,7% no período, justifica a urgência no desenvolvimento de estratégias de eficiência energética voltadas à melhoria dos equipamentos e processos no chão de fábrica. Pequenos ganhos na otimização do maquinário podem gerar reduções significativas no consumo absoluto, com impacto direto na diminuição dos custos operacionais. Nesse contexto, compreender a distribuição e o consumo de energia nos processos produtivos é o ponto de partida para qualquer intervenção.

3.2. O processo produtivo de artefatos de borracha e seu impacto energético

No processo produtivo de artefatos de borracha, especificamente na realidade da empresa analisada, o elevado consumo energético é reflexo da concentração de ativos de grande porte, como injetoras e prensas hidráulicas – Figuras 1 e 2. As demandas dos clientes, muitas vezes, exigem um funcionamento ininterrupto do maquinário, distribuído em três turnos que totalizam 24 horas de produção diária, com exceção de um dia na semana. Essa continuidade operacional, embora necessária para atender a essas demandas de volume e produtividade, impõe uma carga elevada e constante sobre o sistema elétrico da planta, tornando a gestão energética um fator crítico para a rentabilidade do negócio e para as ações sustentáveis.

Figura 1. Injetora de Borracha



Fonte: PANSTONE, 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. Prensa de Borracha



Fonte: Pan Stone, 2026.

Do ponto de vista do fluxo do processo — que se inicia na produção do composto de borracha e se estende até a obtenção do artefato final —, a operação principal é a vulcanização. Esse processo químico consiste na transformação da borracha crua (plástica, frágil e pegajosa) em um material altamente elástico, resistente e estável. Essa alteração estrutural ocorre por meio de ligações químicas entre as cadeias poliméricas, induzidas pela aplicação controlada de temperatura e pressão, com períodos de tempo controlados, e com o painel das máquinas sendo responsável pelo gerenciamento.

Analisando esse ponto crítico, esse processo de vulcanização representa o momento de maior dissipação térmica e consumo de potência ativa. Para que a reação química ocorra de forma homogênea, as resistências elétricas presentes nos canhões de injeção, nas placas das prensas e nos moldes de borracha precisam operar em temperaturas que variam entre 140 °C e 180 °C. No início da operação, após o acionamento da máquina, ocorre o período de aquecimento inicial, no qual as resistências elétricas são acionadas para aumentar gradualmente a temperatura dos componentes até as condições necessárias para o início do processo produtivo. Durante essa etapa, há um consumo significativo de energia, uma vez que o sistema precisa fornecer temperatura suficiente para atingir e estabilizar os níveis de operação. Esse período, bem como os de troca de molde, intervalos de operadores ou paradas de linha, devem ser considerados na avaliação, pois, embora não haja produção efetiva de peças durante esse tempo, o equipamento permanece consumindo energia para alcançar ou se manter nas condições adequadas de funcionamento. Portanto, quando o maquinário está parado, com as

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

resistências ligadas, ocorre um desperdício por calor dissipado, encarecendo o custo energético por peça produzida.

Além da variável térmica, a desmoldagem das peças exige esforços mecânicos. Os sistemas hidráulicos, responsáveis por manter a pressão de expansão da borracha no molde durante o fechamento, operam com motores elétricos de alta potência. A alternância desses ciclos — com momentos de repouso intercalados a picos de movimentação — provoca oscilações bruscas no fator de potência. Portanto, a análise do ciclo térmico e mecânico relacionada ao volume de peças produzidas é o que permite a identificação de gargalos operacionais, fornecendo subsídios para encontrar estratégias de otimização.

3.3. ABNT NBR ISO 50001:2018 – Sistemas de gestão de energia

A ISO 50001 estabelece requisitos para a criação, implementação, manutenção e melhoria contínua de um Sistema de Gestão de Energia (SGE), focando no aprimoramento do desempenho energético organizacional. Essa norma é uma referência internacional no gerenciamento sustentável de recursos, pois traz uma estrutura sistemática para identificar, monitorar e controlar as variáveis que influenciam o consumo energético, viabilizando ações direcionadas e eficientes.

No ambiente industrial, a adoção de um SGE ganha relevância estratégica por conta da presença de máquinas pesadas e processos de alta demanda. Para isso, a ISO 50001 fundamenta-se na coleta e na análise rigorosa de dados, garantindo que as tomadas de decisão sejam baseadas em indicadores robustos e confiáveis.

Segundo Soares (2015), para as empresas, a implementação da norma contribui com impactos positivos para a competitividade industrial. Um bom sistema de gestão energética promove a redução nos custos de produção, já que os desperdícios de energia e perdas não monitorados representam custos invisíveis. A norma também pode contribuir para o fortalecimento da imagem institucional das empresas, uma vez que a redução do consumo de energia implica diretamente na diminuição dos impactos ambientais. Paralelamente, a demanda dos clientes finais para que as empresas sejam certificadas nessa norma vem aumentando nos últimos anos. Nesse sentido, o sistema de monitoramento apresentado neste trabalho foi baseado nos princípios estabelecidos pela ISO 50001, uma vez que a empresa em estudo possui certificação segundo essa norma.

3.4. Tecnologias de monitoramento e arquitetura de dados no chão de fábrica

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Na empresa estudada, a arquitetura de hardware e comunicação foi projetada para superar os desafios do ambiente fabril, onde o ruído eletromagnético de motores de grande porte costuma inviabilizar o cabeamento tradicional ou o uso de redes sem fio de curto alcance (como o Wi-Fi). Por essa razão, a infraestrutura de telemetria foi estruturada em camadas, garantindo a integridade do fluxo desde a captura até o envio das informações.

Para a captura das informações nos equipamentos, foram instalados multimedidores de energia da marca Acrel diretamente nos painéis elétricos das máquinas, permitindo a amostragem contínua do consumo. A escolha desses equipamentos se deu por conta da sua capacidade de converter sinais analógicos em dados digitais via interface nativa RS485. Essa característica reduz a necessidade de módulos intermediários e simplifica a integração do sistema.

Contudo, o grande espaço físico do chão de fábrica e a distância entre os painéis elétricos tornavam inviável a expansão de infraestruturas mais comuns como calhas e eletrodutos. Para contornar essa limitação, adotaram-se os conversores de dados RAK7431 – Figura 3. Esses módulos atuam como pontes de comunicação Modbus-RS485 para redes sem fio de longo alcance, coletando os dados gerados pelos medidores e preparando-os para a transmissão via radiofrequência.

O RAK7431 é um conversor RS485 projetado para aplicações industriais. O dispositivo transmite dados Modbus usando a rede LoRaWAN como meio de transmissão sem fio aos dispositivos finais. Ele pode operar em todas as bandas LoRaWAN dentro dos parâmetros padronizados definidos pela LoRa Alliance (associação internacional criada para promover, padronizar e desenvolver o ecossistema LoRaWAN). Seu alcance em ambiente aberto é de mais de 15 quilômetros e, em casos industriais, onde há obstruções pesadas no trajeto do sinal RF, o desempenho é melhorado em comparação com sistemas sem fio convencionais devido às características da LoRa como técnica de modulação. Isso permite uma boa e consistente qualidade de sinal dentro dos limites das grandes fábricas. Estes dispositivos compatíveis com RS485 podem lidar com até 16 nós de terminais do cliente. A conversão “de” e “para” quadros LoRa é perfeita e permite o controle e monitoramento em tempo real de vários dispositivos RS485. O RAK7431, juntamente com o gateway RAK e os produtos LoRa Server, permite construir, de forma fácil e rápida, um sistema de controle de campo industrial sem fio. Ele adota um design de proteção industrial, suporta fornecimento de tensão de faixa ampla, suporta montagem em parede e instalação em trilho, facilitando a instalação e o uso em campo. (RAKWIRELESS, [s.d.]).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 3. Rádio modem LoRaWAN RS485 – RAK7431



Fonte: Alfacomp, 2026.

É importante distinguir a utilização das medições para fins de acompanhamento operacional da avaliação metrológica dos equipamentos. Neste estudo, os valores coletados são utilizados para analisar o comportamento do consumo ao longo do tempo e permitir comparações entre equipamentos e condições de operação. Contudo, como não foram realizados ensaios específicos de calibração ou comparação com instrumentos de referência, não é possível determinar claramente a precisão e a exatidão das medições obtidas. Dessa forma, os dados são considerados ferramentas de monitoramento e apoio à gestão energética.

O protocolo adotado para a propagação desses pacotes de dados, LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), opera em frequências sub-GHz e emprega a modulação por espalhamento espectral (Chirp Spread Spectrum – CSS); esse padrão confere à arquitetura imunidade contra interferências eletromagnéticas geradas pelo acionamento de motores e máquinas de grande porte. Adicionalmente, a topologia em estrela da rede permite cobrir longas distâncias no parque industrial com baixo consumo de largura de banda e alta capacidade de penetração em barreiras metálicas e de alvenaria, assegurando a integridade das informações.

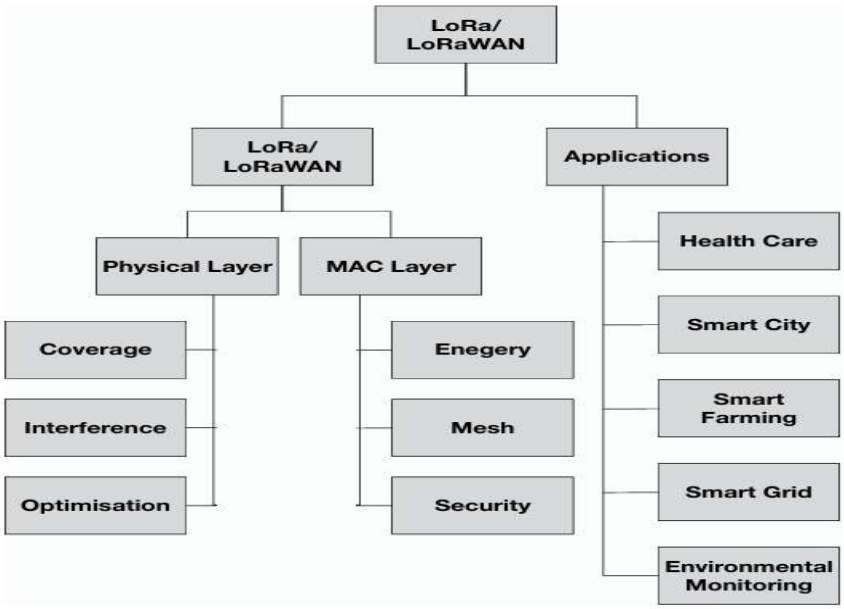
Ertürk *et al.* (2019) enfatizam que o LoRaWAN é um protocolo de camada MAC - Controle de Acesso ao Meio, componente da camada de enlace de dados no modelo OSI (Interconexão de Sistemas Abertos), especificamente no campo da comunicação em rede - e busca resolver problemas de gestão do meio e congestionamento da rede. Qualquer sistema que utilize este protocolo pode se beneficiar das seguintes características:

- Gestão de canais;
- Eficiência energética;

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

• Dados adaptativos;
• Segurança;
• GPS-Geolocalização gratuita.

Figura 4. Taxonomia da literatura LoRa/LoRaWAN



Fonte: Ertürk *et al.* (2019).

3.5. O tratamento dos dados

Com a instalação dos medidores de energia, fez-se necessária a elaboração de um sistema robusto para o armazenamento e o tratamento do alto volume de dados gerados ao longo do monitoramento. Por meio da infraestrutura de comunicação previamente descrita, os dados de consumo elétrico são coletados e transmitidos continuamente para uma base de dados integrada ao Power BI – Figura 5. O processamento e a organização dessas informações permitem a visualização sistemática dos indicadores de desempenho sob variadas condições operacionais.

Durante o ciclo de funcionamento das máquinas, os dados são correlacionados ao contexto operacional de cada equipamento. Isso permite a aplicação de filtros dinâmicos nos painéis do dashboard, segmentando as informações de acordo com as variáveis específicas do

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

período analisado. Com isso, a ferramenta proporciona análises detalhadas do perfil de consumo, conferindo maior precisão e agilidade à tomada de decisão pela gestão.

Para garantir a confiabilidade desses apontamentos, o operador registra em tempo real a atividade executada na máquina durante o turno de produção. Entre os status operacionais mapeados, destacam-se: período de produção, aquecimento de molde, tempo de setup, regulagem de máquina e pausas de turno.

Dessa forma, a arquitetura desenvolvida vai além de um simples acompanhamento do consumo, permitindo relacionar a demanda energética diretamente às etapas e oscilações do processo de produção. Essa abordagem integrada é importante para mapear ineficiências, possibilitar a redução de custos operacionais e fornecer indicadores precisos para a melhoria contínua da gestão energética na planta.

Figura 5. Tabela de dados do Power BI

id	equipment_id	counter_id	date_time	Auxiliar	Ordem_prod	Energia_hora	Energia_hora_MWh	Item	Status_rec
2203588	21	21	quinta-feira, 14 de maio de 2026	3	203377	8	0,008	Item 1	Refeição
2686833	99	99	sábado, 15 de agosto de 2026	3	203377	10	0,010	Item 2	Produção
234450	57	57	segunda-feira, 1 de junho de 2026	3	203377	64	0,064	Item 3	Produção
2795324	67	67	sexta-feira, 31 de julho de 2026	3	203377	3	0,003	Item 4	Produção
2365274	4	4	quarta-feira, 4 de junho de 2026	3	203373	7	0,007	Item 5	Produção
2139388	43	43	terça-feira, 5 de maio de 2026	3	203373	5	0,005	Item 6	Refeição
1886511	47	47	quinta-feira, 26 de março de 2026	3	203374	11	0,011	Item 7	Produção
2247877	73	73	sábado, 8 de agosto de 2026	3	203375	8	0,008	Item 8	Produção
2787588	30	30	quinta-feira, 30 de julho de 2026	3	203375	5	0,005	Item 9	Regulagem BCS
2672846	64	64	quinta-feira, 9 de julho de 2026	3	203375	16	0,016	Item 10	Produção
7773498	50	50	terça-feira, 10 de março de 2026	3	203375	7	0,007	Item 11	Produção
2499257	49	49	segunda-feira, 1 de junho de 2026	3	203375	5	0,005	Item 12	Fora de Turno
2587162	87	87	quarta-feira, 1 de julho de 2026	3	203376	7	0,007	Item 13	Produção
2207732	60	60	quarta-feira, 14 de maio de 2026	3	203376	9	0,009	Item 14	Produção
2078589	61	61	domingo, 26 de abril de 2026	3	203376	21	0,021	Item 15	Produção

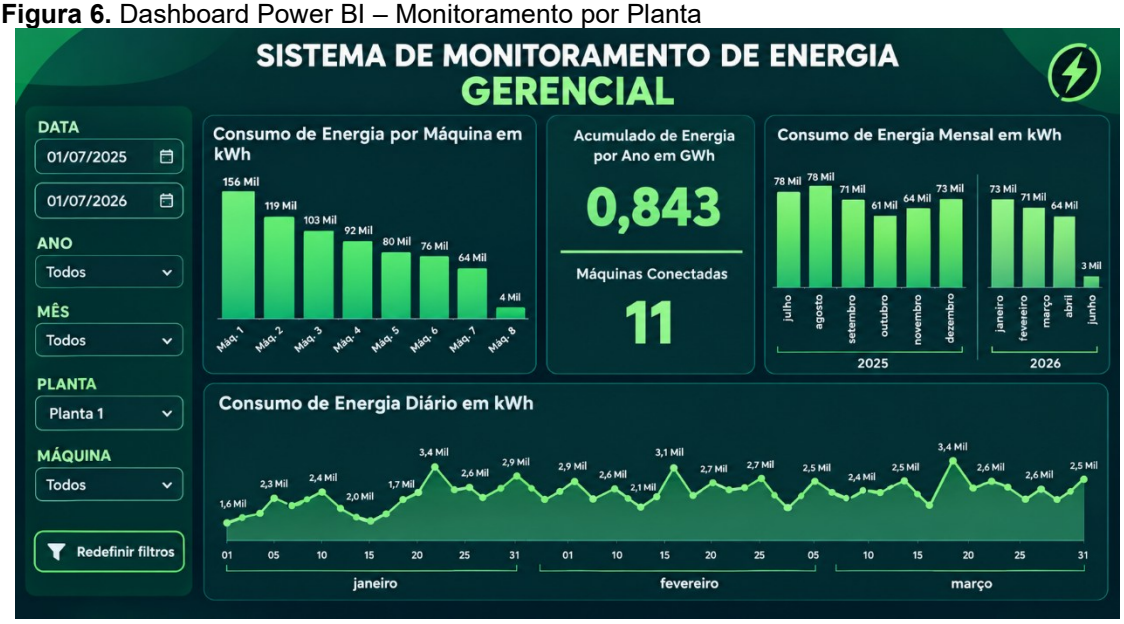
Fonte: Os autores, com adaptação (2026).

Por meio das ferramentas aplicadas, o sistema identifica com precisão os horários de pico de demanda e os intervalos de maior e menor utilização de energia. Adicionalmente, é possível comparar diretamente os equipamentos, destacando os ativos de maior relevância no consumo e os de menor impacto energético.

Outra possibilidade é a análise através da curva ABC dos dados coletados, classificando as máquinas de acordo com sua representatividade no consumo total. Essa estratificação facilita a priorização de ações e o direcionamento de investimentos para os recursos de maior impacto. Paralelamente, a análise dos indicadores de consumo também permite identificar equipamentos potencialmente subutilizados, fornecendo dados concretos para a otimização dos processos relacionados a esses ativos.

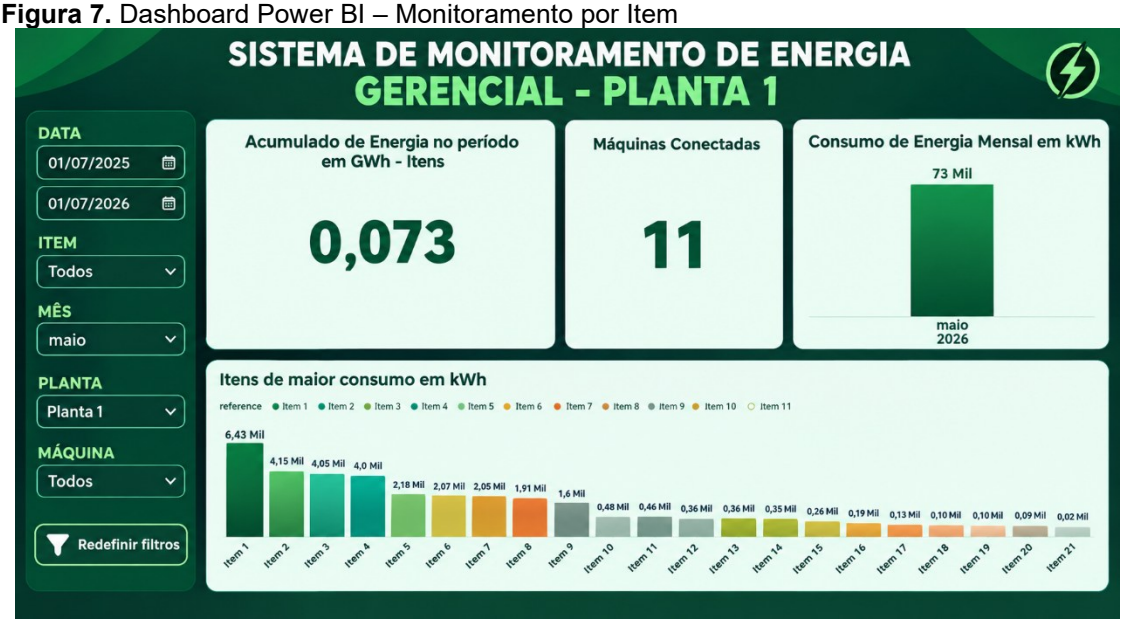
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 6. Dashboard Power BI – Monitoramento por Planta



Fonte: Os autores, com adaptação (2026).

Figura 7. Dashboard Power BI – Monitoramento por Item



Fonte: Os autores, com adaptação (2026).

O sistema permite também a avaliação do consumo energético por item produzido, conforme mostrado na Figura 7. Do ponto de vista da manufatura, essa mensuração viabiliza

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

avaliar a eficiência energética associada a cada produto, identificando itens que apresentem consumo desproporcional ao seu histórico. Quando correlacionados aos volumes produzidos e às particularidades de cada ciclo, esses dados otimizam a detecção de ineficiências, desvios de processo e oportunidades de melhoria contínua.

A apresentação dos resultados tem caráter descritivo e funcional. A divulgação de séries históricas, volumes de produção, consumo por máquina, custos e demais indicadores detalhados não foi possível, por conta da confidencialidade dos dados internos da empresa estudada.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho demonstrou que o monitoramento do consumo energético proporciona uma visão precisa do perfil de consumo, atuando como uma ferramenta estratégica para o planejamento operacional e a sustentabilidade no setor industrial de artefatos de borracha. A tecnologia de conectividade escolhida provou-se altamente eficaz para o ambiente fabril, superando barreiras físicas e o intenso ruído eletromagnético do chão de fábrica, garantindo a coleta contínua e confiável de dados em tempo real. Com isso, confirmou-se a hipótese inicial de que a infraestrutura implementada fornece o suporte necessário para diagnósticos operacionais de alta confiabilidade.

Na prática, a análise temporal dos dados permitiu observar detalhadamente o comportamento do consumo energético, viabilizando a identificação de desperdícios, horários de pico, ineficiências operacionais e discrepâncias no consumo entre equipamentos. A utilização de recursos de filtragem do Power BI contribuiu para uma visualização setorizada que permite correlacionar o consumo entre diferentes plantas, máquinas e itens produzidos. Além disso, a aplicação de filtros temporais suporta o planejamento de ações em curto, médio e longo prazo, atuando diretamente na redução dos custos operacionais e no alinhamento às metas de descarbonização e responsabilidades socioambientais. Dessa forma, o monitoramento energético não se limita a uma medida reativa ou de economia financeira imediata, mas constitui um elemento estratégico para a tomada de decisões na indústria.

Por fim, ao longo do projeto, a equipe técnica pôde observar a importância da medição do consumo energético em tempo real e sua contribuição para um maior controle, rastreabilidade, previsibilidade e segurança sobre os processos produtivos. Desde a sua implantação, o sistema permanece em operação contínua e integrado à rotina da fábrica, passando por constantes melhorias e expansão de seus recursos, com incorporação de novas funcionalidades e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

refinamento do processamento de dados. Com isso, a arquitetura evolui junto com as demandas técnicas, garantindo que a planta mantenha um funcionamento otimizado e que atenda aos padrões de eficiência, qualidade e sustentabilidade.

Portanto, os benefícios discutidos devem ser entendidos como contribuições do monitoramento para a gestão, permitindo maior visibilidade do consumo, rastreabilidade das informações e contextualização dos dados com as respectivas atividades produtivas. A comprovação de economias de energia, ganhos de produtividade e nível de exatidão das medições exigiria estudos específicos e ensaios dedicados, com a comparação de resultados, indicadores quantitativos autorizados pela empresa e procedimentos de verificação adequados. Essa delimitação permite preservar a confidencialidade da empresa e manter as conclusões alinhadas ao que foi apresentado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ALFACOMP. Rádio modem LoRaWAN RS485 – RAK7431. Disponível em: https://www.alfacomp.net/radio-modem-lorawan-rs485-rak7431. Acesso em: 7 jul. 2026.

CAMIOTO, Flávia de C. Consumo Energético nos Setores Industriais Brasileiros – Uma Avaliação de Desempenho e Estratégias para a Redução da Emissão de CO_2. Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2013. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18157/tde-15102013-101454/publico/FlaviaCamiottoDEFINITIVO.pdf. Acesso em: 20 mar. 2026.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA - CNI. Eficiência energética na indústria: Teoria e prática. Brasília: CNI/Eletrobras/Procel, 2017. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br. Acesso em: 18 fev. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2026. Disponível em: https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario/anuario-factsheet.pdf. Acesso em: 21 maio 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Balanço Energético Nacional 2023: Ano base 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br. Acesso em: 20 jan. 2026.

ERTÜRK, Mehmet Ali; AYDIN, Muhammed Ali; BÜYÜKAKKAŞLAR, Muhammet Talha; EVGER, Hayrettin. A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies. Future Internet, v. 11, n. 10, p. 216, 2019. Disponível em: https://www.mdpi.com/1999-5903/11/10/216. Acesso em: 13 ago. 2026.

FREITAS, Vinicius M.; RODRIGUES, Luiz A.; OYAMADA, Marcio S. Gateway WIFI-LoRaWAN para Integração de Medidores Inteligentes de Energia. Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Cascavel – PR, 2024. Disponível em: https://sol.sbc.org.br/index.php/latinoware/article/view/31520/31323. Acesso em: 15 jan. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

PANSTONE. Máquina de moldagem por injeção de borracha vertical. Mogi das Cruzes – SP, 2026. Disponível em: https://panstone.com.br/injetoras/. Acesso em: 22 maio 2026.

PANSTONE. Prensas. Mogi das Cruzes – SP, 2026. Disponível em: https://panstone.com.br/. Acesso em: 22 maio 2026.

RAKWIRELESS. RAK7431 WisNode Bridge Serial Product Description. RAKwireless, [s.d.]. Documento Técnico. Disponível em: https://docs.rakwireless.com/product-categories/wisnode/rak7431/datasheet/. Acesso em: 20 jul. 2026.

SANTOS, Altamir P.; QUEIROZ, Danilo dos S.; GONÇALVES, Erick D. A. S.; MONTENEGRO, Yuri F. IoT Aplicada para Monitoramento Energético na Indústria. Apoena Revista Eletrônica. Salvador - BA, v. 2, n. 5, p. 106-122, 2022. Disponível em: https://publicacoes.unijorge.com.br/apoena/article/view/336/305. Acesso em: 12 dez. 2025.

SOARES, Gerdson Tanaka; SOARES, Thiago Mota; TOSTES, M. E. L. Sistema de Gerenciamento de Energia Como Ferramenta de Eficiência Energética na Indústria. Belém – PA, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufpa.br/server/api/core/bitstreams/d1888d45-8b21-4523-9aaa-292ec7301500/content. Acesso em: 11 jan. 2026.

VIANA, Augusto; BORTONI, Edson; NOGUEIRA, Fábio; HADDAD, Jamil; NOGUEIRA, Luiz; VENTURINI, Osvaldo; YAMACHITA, Roberto. Eficiência Energética: fundamentos e aplicações. Universidade Federal de Itajubá, Campinas – SP, 2012. Disponível em: https://www.electro-genesis.com/WebGenesisBiblio/Literatura/Articulos/Eficiencia/Web/Livro_Eficiencia_Energetica.pdf. Acesso em: 19 dez. 2025.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.