

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MOTORES ELÉTRICOS INDUSTRIAIS: OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0

Adriano de Lima Rodrigues¹, Frederico Silva Moreira¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Brasil
(adriano.lrodrigues@gmail.com)

Resumo: A crescente busca por eficiência energética na indústria tem impulsionado a otimização do consumo de energia em sistemas motrizes. Este trabalho avalia o desempenho energético de motores elétricos em aplicações industriais, identificando oportunidades de melhoria por meio do correto dimensionamento e da adequação das condições de operação. Os resultados apoiam a gestão energética, contribuindo para a sustentabilidade, a inovação tecnológica e a tomada de decisões

Palavras-chave: Indústria 4.0; Eficiência Energética; Sistemas Motrizes; Motores Elétricos

INTRODUÇÃO

A eficiência energética consolidou-se, ao longo das últimas décadas, como um dos principais pilares estratégicos da indústria moderna. Tal protagonismo decorre não apenas da necessidade contínua de redução de custos operacionais, mas também das exigências impostas pela transição energética global, pelos compromissos de descarbonização e pela crescente pressão regulatória e social por modelos produtivos mais sustentáveis (IEA, 2024; IRENA, 2023; World Economic Forum, 2023).

Nesse cenário, a chamada Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, tem ampliado de forma significativa as possibilidades de otimização energética, ao integrar tecnologias como Internet das Coisas (IoT), sistemas ciberfísicos, computação em nuvem, inteligência artificial e análise avançada de dados, conferindo ao parque fabril maior visibilidade e controle sobre o consumo de energia em tempo real (Schwab, 2016; Tao *et al.*, 2019; Freitas *et al.*, 2019; Introna *et al.*, 2024; Cagno *et al.*, 2025).

No Brasil, a indústria é responsável por mais de 35% do consumo total de energia elétrica, conforme indicado pelo Balanço Energético Nacional (Figura 1) (EPE, 2025). Esse peso expressivo torna o setor um dos principais alvos de programas de conservação de energia e de pesquisas voltadas à otimização operacional, especialmente porque os ganhos obtidos em ambiente industrial tendem a apresentar elevada escala e retorno econômico mais rápido em comparação a outros setores.

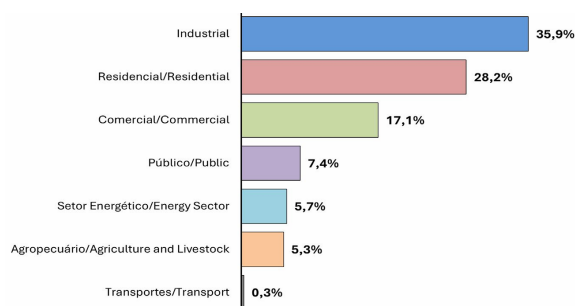


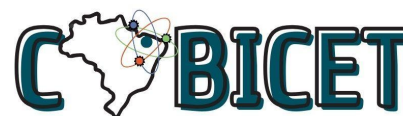
Figura 1. Participação Setorial no Consumo de Eletricidade.

Fonte: EPE 2025.

Entre os principais consumidores de energia no ambiente industrial, destacam-se os sistemas motrizes elétricos. Os motores de indução trifásicos, especialmente os do tipo gaiola de esquilo, são amplamente utilizados devido à sua robustez, confiabilidade, simplicidade construtiva e excelente relação custo-benefício (Almeida *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2025).

Entretanto, seu impacto no consumo energético é significativo. Estima-se que os sistemas motrizes sejam responsáveis por aproximadamente 60% a 70% do consumo de energia elétrica industrial mundial (IEA, 2024; Gómez *et al.*, 2020) e por cerca de 27% a 30% do consumo total de energia elétrica no Brasil (EPE, 2023; PROCEL, 2024).

Em estudos brasileiros mais recentes, esse percentual chega a 68% quando considerado apenas o consumo



elétrico interno da indústria de transformação (Souza *et al.*, 2025; Ferreira; Novaes, 2018).

Apesar da eficiência intrínseca cada vez maior dos motores comercializados, impulsionada por padrões mínimos de desempenho energético (MEPS) e pela evolução das classes IE3 (Premium), IE4 (Super-Premium) e, mais recentemente, IE5 (Ultra-Premium), observa-se que muitos equipamentos em operação ainda apresentam desempenho aquém do potencial.

Essa lacuna decorre, em grande medida, de condições operacionais inadequadas, com destaque para o sobredimensionamento, as variações de carga ao longo do processo produtivo, o envelhecimento do parque instalado e práticas de manutenção pouco estruturadas (Saidur, 2010; Waide; Brunner, 2011; Bortoni, 2007; Ferreira *et al.*, 2016; Almeida *et al.*, 2021).

Especificamente, motores que operam de forma persistente em regime de subcarga apresentam queda acentuada do rendimento e do fator de potência, elevando perdas elétricas, custos operacionais e emissões indiretas associadas à geração (Ferreira; Almeida, 2008; Roldan-Fernandez *et al.*, 2025; Aguiar *et al.*, 2022).

Os impactos econômicos e ambientais dessas ineficiências são significativos. Estima-se que as perdas associadas à operação inadequada de sistemas motrizes representem custos superiores a US\$ 100 bilhões por ano em escala global, com contribuição relevante para as emissões de gases de efeito estufa, que ultrapassam 1,5 Gt de CO₂ anuais (IEA, 2024; IRENA, 2023; Yurtay, 2025).

Como resposta, países e blocos econômicos vêm aprimorando suas políticas de eficiência energética. No Brasil, iniciativas como o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) e a adoção de normas como a NBR 17094, que estabelece os requisitos mínimos de desempenho para motores IE3 e IE4, têm gerado avanços expressivos ao longo das últimas décadas (Jannuzzi, 2015; EPE, 2023; Pinheiro *et al.*, 2019; Souza *et al.*, 2025).

Ainda assim, persistem desafios importantes, tais como a limitação de conhecimento técnico nas plantas industriais, restrições de investimento inicial, baixa difusão de práticas de gestão energética estruturada e a necessidade de maior integração entre políticas públicas e operações industriais (ABINEE, 2022; Moraes; Neumann, 2011; IEA, 2022; Gómez *et al.*, 2022).

Com o avanço da digitalização industrial, novas abordagens vêm transformando a forma como a eficiência energética é gerenciada. Tecnologias baseadas em IoT permitem o monitoramento

contínuo dos equipamentos, possibilitando a identificação rápida de falhas, a detecção de desvios operacionais e a tomada de decisão suportada por dados (Mirani *et al.*, 2024; Bazigu; Mwebaze, 2025; Segun-Falade *et al.*, 2024).

Réplicas virtuais, conhecidas como gêmeos digitais (*digital twins*), viabilizam simulações e análises preditivas sem interferir na operação real, sendo particularmente promissores para o monitoramento de motores de indução em ambiente industrial (Tao *et al.*, 2019; Fuller *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2022; Phutane *et al.*, 2025).

Em paralelo, técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina permitem ajustes mais precisos no funcionamento dos sistemas, com aplicações que vão desde o controle otimizado de inversores de frequência (VFD) até a estimativa não-intrusiva de carga e rendimento dos motores em campo (Lee *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023; Tolbert, 2025; Roldan-Fernandez *et al.*, 2025).

Resultados recentes indicam o potencial efetivo dessas soluções. Em ambientes industriais como o setor automotivo, foram observadas reduções de 20% a 35% no consumo de energia a partir da modernização de sistemas motrizes (Wang *et al.*, 2023).

No Brasil, aplicações em segmentos como mineração e agroindústria indicam ganhos entre 15% e 25% com o uso de análise preditiva, computação de borda e adoção de motores de classes IE3/IE4 (Silva *et al.*, 2023; EPE, 2024; Aguiar *et al.*, 2018).

Além dos benefícios energéticos diretos, tais iniciativas costumam apresentar retorno financeiro em prazos competitivos, com *payback* frequentemente inferior a dois anos, e contribuem para o aumento da confiabilidade e da vida útil dos equipamentos (McKinsey, 2022; IRENA, 2023; Aguiar *et al.*, 2018; Ferreira; Novaes, 2018).

Estudos comparativos internacionais reforçam ainda que a adequação entre o motor e o perfil real da carga é, em muitos casos, mais determinante para a economia de energia do que a simples migração para classes superiores de eficiência, tornando o redimensionamento uma estratégia tecnicamente robusta e economicamente atrativa (Ferreira *et al.*, 2016; Gómez *et al.*, 2022; Sola; Mota, 2015).

Diante desse cenário, o presente estudo foi desenvolvido em uma planta industrial de extração de óleo vegetal localizada em Campo Grande/MS, com o objetivo de avaliar o desempenho energético de motores elétricos na faixa de 5 a 200 cv.

A proposta consiste em identificar oportunidades de melhoria por meio da análise crítica do dimensionamento, da avaliação preditiva das

condições operacionais e da incorporação de tecnologias associadas à Indústria 4.0.

Como contribuição, busca-se propor um modelo prático e aplicável de gestão energética, capaz de articular eficiência, sustentabilidade e inovação tecnológica, alinhado às diretrizes dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, em especial o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima).

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo adotou uma abordagem quantitativa e qualitativa, fundamentada em procedimentos típicos de auditorias energéticas industriais e em métodos de análise de desempenho de sistemas motrizes.

A metodologia foi estruturada com base em diretrizes consolidadas na literatura técnica e em normas de gestão de energia, incluindo recomendações de Sola e Mota (2015), Martins (2017), Souza *et al.* (2025) e Santos e Miyamoto (2024), além de referenciais como ISO 50001 e estudos sobre eficiência em motores elétricos.

O desenvolvimento do estudo seguiu as seguintes etapas principais:

- inventário completo dos motores elétricos instalados na planta;
- identificação de áreas com maior potencial de ganho energético;
- seleção do setor e do conjunto de motores a serem analisados em detalhe;
- realização de medições elétricas em regime de operação;
- cálculo do carregamento e avaliação do desempenho dos motores;
- redimensionamento e proposição de substituição por motores de maior eficiência;
- estimativa do potencial de redução de demanda e consumo de energia.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização da unidade industrial

O estudo foi conduzido em uma planta industrial de extração de óleo vegetal localizada em Campo Grande, MS, composta pelos setores: Caldeira 1; Caldeira 2; Envase; Eta/Ete; Extração 1; Extração 2; FC; ISO; MAIN; Preparação 1; Preparação 2; Recebimento 1; Recebimento 2; Refinaria; SPC e áreas auxiliares.

A unidade possui um parque motriz predominantemente formado por motores de indução trifásicos do tipo gaiola de esquilo, aplicados em transportadores, laminadores, bombas, ventiladores e outros equipamentos de processo contínuo.

No total, foram inventariados 1.329 motores elétricos distribuídos entre os principais setores produtivos, com destaque para os setores MAIN (238 motores), Envase (131), Recebimento 1 (98), Refinaria (100), Preparação 1 (79) e Preparação 2 (36), entre outros, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Inventário de Motores.

SETOR	Total Geral
CALDEIRA 1	61
CALDEIRA 2	13
ENVASE	131
ETA/ETE	105
EXTRAÇÃO 1	54
EXTRAÇÃO 2	59
FC	119
ISO	80
MAIN	238
PREPARAÇÃO 1	79
PREPARAÇÃO 2	36
RECEBIMENTO 1	98
RECEBIMENTO 2	52
REFINARIA	100
SPC	104
Total Geral	1329

Fonte: Elaboração própria (2026).

Essa distribuição evidencia a relevância dos sistemas motrizes para o consumo de energia elétrica da planta e orienta a priorização de ações de eficiência energética.

Inventário e classificação dos motores

O inventário dos motores elétricos foi realizado a partir de levantamento em campo e de registros existentes na planta, com a classificação dos equipamentos por setor produtivo, resultando na Tabela 1 (Inventário de Motores).

Para cada equipamento foram coletadas informações como potência nominal (cv), tensão de alimentação, tipo de acionamento (partida direta, acionamento por inversor de frequência, entre outros), regime de operação (contínuo ou intermitente), idade aproximada e aplicação no processo. Essa etapa é essencial para identificar padrões de consumo, localizar concentrações de carga e priorizar ações de eficiência energética, em consonância com metodologias de gestão energética industrial descritas por Martins (2017) e Souza *et al.* (2025).

A partir do inventário, foram identificadas as áreas com maior potencial de ganho, considerando a combinação de idade dos motores, rendimento médio estimado e criticidade operacional.

Em paralelo ao inventário foram instalados medidores de energia em cada CCM. O medidor escolhido foi o PowerMonitor 500 EtherNet/IP, modelo 1420-V2P-ENT, conforme a Figura 02. A escolha do modelo se deu em função da estrutura de

automação existente, predominantemente Rockwell e rede EtherNet/IP.



Figura 2. Medidor de energia PowerMonitor 500 EtherNet/IP.

Fonte: [Rockwell Automation](#).

Os medidores permitiram monitorar, em tempo real, as principais grandezas elétricas Tensão, Corrente, Potência reativa (kvar), Potência ativa (kW), Potência aparente (kVA), Consumo de energia real (kW/h), Consumo de potência reativa (kVarh), Consumo de potência aparente (kVA/h), Fator de potência de demanda, Demanda (kW), Demanda (kvar) e Demanda (kVA).

A ferramenta utilizada para exibir as grandezas elétricas foi a OSIsoft PI Vision. O OSIsoft PI Vision (Atualmente AVEVA PI Vision) é uma plataforma web de visualização de dados industriais em tempo real através de informações vindas de CLPs, SCADA, sensores, inversores, sistemas elétricos, utilidades e historiadores PI Server, e apresentando os dados em telas intuitivas para operação, engenharia e gestão (AVEVA, 2025).

Com as medições foi possível criar o diagrama unifilar com as medições *online* das principais grandezas elétricas, conforme a Figura 03.

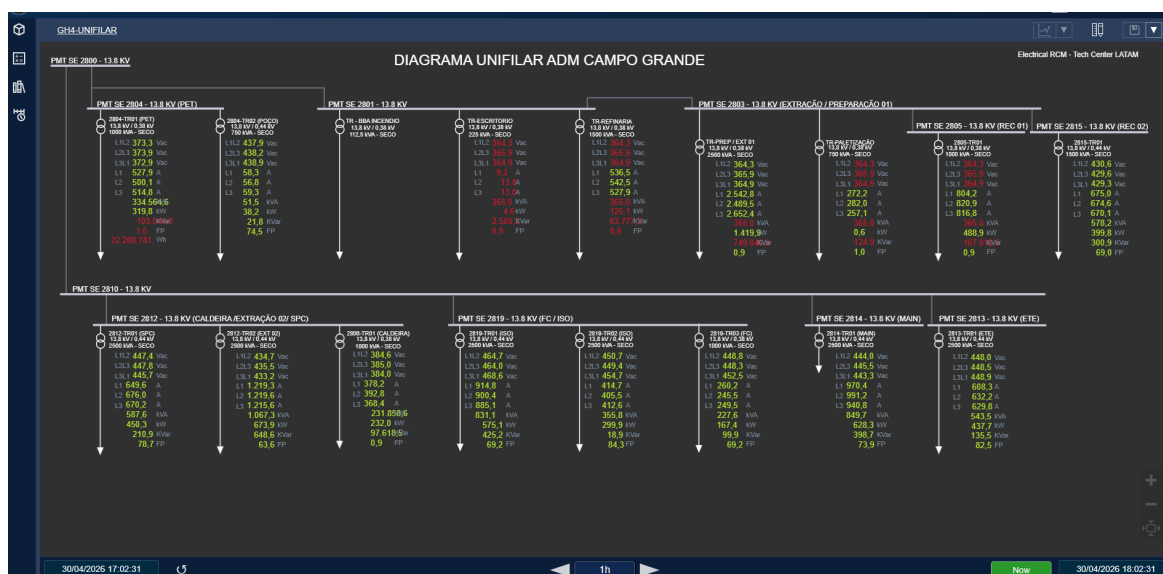


Figura 3. Tela do PI Vision do Diagrama Unifilar da planta em estudo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A escolha da plataforma se deve às licenças já ativas na unidade industrial em estudo e pela facilidade e funcionalidade do sistema. Com as medições em tempo real foi possível determinar as áreas com maior potencial de ganho energético, (Recebimento 01 e Preparação 01), pois possuem os motores mais antigos e com a menor média de rendimento dos motores.

Seleção do setor e dos motores analisados

Com base na análise preliminar do inventário, as áreas de Recebimento 01 e Preparação 01 foram identificadas como aquelas com maior potencial de

melhoria, por concentrarem motores mais antigos e com menor média de rendimento estimado.

O setor Preparação 01 foi selecionado como foco principal do estudo por apresentar o menor fator de potência medido, da ordem de 0,68 a plena carga na condição sem banco de capacitores, indicando baixa utilização da potência instalada e presença significativa de potência reativa.

No setor Preparação 01 foram contabilizados 79 motores, dos quais foram selecionados para análise detalhada aqueles na faixa de 5 a 200 cv, totalizando 41 motores, conforme apresentado na Tabela 2.

A escolha dessa faixa de potência se deu por representarem a maior parcela da demanda de potência do setor e por oferecerem maior impacto potencial em termos de redução de consumo e de demanda quando submetidos a ações de redimensionamento e substituição por motores mais eficientes

Tabela 2. Distribuição por Potência.

Rótulos de Linha	Contagem de POTÊNCIA (cv)
5	2
6	1
7,5	2
10	3
12,5	1
15	4
20	6
25	7
40	2
50	1
60	2
75	2
125	7
200	1
Total Geral	41

Fonte: Elaboração própria (2026).

Instrumentação e procedimentos de medição

As medições elétricas foram realizadas em regime normal de operação dos processos, com a planta operando em condições representativas de carga, de modo a refletir o comportamento típico dos motores ao longo da jornada produtiva.

As leituras foram efetuadas diretamente nos Centros de Controle de Motores (CCMs), onde estão concentrados os circuitos de alimentação dos equipamentos do setor Preparação 01.

Para a medição das correntes elétricas de linha utilizou-se um alicate amperímetro True RMS modelo Fluke 305, adequado para medições em sistemas trifásicos industriais.

Além das correntes, foram obtidos dados de fator de potência por meio dos *Power Monitors 500*, instalados nos CCMs, permitindo avaliar a utilização da potência ativa e a magnitude da potência reativa associada às cargas motrizes.

As medições foram registradas em planilhas eletrônicas para posterior tratamento, buscando-se abranger diferentes equipamentos dentro do setor e evitar leituras em situações transitórias (partidas ou paradas).

Métodos indiretos baseados na medição de corrente e fator de potência são amplamente empregados em auditorias energéticas para estimar o carregamento e o rendimento de motores de indução, conforme

discutido por Campana *et al.* (2010) e Santos e Miyamoto (2024).

Tratamento dos dados e indicadores calculados

A partir das correntes medidas e das informações de placa dos motores, foi estimado o nível de carregamento de cada máquina. O percentual de carga (*Carga*) foi determinado pela razão entre a corrente medida em operação (I_{medida}) e a corrente nominal de placa ($I_{nominal}$), conforme a Equação 1:

$$Carga(\%) = \frac{I_{medida}}{I_{nominal}} \quad (1)$$

Com base nesse indicador, os motores foram classificados quanto ao seu regime de carregamento, considerando-se como subcarregados aqueles operando com menos de 75% da carga nominal, em alinhamento com recomendações presentes na literatura de auditorias energéticas.

Dos 41 motores avaliados, 29 operavam abaixo de 75% de carga, com destaque para os motores de 125 cv dos laminadores, que apresentaram carregamento entre 60 e 65%, evidenciando sobredimensionamento e potencial de otimização.

Adicionalmente, foram estimados a potência ativa demandada e a potência reativa associada, a partir das correntes e dos fatores de potência medidos, bem como a potência aparente, permitindo caracterizar o impacto de cada motor na demanda total do setor.

Para fins de comparação entre os cenários anterior e posterior à implementação das ações propostas, foram calculadas as potências totais instaladas e requeridas, expressas em cv e posteriormente convertidas para kW, utilizando-se o fator de conversão 0,736.

Redimensionamento e seleção de motores de maior eficiência

Com base no diagnóstico de carregamento, foram propostas ações de adequação que envolveram o redimensionamento dos motores subcarregados e a substituição por equipamentos de maior eficiência energética, enquadrados nas classes IE3 ou IE4, conforme as normas IEC 60034-30-1 e NBR 17094.

A seleção dos novos motores considerou critérios técnicos e econômicos, tais como perfil de carga, regime de operação, criticidade do equipamento no processo e viabilidade de investimento.

Para cada motor analisado, calculou-se a potência requerida com base no carregamento real e no rendimento do equipamento existente. Em seguida, estimou-se a nova potência necessária (P_{nova}) a partir da relação entre a potência efetivamente demandada e o rendimento previsto para o motor de alta

eficiência (Equação 2). Para os casos analisados, adotou-se rendimento típico de 91,5% para motores WEG W22 IR3 Premium, conforme especificado nos catálogos do fabricante.

$$P_{nova} = \frac{P_{requerida}}{\eta} \quad (2)$$

A partir de P_{nova} , definiu-se a potência comercial sugerida, selecionando-se o valor comercial imediatamente superior disponível na faixa de mercado, conforme apresentado na tabela de redimensionamento dos motores do setor Preparação 01.

A aplicação desse procedimento resultou em uma redução total estimada de 414,5 cv na potência instalada do conjunto de motores analisado, o que corresponde a aproximadamente 304,86 kW, conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Redimensionamento dos motores.

POTÊNCIA ATUAL (CV)	Nova Potência Estimada	Potência Comercial Sugerida
15	13,5	15
40	18,6	20
25	11,2	12,5
10	7,3	7,5
12,5	4,5	5
20	9,8	10
75	64,2	75
25	21,6	25
25	23,2	25
25	21,3	25
25	23,4	25
25	21,2	25
25	20,3	25
5	4,7	5
20	12,6	15
60	39,8	40
20	11,6	12,5
15	12,8	15
60	41	50
40	18,6	20
50	28,9	30
75	26,8	30
7,5	3,6	5
10	4,2	5
5	1,6	3
7,5	5,2	7,5
6	5,6	6
10	4,5	5
15	6,7	7,5
200	162,8	175
125	87,7	100
125	60,7	100
125	80,8	100
125	80,8	100
125	70,2	100
125	81	100
125	77,4	100
20	15,1	20
20	13,4	15
15	12,6	15
20	11,7	12,5
1903,5	414,5	1489

Fonte: Elaboração própria (2026).

Essa redução representa o potencial de otimização decorrente do ajuste de potência e da substituição por motores mais eficientes, mantendo-se a capacidade operacional necessária e respeitando margens adequadas para variações de carga e condições de partida.

Estimativa do potencial de economia de energia

A partir da diferença entre a potência demandada antes e após o redimensionamento, foi possível estimar o potencial de redução da demanda do sistema motriz, a diminuição da carga alocada no transformador e a redução da energia reativa do setor Preparação 01. Considerando-se as horas anuais de operação do setor e a tarifa de energia elétrica vigente, foi possível determinar a economia específica de energia (kWh/ano) e o consequente impacto econômico, de acordo com as Equações 3 a 16.

Parâmetros elétricos assumidos para todos os motores:

1. Conversão mecânica: 1 cv = 0,7355 kW.
2. Rendimento Médio do conjunto: $\eta = 0,88$.
3. Fator de potência: $\cos\phi = 0,85$.
4. Tarifa de Energia: R\$0,40 (Tarifa média em 2025)
5. 345 dias em operação 24h
6. Percentual de carga atual 70%
7. Percentual de carga proposto 85%

Potência Elétrica Ativa Inicial (kW)

$$P_{A,i} = P_{M,i} * 0,7355 \quad (3)$$

$$P_{A,i} = 1903,5 * 0,7355 = 1400,02 \text{ kW}$$

Potência Elétrica Ativa Sugerida (kW)

$$P_{A,s} = P_{M,s} * 0,7355 \quad (4)$$

$$P_{A,s} = 1489 * 0,7355 = 1.095,15 \text{ kW}$$

Potência Elétrica Aparente Nominal Inicial (kVA)

$$S_i = \frac{P_{A,i}}{\cos\phi} \quad (5)$$

$$S_i = \frac{1400,02}{0,85} = 1647,08 \text{ kVA}$$

Potência Elétrica Aparente Nominal Sugerida (kVA)

$$S_s = \frac{P_{A,s}}{\cos\phi} \quad (6)$$

$$S_s = \frac{1095,15}{0,85} = 1288,41 \text{ kVA}$$

Potência Reativa Inicial (kVAR)

$$Q_i = \sqrt{S_i^2 - P_{A,i}^2} \quad (7)$$

$$Q_i = \sqrt{1647,08^2 - 1400,02^2} = 867,65 \text{ kVAR}$$

Potência Reativa Sugerida (kVar)

$$Q_s = \sqrt{S_s^2 - P_{A,s}^2} \quad (8)$$

$$Q_s = \sqrt{1288,41^2 - 1095,15^2} = 678,7 \text{ kVar}$$

Energia consumida inicial (kWh)

$$E_i = P_{A,i} * \text{Horas de uso} * \text{dias por ano} \quad (9)$$

$$E_i = 1400,02 * 24 * 345$$

$$E_i = 11.592.165,65 \text{ kWh/ano}$$

Considerando a carga real desse conjunto em 70% de utilização, tem-se:

$$E_i = 11.592.165,65 * 0,70 \quad (10)$$

$$E_i = 8.114.516 \text{ kWh/ano}$$

Energia consumida sugerida (kWh)

$$E_s = P_{A,s} * \text{Horas de uso} * \text{dias por ano} \quad (11)$$

$$E_s = 1095,15 * 24 * 345 = 9.067.842,00 \text{ kWh/ano}$$

Considerando a carga real desse conjunto em 85% de utilização (início do ponto ótimo de utilização, conforme WEG, 2020) tem-se:

$$E_s = 9.067.842,00 * 0,85 \quad (12)$$

$$E_s = 7.707.666 \text{ KWH/ano}$$

As Equações 13 a 16 apresentam as reduções esperadas de potência e energia.

$$\Delta P = P_{A,i} - P_{A,s} = 304,87 \text{ kW} \quad (13)$$

$$\Delta S = S_i - S_s = 358,67 \text{ kVA} \quad (14)$$

$$\Delta Q = Q_i - Q_s = 188,94 \text{ kVar} \quad (15)$$

$$\Delta E = E_i - E_s = 406.850,3 \text{ kWh/ano} \quad (16)$$

Economia anual Financeira projetada (Equação 17)

$$406.850,3 * 0,40 = \text{R\$ } 162.740,1 \quad (17)$$

Análise de Payback simples (Equação 18)

$$\text{Payback (anos)} = \frac{\text{Investimento inicial}}{\text{Economia anual}} \quad (18)$$

$$\text{PayBack(anos)} = \frac{723.930,26}{162.740,1} = 4,44 \text{ anos}$$

Para levantamento do investimento necessário para a aquisição dos motores foi realizado orçamento com o representante da empresa WEG, que possui contrato com a empresa em estudo. Os dados são apresentados na Tabela 04.

Tabela 4. Orçamento para aquisição dos motores.

POTÊNCIA ATUAL (cv)	Nova Potência Estimada	Potência Comercial Sugerida	Custo de mercado do motor
15	13,5	15	-
40	18,6	20	R\$ 12.600,00
25	11,2	12,5	R\$ 8.243,99
10	7,3	7,5	R\$ 5.291,99
12,5	4,5	5	R\$ 3.995,99
20	9,8	10	R\$ 7.827,39
75	64,2	75	-
25	21,6	25	-
25	23,2	25	-
25	21,3	25	-
25	23,4	25	-
25	21,2	25	-
25	20,3	25	-
5	4,7	5	R\$ 3.995,99
20	12,6	15	R\$ 8.783,99
60	39,8	40	R\$ 25.920,00
20	11,6	12,5	R\$ 8.243,99
15	12,8	15	-
60	41	50	R\$ 28.620,00
40	18,6	20	R\$ 12.600,00
50	28,9	30	R\$ 20.430,00
75	26,8	30	R\$ 20.430,00
7,5	3,6	5	R\$ 3.995,99
10	4,2	5	R\$ 3.995,99
5	1,6	3	R\$ 2.978,99
7,5	5,2	7,5	-
6	5,6	6	-
10	4,5	5	R\$ 3.995,99
15	6,7	7,5	R\$ 5.291,99
200	162,8	175	R\$ 116.460,00
125	87,7	100	R\$ 55.800,00
125	60,7	100	R\$ 55.800,00
125	80,8	100	R\$ 55.800,00
125	80,8	100	R\$ 55.800,00
125	70,2	100	R\$ 55.800,00
125	81	100	R\$ 55.800,00
125	77,4	100	R\$ 55.800,00
20	15,1	20	R\$ 12.600,00
20	13,4	15	R\$ 8.783,99
15	12,6	15	-
20	11,7	12,5	R\$ 8.243,99
1903,5		1489	R\$ 723.930,26

Fonte: Elaboração própria (2026).



Obs.: Os motores que não apresentam custo são os que não serão substituídos, pois a redução de potência não é significante.

Análise dos resultados

A aplicação da metodologia proposta permitiu enxergar, com maior clareza, como os sistemas motrizes contribuem para o desempenho energético global da planta e onde, de fato, se concentram as principais ineficiências.

O inventário detalhado evidenciou a predominância de motores de indução trifásicos, muitos deles operando sistematicamente abaixo de 60% da carga nominal, situação típica de sobredimensionamento e uso pouco racional da potência instalada.

As medições de corrente e fator de potência, realizadas em condições representativas de operação, confirmaram esse quadro, apontando para um uso pouco eficiente da energia elétrica e para perdas associadas ao regime de subcarga, em consonância com o que vem sendo descrito na literatura especializada.

No setor Preparação 01, selecionado como foco do estudo por apresentar o menor fator de potência medido (em torno de 0,68 a plena carga na condição sem banco de capacitores), a análise de 41 motores na faixa de 5 a 200 cv revelou que 29 deles operavam abaixo de 75% da carga nominal. Entre esses, destacam-se os motores de 125 cv dos laminadores, com carregamento entre 60% e 65%, ilustrando de forma emblemática o impacto do sobredimensionamento na queda de rendimento e de fator de potência.

Essa condição reforça a importância de alinhar a potência instalada ao perfil real de carga do processo, em vez de recorrer a margens excessivas que, na prática, se traduzem em desperdício de energia.

A partir desse diagnóstico, foram propostas ações de redimensionamento e substituição por motores de maior eficiência (classes IE3 e IE4), utilizando parâmetros de rendimento típicos para motores WEG W22 IR3 Premium, da ordem de 91,5%.

O procedimento considerou o cálculo da potência requerida em função do carregamento real e do rendimento dos motores existentes, seguido da definição de uma nova potência comercial sugerida, sempre respeitando margens adequadas para variações de carga e condições de partida.

Esse processo resultou em uma redução total estimada de 414,5 cv na potência instalada do conjunto analisado, equivalente a aproximadamente 304,87 kW, conforme sintetizado na Tabela 3.

Do ponto de vista elétrico, a readequação da potência instalada implicou uma queda expressiva na potência

ativa demandada, que passaria de cerca de 1.400,02 kW para 1.095,15 kW. De forma análoga, a potência aparente seria reduzida de 1.647,08 kVA para 1.288,41 kVA, ao mesmo tempo em que a potência reativa diminuiria de 867,65 kVAr para 678,7 kVAr.

Para os conjuntos avaliados projetam-se reduções de 304,87 kW em potência ativa, 358,67 kVA em potência aparente e 188,94 kVAr em potência reativa, o que evidencia não apenas a diminuição do consumo, mas também um uso mais equilibrado da infraestrutura elétrica, incluindo transformadores e sistemas de compensação de reativos.

Quando esses resultados são convertidos em energia ao longo do ano, considerando 345 dias de operação em regime contínuo (24 h) e a utilização média de 70% da carga para a condição atual, obtém-se um consumo anual de aproximadamente 8.114.516 kWh.

Para o cenário proposto, com os motores redimensionados e operando próximos a 85% de carga (início da região de melhor aproveitamento, conforme referência de catálogos de fabricantes), a energia anual estimada é de cerca de 7.707.666 kWh.

A diferença entre esses dois cenários indicou um potencial de redução de consumo da ordem de 406.850,3 kWh/ano. Embora esse valor apresente expressividade limitada, ele corresponde a um único setor e tende a tornar-se mais relevante quando seus efeitos são considerados ao longo da vida útil dos equipamentos.

Em termos econômicos, a economia anual de energia, considerando uma tarifa média de 0,40 R\$/kWh, resulta em um benefício financeiro estimado em aproximadamente R\$ 162.740,10 por ano.

O investimento necessário para a aquisição dos novos motores, conforme orçamento obtido junto a representante WEG (contratada da unidade estudada), totalizou R\$ 723.930,26.

A partir desses valores, foi previsto um *payback* simples em torno de 4,44 anos, o que, para o contexto industrial e para a vida útil típica de motores de indução, pode ser considerado um prazo competitivo limitado, mas quando se incluem benefícios indiretos, como a redução de paradas não programadas e aumento da confiabilidade sua viabilidade é potencializada.

Além dos ganhos quantificáveis, os resultados sinalizam impactos qualitativos importantes. A operação com motores adequadamente dimensionados tende a reduzir o aquecimento excessivo, as vibrações e o esforço mecânico desnecessário, contribuindo para prolongar a vida útil dos equipamentos e minimizar custos de manutenção.

Do mesmo modo, a melhoria do fator de potência e a redução da potência reativa aliviam o carregamento



do sistema elétrico interno, o que abre espaço para futuras expansões ou para a integração de novas cargas sem necessidade imediata de reforços de infraestrutura.

Outro aspecto relevante é a sinergia com as tecnologias associadas à Indústria 4.0 já presentes na planta, como o uso de medidores PowerMonitor 500 EtherNet/IP e a plataforma AVEVA PI Vision para monitoramento em tempo real.

Esses recursos permitem visualizar o comportamento das grandezas elétricas ao longo da operação, facilitando a identificação de setores críticos (como Recebimento 01 e Preparação 01) e a priorização de ações de eficiência. Ao se integrar o diagnóstico energético com sistemas de supervisão e histórico de dados, cria-se um ambiente propício para a evolução rumo a estratégias mais avançadas, como manutenção preditiva, gêmeos digitais e uso de inteligência artificial para otimização contínua.

Apesar dos resultados positivos, é importante reconhecer as limitações inerentes à abordagem adotada. O uso de métodos indiretos de estimação de carregamento, baseados em corrente e fator de potência, está sujeito a incertezas associadas a variações operacionais, condições de alimentação e características específicas de cada motor.

Ainda assim, quando aplicados de forma sistemática e combinados com dados de campo e conhecimento do processo, esses métodos se mostram suficientemente robustos para subsidiar decisões de redimensionamento e substituição de equipamentos.

Em síntese, os resultados demonstram que a otimização do dimensionamento de motores, aliada à substituição por máquinas de maior eficiência, constitui uma estratégia eficaz para reduzir o consumo de energia elétrica, melhorar indicadores elétricos e elevar o desempenho global do sistema motriz.

No contexto da planta analisada, essa estratégia mostra-se tecnicamente consistente, economicamente atrativa e totalmente alinhada às diretrizes de transição energética, competitividade industrial e integração com soluções digitais emergentes.

CONCLUSÃO

O estudo realizado em uma planta de extração de óleo vegetal evidenciou, de forma clara, que o sobredimensionamento e a operação em regime de subcarga de motores de indução constituem fontes relevantes de ineficiência energética no ambiente industrial.

A análise detalhada do setor Preparação 01 mostrou que grande parte dos motores operava abaixo de 75% da carga nominal, comprometendo o rendimento, o fator de potência e, consequentemente, elevando o

consumo de energia e o carregamento do sistema elétrico.

A aplicação da metodologia proposta, baseada no inventário do parque motriz, em medições em campo e em métodos indiretos de estimação de carregamento, permitiu identificar, de maneira estruturada, os equipamentos com maior potencial de otimização e propor ações de redimensionamento e substituição por motores de maior eficiência (IE3 e IE4).

Como resultado, estimou-se uma redução de aproximadamente 414,5 cv na potência instalada e cerca de 304,87 kW na potência ativa demandada, com impacto direto em indicadores como potência aparente, potência reativa e fator de potência.

Em termos energéticos, o cenário proposto indica um potencial de economia anual de cerca de 406.850,3 kWh, o que se traduz em uma economia financeira estimada de R\$ 162.740,10 por ano, considerando a tarifa média de energia adotada.

Diante de um investimento de aproximadamente R\$ 723.930,26 na aquisição de novos motores, o payback simples calculado em torno de 4,44 anos reforça a viabilidade econômica das ações sugeridas, sobretudo quando considerados os benefícios adicionais em confiabilidade, redução de manutenções e prolongamento da vida útil dos equipamentos.

Do ponto de vista da gestão energética, os resultados confirmam que a combinação entre diagnóstico detalhado, uso de dados de operação em tempo real e critérios técnicos claros para redimensionamento tende a elevar o nível de maturidade da planta em relação à eficiência energética. Ao integrar esses esforços com ferramentas típicas da Indústria 4.0, como sistemas de supervisão avançados, historiadores de dados e plataformas de visualização, ampliam-se as condições para uma gestão contínua, dinâmica e orientada por dados, que favorece ganhos adicionais ao longo do tempo.

Por fim, o trabalho reforça que a otimização de sistemas motrizes não deve ser vista apenas como uma ação pontual de engenharia, mas como parte de uma estratégia mais ampla de sustentabilidade e competitividade industrial.

A adoção de abordagens estruturadas, tecnicamente fundamentadas e suportadas por dados concretos mostra-se essencial para alinhar a operação industrial às metas de eficiência energética, redução de emissões e atendimento às diretrizes dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, em especial aqueles relacionados à energia limpa, inovação e ação climática.



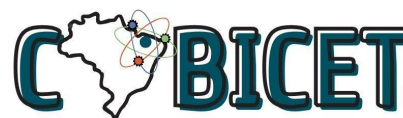
Nesse sentido, a experiência aqui relatada pode servir de referência para iniciativas similares em outros segmentos industriais, contribuindo para a consolidação de uma cultura de uso mais racional e inteligente da energia elétrica em sistemas motrizes.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (Capes) - Código de Financiamento 001, e da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC – Brasil.

REFERÊNCIAS

- ABINEE — ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA. Relatório do setor elétrico e eletrônico. São Paulo: ABINEE, 2022.
- AGUIAR, V. P. B.; PONTES, R. S. T.; FERREIRA, F. J. T. E. *Technical and economic evaluation of efficiency improvement after rewinding in low-power induction motors: a Brazilian case*. Energies, Basel, v. 11, n. 7, p. 1701, jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en11071701>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- AVEVA. *The data maturity advantage: a practical guide to unlocking operational insights*. Cambridge: AVEVA, 2025. E-book. Disponível em: <https://discover.aveva.com/product-pi-system/ebook-the-data-maturity-advantage-a-practical-guide-to-unlocking-operational-insights>. Acesso em: 29 abr. 2026
- AGUIAR, V. P. B.; NASCIMENTO, F.; PONTES, R. S. T.; CORREIA, W.; FERREIRA, F. J. T. E. *Economic analysis of retrofitting electric motors with a rewinding process to partial loads*. In: IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION (ECCE), 2022, Detroit. Proceedings [...]. Piscataway: IEEE, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ECCE50734.2022.9947999>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- ALMEIDA, A. T.; FERREIRA, F. J. T. E.; DUARTE, A. Q. *Electric motor systems: energy efficiency, technology and applications*. 2. ed. Cham: Springer, 2021.
- BAZIGU, A.; MWEBAZE, J. *A framework for IoT-enabled smart manufacturing for energy and resource optimization*. arXiv preprint arXiv:2502.03040, 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2502.03040>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- BORTONI, E. C. *Motor oversizing outlook*. 2007. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/62320d79653bae0fbf4e51a101b18a1ec8808cc4>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- CAGNO, E.; ACCORDINI, D.; THOLLANDER, P.; ANDREI, M.; HASAN, A. M.; PESSINA, S.; TRIANNI, A. *Energy management and Industry 4.0: analysis of the enabling effects of digitalization on the implementation of energy management practices*. Applied Energy, Amsterdam, v. 392, p. 125877, jul. 2025. DOI: 10.1016/j.apenergy.2025.125877. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125877>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- EPE — EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço energético nacional 2023: ano base 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2023.
- EPE — EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Eficiência energética na indústria brasileira: estudos setoriais. Rio de Janeiro: EPE, 2024.
- EPE — EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço energético nacional 2025: ano base 2024. Rio de Janeiro: EPE, 2025.
- FERREIRA, D.; NOVAES, C. Análise da viabilidade econômica da substituição de motores elétricos de uma indústria de embalagens plásticas. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 38., 2018, Maceió. Anais [...]. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.14488/ENEGEP2018_TN_STO_260_492_36549. Acesso em: 26 abr. 2026.
- FERREIRA, F. J. T. E.; ALMEIDA, A. T. *Considerations on in-field induction motor load estimation methods*. In: International Conference On Electrical Machines (ICEM), 18., 2008, Vilamoura. Proceedings [...]. Piscataway: IEEE, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2008.4799925>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- FERREIRA, F. J. T. E.; CISNEROS-GONZALEZ, M.; ALMEIDA, A. T. Technical and economic considerations on induction motor oversizing. Energy Efficiency, Dordrecht, v. 9, n. 6, p. 1395-1408, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12053-015-9345-3>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- FREITAS, R. R.; VIANNA, V. W.; CELESTE, W. C. Energy efficiency in the context of Industry 4.0. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, [s. l.], v. 6, n. 12, p. 1-7, dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.22161/ijaers.612.1>. Acesso em: 26 abr. 2026.



- FULLER, A.; FAN, Z.; DAY, C.; BARLOW, C. Digital twin: enabling technologies, challenges and open research. IEEE Access, Piscataway, v. 8, p. 108952-108971, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- GÓMEZ, J. R.; QUISPE, E. C.; CASTRILLÓN, R.; VIEGO, P. R. Identification of technoeconomic opportunities with the use of premium efficiency motors as alternative for developing countries. Energies, Basel, v. 13, n. 20, p. 5411, out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13205411>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- GÓMEZ, J. R.; SOUSA, V.; ERAS, J. J. C.; GUTIÉRREZ, A. S.; VIEGO, P. R.; QUISPE, E. C.; LEON, G. D. Assessment criteria of the feasibility of replacement standard efficiency electric motors with high-efficiency motors. Energy, Amsterdam, v. 239, p. 121877, jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121877>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- IEA — INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy efficiency 2022. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- IEA — INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy efficiency 2024. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2024>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- INTRONA, V.; SANTOLAMAZZA, A.; CESAROTTI, V. Integrating Industry 4.0 and 5.0 innovations for enhanced energy management systems. Energies, Basel, v. 17, n. 5, p. 1222, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17051222>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- IRENA — INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Energy efficiency and renewable energy outlook. Abu Dhabi: IRENA, 2023.
- JANNUZZI, G. M. Políticas públicas para eficiência energética no Brasil. Campinas: Unicamp, 2015.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; JIN, C. Introduction to cyber manufacturing. Manufacturing Letters, Amsterdam, v. 8, p. 11-15, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2016.11.011>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- McKINSEY & COMPANY. The case for digital energy efficiency. New York: McKinsey, 2022.
- MIRANI, A. A.; AWASTHI, A.; WALSH, J.; O'MAHONY, N. Industrial IoT-based energy monitoring system: using data processing at edge. IoT, Basel, v. 5, n. 4, p. 27, set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/iot5040027>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- MORAIS, L.; NEUMANN, R. Barreiras para eficiência energética na indústria brasileira. Revista Brasileira de Energia, Itajubá, v. 17, n. 2, p. 45-62, 2011.
- PHUTANE, P. S.; CHAVAN, S. L.; PAWAR, H.; MANE, S.; BARDE, V. Digital twin innovations for induction motor monitoring and predictive maintenance: a 2020-2025 review. Nexus Research, Amsterdam, v. 4, p. 100969, out. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100969>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- PINHEIRO, V.; GOMES, L. C.; OLIVEIRA, C. A. Plataforma experimental para análise do rendimento de motores de indução trifásicos por meio de ensaios específicos recomendados na norma técnica NBR17094-3:2018. ForScience, Formiga, v. 7, n. 2, e633, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.29069/forscience.2019v7n2.e633>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- PROCEL — PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Relatório de resultados PROCEL 2024: ano base 2023. Rio de Janeiro: Eletrobras/PROCEL, 2024.
- ROLDAN-FERNANDEZ, J.; SEMIÃO, J.; BURGOS-PAYÁN, M.; PARAMO-BALSA, P. Estimation of power output and efficiency of induction motors: a new non-intrusive approach. Sensors, Basel, v. 25, n. 3, p. 754, jan. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s25030754>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- SAIDUR, R. A review on electrical motors energy use and energy savings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Amsterdam, v. 14, n. 3, p. 877-898, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.018>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- SANTOS, J. F.; TSHOOMBE, B. K.; SANTOS, L. H. B.; ARAÚJO, R. C. F.; MANITO, A. R. A.; FONSECA, W. S.; SILVA, M. O. Digital twin-based monitoring system of induction motors using IoT sensors and thermo-magnetic finite element analysis. IEEE Access, Piscataway, v. 11, p. 1431-1444, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3232063>. Acesso em: 26 abr. 2026.



- SCHWAB, K. A quarta revolução industrial. Tradução de Daniel Moreira Miranda. São Paulo: Edipro, 2016.
- SEGUN-FALADE, O. D.; OSUNDARE, O. S.; KEDI, W. E.; OKELEKE, P. A.; IJOMAH, T. I.; ABDUL-AZEEZ, O. Y. Developing innovative software solutions for effective energy management systems in industry. *Engineering Science & Technology Journal*, [s. l.], v. 5, n. 8, p. 2487-2510, ago. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.51594/estj.v5i8.1517>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- SILVA, J. V. S.; VASCONCELLOS, K. R.; FERRAZ, R. S. C. Eficiência energética: planejamento de conservação de energia nas empresas. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, São Paulo, v. 9, n. 5, p. 1-15, maio, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.51891/rease.v9i5.9664>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- SINGH, R. R.; BHATTI, G.; KALEL, D.; VAIRAVASUNDARAM, I.; ALSAIF, F. Building a digital twin powered intelligent predictive maintenance system for industrial AC machines. *Machines*, Basel, v. 11, n. 8, p. 796, ago. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/machines11080796>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- SOLA, A. V. H.; MOTA, C. M. M. Melhoria da eficiência energética em sistemas motrizes industriais. *Production*, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 498-509, jul./set. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-6513.063311>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- SOUZA, D. F.; SAUER, I. L.; DORILEO, I. L.; TATIZAWA, H. Eficiência energética em sistemas motrizes e as novas tecnologias no contexto da transição energética. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, [s. l.], v. 14, n. 3, mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/rcssv14n3-013>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- TAO, F.; ZHANG, H.; LIU, A.; NEE, A. Y. C. Digital twin in industry: state-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Piscataway, v. 15, n. 4, p. 2405-2415, abr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- TOLBERT, C. L. Leveraging variable frequency drive data for nondestructive testing and predictive maintenance in industrial systems. *NDT*, Basel, v. 3, n. 2, p. 7, mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ndt3020007>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- WAIDE, P.; BRUNNER, C. U. Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems. Paris: IEA, 2011.
- WANG, L.; LI, X.; ZHANG, Y. Energy optimization in industrial motor systems using smart technologies. *Applied Energy*, Amsterdam, v. 335, p. 120135, abr. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120135>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- WORLD ECONOMIC FORUM. Shaping the future of advanced manufacturing and production. Geneva: WEF, 2023.
- YURTAY, Y. Carbon footprint management with Industry 4.0 technologies and ERP systems in sustainable manufacturing. *Applied Sciences*, Basel, v. 15, n. 1, p. 480, jan. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app15010480>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- ZHANG, Y.; CHEN, X.; LIU, J. Machine learning-based energy optimization in industrial systems. *Energy Reports*, Amsterdam, v. 9, p. 1200-1212, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.123>. Acesso em: 26 abr. 2026.