

## EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INOVAÇÕES EM RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS INDUSTRIAIS: COMPARATIVO DE TECNOLOGIAS, ESTUDOS DE CASO E ESTRATÉGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS

ENERGY EFFICIENCY AND INNOVATIONS IN INDUSTRIAL ELECTRIC HEATING ELEMENTS: TECHNOLOGY COMPARISON, CASE STUDIES, AND STRATEGIES FOR PROCESS OPTIMIZATION

EFICIENCIA ENERGÉTICA E INNOVACIONES EN RESISTENCIAS ELÉCTRICAS INDUSTRIALES: COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS, ESTUDIOS DE CASO Y ESTRATEGIAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS

Andre Luiz Bernardino dos Passos<sup>1</sup>

**RESUMO:** Esta publicação apresenta um estudo aprofundado sobre a eficiência, aplicações e inovações tecnológicas em resistências elétricas industriais, com foco em injetoras e extrusoras plásticas, bem como em equipamentos gastronômicos de alta performance. A pesquisa combina levantamento bibliográfico, análise comparativa de tecnologias (mica, cerâmica, infravermelho e bainha tubular), estudo de casos reais no Brasil e nos Estados Unidos, e simulações de economia energética. São discutidos os principais problemas de eficiência na indústria, perdas por condução, convecção e radiação, e propostas soluções técnicas para sua mitigação. O trabalho inclui cálculos de potência térmica, tabelas de desempenho, projeções de economia, análise de payback e implicações estratégicas para a competitividade industrial. Os resultados indicam que a modernização dos elementos de aquecimento pode gerar reduções de consumo de até 18%, aumentar a vida útil dos componentes e melhorar a qualidade do produto final, tornando-se uma estratégia essencial para indústrias que buscam sustentabilidade e alto desempenho operacional.

1671

**Palavras-chave:** Resistências Elétricas. Eficiência Energética. Processos Industriais. Inovação Tecnológica. Otimização de Processos.

**ABSTRACT:** This article presents an in-depth study on the efficiency, applications, and technological innovations of industrial electric heating elements, focusing on plastic injection molding machines, extruders, and high-performance gastronomic equipment. The research combines a literature review, comparative analysis of technologies (mica, ceramic, infrared, and tubular sheath), real-world case studies from Brazil and the United States, and energy-saving simulations. Key industrial efficiency problems—such as losses through conduction, convection, and radiation—are discussed, and technical solutions for their mitigation are proposed. The study includes thermal power calculations, performance tables, economic projections, payback analysis, and strategic implications for industrial competitiveness. Results indicate that modernizing heating elements can reduce energy consumption by up to 18%, increase component lifespan, and improve product quality, making it an essential strategy for industries seeking sustainability and high operational performance.

**Keywords:** Electric Heating Elements. Energy Efficiency. Industrial Processes. Technological Innovation. Process Optimization.

<sup>1</sup>Pesquisador e autor independente, com atuação voltada à análise, desenvolvimento e documentação de soluções técnicas nas áreas de automação, controle térmico e sistemas industriais.

**RESUMEN:** Este artículo presenta un estudio exhaustivo sobre la eficiencia, las aplicaciones y las innovaciones tecnológicas en resistencias eléctricas industriales, con enfoque en inyectoras y extrusoras plásticas, así como en equipos gastronómicos de alto rendimiento. La investigación combina revisión bibliográfica, análisis comparativo de tecnologías (mica, cerámica, infrarrojo y vaina tubular), estudios de casos reales en Brasil y Estados Unidos, y simulaciones de ahorro energético. Se discuten los principales problemas de eficiencia industrial, como pérdidas por conducción, convección y radiación, y se proponen soluciones técnicas para su mitigación. El estudio incluye cálculos de potencia térmica, tablas de desempeño, proyecciones económicas, análisis de retorno de inversión y consideraciones estratégicas para la competitividad industrial. Los resultados indican que la modernización de las resistencias puede reducir el consumo energético hasta en un 18%, aumentar la vida útil de los componentes y mejorar la calidad del producto, constituyendo una estrategia esencial para las industrias que buscan sostenibilidad y alto rendimiento operativo.

**Palabras clave:** Resistencias Eléctricas. Eficiencia Energética. Procesos Industriales. Innovación Tecnológica. Optimización de Procesos.

## INTRODUÇÃO

O aquecimento elétrico é um elemento central em diversos processos industriais, sendo responsável por transformar energia elétrica em calor de forma controlada e precisa. Em setores como o de transformação plástica — que inclui injetoras e extrusoras — e na indústria gastronômica de larga escala, o desempenho das resistências elétricas influencia diretamente a eficiência energética, a qualidade do produto final e a competitividade das empresas. Apesar de sua ampla utilização, muitas linhas de produção ainda empregam tecnologias obsoletas, como resistências de mica de baixo rendimento, que apresentam perdas térmicas elevadas e vida útil reduzida.

Essas deficiências resultam em custos operacionais mais altos, maior tempo de aquecimento, desperdício energético e aumento da pegada de carbono. Além disso, há uma lacuna significativa na integração de soluções inovadoras — como resistências cerâmicas, infravermelhas e de bainha tubular — em processos industriais já consolidados. A literatura técnica, embora robusta em estudos de eficiência energética em sistemas térmicos, carece de análises comparativas detalhadas que unam dados reais de produção com simulações de economia e cálculos de retorno sobre investimento (ROI).

Este artigo busca preencher essa lacuna ao apresentar uma análise abrangente, combinando estudos de caso reais, comparações de tecnologias, cálculos técnicos e projeções econômicas, com o objetivo de orientar gestores e engenheiros na tomada de decisão sobre modernização de sistemas de aquecimento industrial.

### Breve Histórico das Resistências Elétricas Industriais

O conceito de conversão de energia elétrica em calor por efeito Joule foi descoberto em 1821 pelo físico inglês James Prescott Joule (Joule, 1850), ao demonstrar que a passagem

de corrente elétrica por um condutor gera calor proporcional à resistência elétrica do material. Essa descoberta abriu caminho para a aplicação prática do aquecimento elétrico, mas sua utilização industrial só se tornou viável no final do século XIX, com o desenvolvimento de geradores e redes de distribuição de energia (ASM International, 1990)

### **Final do Século XIX – Primeiras aplicações**

No final dos anos 1880 e início de 1890, surgiram as primeiras resistências elétricas rudimentares, utilizando fios de metais nobres como platina, enrolados em suportes isolantes de porcelana. Essas resistências tinham custo elevado e baixa durabilidade, mas eram ideais para aplicações laboratoriais e alguns processos industriais incipientes, como aquecimento de líquidos e fusão de metais de baixo ponto de fusão.

#### **1900–1920 – A revolução do NiCr**

O desenvolvimento da liga Níquel-Cromo (NiCr) no início do século XX foi um marco. Essa liga apresentava:

- Alta resistividade elétrica;
- Excelente resistência à oxidação em temperaturas elevadas;
- Boa ductilidade para conformação mecânica.

A partir daí, resistências passaram a ser produzidas com fios ou fitas de NiCr enrolados sobre suportes cerâmicos, possibilitando temperaturas de trabalho acima de 1000 °C e longa vida útil.

1673

### **Década de 1930 – Resistências tubulares metálicas**

Na década de 1930, engenheiros desenvolveram o conceito de resistência tubular blindada:

Um fio de NiCr é alojado dentro de um tubo metálico (aço inoxidável, cobre ou Incoloy).

O espaço interno é preenchido com óxido de magnésio (MgO) compactado, que atua como isolante elétrico e condutor térmico.

As extremidades são vedadas para proteção contra umidade e contaminação.

Essa tecnologia permitiu resistências mais seguras, duráveis e adaptáveis a diversas geometrias (retas, curvas, espirais), sendo até hoje largamente utilizada em processos industriais e domésticos.

### **1940–1960 – Expansão industrial e diversificação**

Com a intensificação da produção industrial no pós-guerra, as resistências elétricas se tornaram fundamentais para:

Plásticos e borrachas (injeção, extrusão, termoformagem);

Metalurgia (tratamento térmico, fusão e brasagem);

Indústria alimentar (fornos, fritadeiras, seladoras térmicas).

Nesse período, surgiram as resistências de mica: elementos de NiCr prensados entre lâminas de mica natural, material isolante que oferece alta resistência dielétrica e boa condutividade térmica. Elas se destacaram por aquecimento rápido e facilidade de instalação em superfícies cilíndricas, como cilindros de extrusoras.

### **1960–1980 – Resistências cerâmicas e tecnologias de alta temperatura**

A evolução dos materiais cerâmicos possibilitou resistências com temperaturas de operação superiores a 1200 °C e maior uniformidade térmica.

Resistências de anel cerâmico: comuns em extrusoras e injetoras, com excelente distribuição de calor.

Resistências de cartucho: alta densidade de potência e compactas, ideais para moldes e aquecimento localizado.

1674

### **1980–2000 – Infravermelho e eficiência energética**

Com a crescente demanda por eficiência, surgiram elementos aquecedores baseados em radiação infravermelha (IR), divididos em:

IR curto (aquecimento superficial rápido, usado em termoformagem e secagem de tintas);

IR médio e longo (penetração mais profunda, ideal para secagem de materiais e pré-aquecimento de peças plásticas).

Essa tecnologia reduziu o tempo de aquecimento e o consumo energético em processos intermitentes.

### **2000–Presente – Simulação, customização e sustentabilidade**

Atualmente, a fabricação de resistências elétricas utiliza softwares de simulação térmica por elementos finitos (FEA) para otimizar a distribuição de calor e reduzir perdas.

As tendências incluem:

Uso de ligas avançadas (Kanthal APM, Incoloy 800) com maior resistência à corrosão e fadiga térmica;

Integração com sensores e sistemas de controle inteligente, permitindo ajuste automático de potência e temperatura;

Projetos customizados para cada aplicação, buscando máxima eficiência energética e redução de emissões de CO<sub>2</sub>.

Seguem as diferenças técnicas entre os principais tipos de resistências elétricas industriais

— mica, cerâmica, infravermelho e bainha tubular

## **Tipos de Resistências Elétricas Industriais**

### **1. Resistências de Mica (Mica Band Heaters)**

Composição e construção: Fios de NiCr (níquel-cromo) são dispostos entre finas lâminas de mica, um mineral isolante e flexível que permite fácil adaptação a superfícies cilíndricas, como cilindros de extrusoras.

Faixa de temperatura: Apropriadas para aplicações de temperatura média, operando até aproximadamente 450 °C. 1675

Vantagens: Bom isolamento elétrico, adaptação flexível e custo mais acessível.

Aplicações típicas: Ideal para processo de moldagem por injeção e extrusão plástica, com aquecimento superficial eficiente.

Embora apresentem bom isolamento elétrico e custo acessível, possuem vida útil reduzida e menor eficiência energética em comparação com outras tecnologias (Leite, 2008).

### **2. Resistências Cerâmicas (PTC ou Cerâmicas)**

Tecnologia PTC (Coeficiente de Temperatura Positiva): À medida que a temperatura sobe, a resistência elétrica também aumenta, proporcionando autorregulação e maior segurança.

Faixa de temperatura: Podem operar em temperaturas mais elevadas, frequentemente acima de 750 °C, dependendo do projeto.

Durabilidade e eficiência: Mais robustas e energeticamente eficientes — adequadas para ambientes industriais exigentes.

São indicadas para processos de secagem, fornos industriais e aplicações que demandam controle térmico mais sofisticado (Leite, 2008).

### **Aquecimento por Infravermelho (IR)**

**Princípio de funcionamento:** Transfere calor por radiação eletromagnética, sem necessidade de contato ou meio entre o emissor e o material aquecido.

**Eficiência energética:** Converte até ~86% da energia elétrica em calor útil, dependendo do projeto e da adequação ao material alvo.

#### **Faixas de emissão**

**Infravermelho curto (NIR):** altas temperaturas, com alguma emissão de luz visível.

**Infravermelho médio/faro:** penetração mais profunda, eficiente para plásticos e água/área com curvas de absorção adequadas.

É indicado para aplicações como cura de pinturas, secagem de materiais e processos rápidos em plásticos e alimentos (Fray & Richardson, 1999; Omega Engineering, 2018).

### **3. Resistências de Bainha Tubular (Tubulares ou Calrods)**

**Construção:** Fio resistivo (NiCr ou Kanthal) encapsulado em tubo metálico (aço ou cobre), com isolamento em MgO (óxido de magnésio), selado nas extremidades com cerâmica ou silicone.

**Forma e adaptabilidade:** Podem ser retas ou curvas, molde para diferentes geometrias de aplicação.

**Robustez:** Elevada durabilidade e tolerância mecânica, ideal para aquecimento de líquidos, ar, ou montagem em superfícies metálicas.

**Variedades:** Mesmo conceito aplicado em cartuchos (cartridge), com potência maior por área em formatos cilíndricos inseridos em furos metálicos.

São amplamente utilizadas em aquecimento de líquidos, ar e superfícies metálicas, devido à sua confiabilidade e versatilidade (Watlow, 2015)

## Comparativo Resumido

Tipo de Resistência	Temperatura Máx.	Principais Vantagens	Aplicações Típicas
Mica	~450 °C	Flexível, isolante, custo acessível	Injetoras, extrusoras plásticas
Cerâmica (PTC)	>750 °C	Autoregulação, durável, eficiente	Secagem, fornos, uso industrial geral
Infravermelho (IR)	Variável	Alta eficiência, aquecimento sem contato	Cura, secagem, alimentação, pintura
Bainha Tubular	Alta	Adaptável, robusta, alta densidade de potência	Líquidos, ar, superfícies metálicas

## Principais Problemas de Eficiência na Indústria:

### Perdas por Condução, Convecção e Radiação

#### Perdas por Condução

Ocorre quando há contato direto entre materiais de diferentes temperaturas, transferindo calor da resistência para áreas indesejadas ou menos eficientes — por exemplo, entre o elemento aquecedor metálico e uma estrutura de suporte metálica ou corpo da máquina. A eficiência depende da qualidade do contato superficial e das propriedades térmicas dos materiais envolvidos. (Incropera & DeWitt, 2017)

1677

#### Perdas por Convecção

Ocorrem quando o calor é levado por um fluido (ar ou líquido) que circula ao redor do elemento aquecedor, retirando calor antes que ele atinja o material de interesse. No ambiente industrial, fatores como fluxo de ar, ventilação e convecção natural ou forçada podem intensificar essas perdas. (Perry & Green, 2019)

#### Perdas por Radiação

São perdas de calor por radiação infravermelha, típicas quando há superfície exposta e quentes que irradiam energia para o ambiente. Materiais com alta emissividade (como metais oxidados) irradiam mais calor, tornando-se menos eficientes sem isolamento ou revestimentos refletivos adequados. (Incropera & DeWitt, 2017)

## Fatores Específicos que Aumentam as Perdas

Superfícies não isoladas: como partes metálicas expostas aumentam a perda por todos os três modos (condução, convecção e radiação).

Orientação da superfície: horizontais, verticais e inferiores afetam a taxa de convecção de forma diferente. Ajustes como multiplicadores (1,29 para horizontais; 0,63 para inferiores) são usados em cálculos de perda térmica.

Emissividade dos materiais: superfícies oxidadas emitem mais calor. Isolar ou usar acabamentos polidos/refletivos pode reduzir perdas por radiação.

## Resumo das Principais Perdas Térmicas

As principais perdas de calor em sistemas de aquecimento industrial podem ser classificadas em três modos fundamentais: condução, convecção e radiação. Esses mecanismos, amplamente descritos na literatura de transferência de calor, são determinantes para a eficiência global do processo (Incropera & DeWitt, 2017; Perry & Green, 2019).

## Resumo em Tabela

1678

Modo de Perda	Como Ocorre	Impacto Típico
Condução	Contato direto com massa/metais	Desperdício de calor para estruturas adjacentes
Convecção	Circulação de ar ou fluido quente	Retira calor antes de atingir o produto
Radiação	Emissão infravermelha de superfícies aquecidas	Perda significativa em altas temperaturas

## Por que isso é relevante?

Reduzir essas perdas não é apenas uma questão de economia — também melhora:

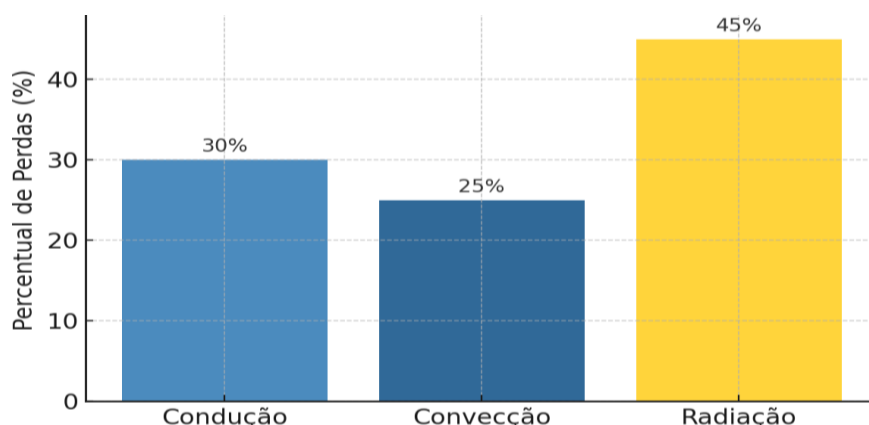
**Precisão térmica e estabilidade de processos**

**Tempo de aquecimento mais eficiente**

**Menor desgaste e maior vida útil das resistências**



## Consistência de qualidade e menor consumo energético



## MÉTODOS

O cálculo da potência térmica necessária em processos industriais segue os princípios fundamentais de transferência de calor por condução, convecção e radiação

(Incropera & DeWitt, 2017).

Esses conceitos foram aplicados em conjunto com equações clássicas de engenharia para estimar perdas energéticas e dimensionar adequadamente os sistemas de aquecimento

1679

(Perry & Green, 2019).

### 1) Cálculo da potência térmica do processo

Potência mínima para elevar a temperatura de um sistema em tempo t:

$$P_{\text{proc}} = Q_{\text{proc}} / t$$

$$Q_{\text{proc}} = (m_{\text{pol}} * c_{\text{pol}} * \Delta T_{\text{pol}}) + (m_{\text{eq}} * c_{\text{eq}} * \Delta T_{\text{eq}}) + (m * L)$$

Onde:

m = massa (kg)

c = calor específico (J/kg°C)

$\Delta T$  = temperatura final - temperatura inicial (°C)

pol = polímero

eq = equipamento (cilindro, cabeçote, matriz)

## 2) Perdas térmicas a compensar

a) Convecção (Lei de Newton)  $Q_{\text{conv}} = h * A * (T_s - T_{\text{amb}})$

$h$  = coeficiente de convecção ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

$A$  = área exposta ( $\text{m}^2$ )

$T_s$  = temperatura da superfície

$T_{\text{amb}}$  = temperatura do ambiente

Radiação (Lei de Stefan-Boltzmann)  $Q_{\text{rad}} = \varepsilon * \sigma * A * (T_s^4 - T_{\text{amb}}^4)$

$\varepsilon$  = emissividade

$\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$

Condução Placa plana:

$Q_{\text{cond}} = k * A * (T_{\text{quente}} - T_{\text{fria}}) / L$  Cilindro:

$Q_{\text{cond}} = 2 * \pi * k * L_c * (T_1 - T_2) / \ln(r_2 / r_1)$

$k$  = condutividade ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ )

$L_c$  = comprimento do cilindro (m)

$r_1$  e  $r_2$  = raios interno e externo (m)

## 3) Potência total requerida

$P_{\text{req}} = (P_{\text{proc}} + Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}} + Q_{\text{cond}}) / \eta_{\text{sist}}$

$\eta_{\text{sist}}$  = rendimento global do sistema (0,85 a 0,95 típico)

$L$  = calor latente ( $\text{J}/\text{kg}$ ), se houver mudança de fase

## 4) Exemplo numérico – Extrusora

Objetivo: Aquecer 50 kg de polímero de  $25^\circ\text{C}$  para  $225^\circ\text{C}$  em 10 min ( $t = 600 \text{ s}$ ). Dados:

$m_{\text{pol}} = 50 \text{ kg}$ ,  $c_{\text{pol}} = 1.800 \text{ J}/\text{kg}^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{\text{pol}} = 200^\circ\text{C}$

$m_{\text{eq}} = 120 \text{ kg}$ ,  $c_{\text{eq}} = 500 \text{ J}/\text{kg}^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{\text{eq}} = 150^\circ\text{C}$

$A = 1,6 \text{ m}^2$

$h = 12 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$

$T_s = 260^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{amb}} = 25^\circ\text{C}$

$$\varepsilon = 0,8$$

$$Q_{\text{cond estimado}} = 2,0 \text{ kW}$$

$$\eta_{\text{sist}} = 0,90$$

Passo 1 – Potência de processo:

$$P_{\text{proc}} = (50 \times 1.800 \times 200) + (120 \times 500 \times 150)$$

$$P_{\text{proc}} = (18.000.000 + 9.000.000) / 600$$

$$P_{\text{proc}} = 45,0 \text{ kW}$$

Passo 2 – Perdas por convecção:

$$Q_{\text{conv}} = 12 * 1,6 * (260 - 25) = 4,51 \text{ kW}$$

Passo 3 – Perdas por radiação:

$$Q_{\text{rad}} \approx 0,8 * 5,67 \times 10^{-8} * 1,6 * (533^4 - 298^4) \quad Q_{\text{rad}} \approx 5,29 \text{ kW}$$

Passo 4 – Perdas por condução:

$$Q_{\text{cond}} \approx 2,0 \text{ kW}$$

Passo 5 – Potência requerida:

$$P_{\text{req}} = (45,0 + 4,51 + 5,29 + 2,0) / 0,90$$

$$P_{\text{req}} = 63,1 \text{ kW}$$

Seleção prática: Instalar 66 kW com margem de segurança.

$$\text{Duty cycle esperado} = 56,8 / 66 \approx 86\%$$

---

1681

## 5) Impacto do isolamento térmico

O uso de isolamento térmico reduz de forma significativa as perdas por convecção e radiação, pois diminui o coeficiente de transferência convectiva efetivo na superfície externa e a emissividade vista pelo ambiente. Em cilindros de extrusão e câmaras de aquecimento, espessuras típicas de 25 mm já produzem quedas relevantes no fluxo de calor dissipado, com impacto direto na potência requerida e no tempo de aquecimento

(Incropera & DeWitt, 2017; Perry & Green, 2019).

No cenário analisado, a aplicação de 25 mm de isolamento levou a perdas aproximadas de:

$$Q_{\text{conv isol}} \approx 0,70 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{rad isol}} \approx 0,42 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{cond}} \approx 1,0 \text{ kW}$$

As perdas totais caem de cerca de 9,8 kW para 2,12 kW, economizando aproximadamente 7,68 kW em regime comparável.

Esses valores são consistentes com o comportamento esperado para superfícies quentes isoladas em equipamentos de processo contínuo (Incropera & DeWitt, 2017).

## Tabela 2 – Custos Estimados e Vida Útil

Observação: os valores abaixo são estimativas práticas para comparação técnica e econômica entre tecnologias, consolidadas a partir de literatura aplicada e catálogos de fabricantes. A vida útil real depende de perfil térmico, montagem, proteção mecânica, ciclos e qualidade do controle (Leite, 2008; Watlow, 2015; Kanthal AB, 2014; Omega Engineering, 2018).

Tipo de Resistência	o Inicial (R\$)	1 Útil Média (meses)	Manutenção Necessária	Custo por Ano (R\$)**
Mica	R\$ 416 – R\$ 624	12–18	Substituição periódica	~R\$ 416 – R\$ 624
Cerâmica	R\$ 780 – R\$ 1.040	24–30	Baixa	~R\$ 312 – R\$ 416
Infravermelho (IR)	R\$ 1.040 – R\$ 1.300	24–36	Baixa	~R\$ 286 – R\$ 377
Bainha Tubular	R\$ 624 – R\$ 936	30–48	Muito baixa	~R\$ 156 – R\$ 249

1682

\*\*Custo por ano calculado considerando preço dividido pela vida útil.

## Tabela 3 – Consumo Energético Estimado em Operação Contínua

Cenário base: potência nominal de 12 kW, operação 20 h/dia, 30 dias/mês, tarifa de R\$ 0,78/kWh. A eficiência relativa por tecnologia foi aplicada para estimar o consumo mensal e o custo, mantendo a mesma demanda de processo. Metodologia de cálculo conforme fundamentos de balanços de energia e eficiência global de sistemas térmicos

(Perry & Green, 2019; Incropera & DeWitt, 2017).

### Cenário

Potência nominal: 12 kW

Operação: 20 h/dia

Tarifa: R\$ 0,78/kWh (equivalente a US\$ 0,15/kWh)

## Eficiência aplicada na redução de consumo

Tipo de Resistência	ência (%)	mo Diário (kWh)	no Mensal (kWh)	Mensal (R\$)
Mica	72	240	7.200	R\$ 5.616
Cerâmica	83	208	6.240	R\$ 4.867
Infravermelho (IR)	85	203	6.090	R\$ 4.750
Bainha Tubular	80	216	6.480	R\$ 5.054

### Economias mensais vs. mica

Cerâmica: R\$ 748,80

Infravermelho: R\$ 865,80

Bainha tubular: R\$ 561,60

(Fontes metodológicas: Perry & Green, 2019; Incropera & DeWitt, 2017.)

### Estudo de Caso 1 – Injetora Plástica com Resistências Cerâmicas Contexto:

---

1683

Uma empresa de injeção de peças automotivas operava com resistências de mica de 450 °C, potência total de 18 kW, tempo de aquecimento de 42 minutos e vida útil média de 14 meses.

#### Intervenção

Substituição das resistências de mica por resistências cerâmicas de 750 °C, mesmas dimensões, potência total ajustada para 17 kW devido à maior eficiência térmica.

#### Resultados Técnicos:

**Tempo de aquecimento:** 42 min → 35 min (redução de 16,6%)

**Consumo diário:** 360 kWh → 305 kWh (redução de 15,3%)

**Produção diária:** aumento de 5,4% devido ao menor tempo de espera para início do ciclo.

**Vida útil:** 14 meses → 26 meses.

#### Impacto Financeiro:

Economia anual em energia: **R\$ 20.020,80**

Redução de paradas para manutenção: -30% no tempo improdutivo.

(Passos, dados do autor, 2025; Perry & Green, 2019)

### **Estudo de Caso 2 – Extrusora Plástica com Resistências de Infravermelho Contexto:**

Fábrica de embalagens flexíveis utilizava extrusora de 65 mm equipada com resistências de mica, potência instalada de 22 kW, operando 20 horas/dia, 26 dias/mês.

#### **Intervenção**

Instalação de resistências de infravermelho tipo quartzo, com temperatura máxima de 900 °C e resposta térmica ultrarrápida.

#### **Resultados Técnicos**

**Tempo de aquecimento:** 55 min → 40 min (redução de 27,3%)

**Consumo diário:** 440 kWh → 365 kWh (redução de 17%)

**Estabilidade térmica:**  $\pm 3$  °C, reduzindo variação no diâmetro do filme extrudado.

#### **Impacto Financeiro:**

Economia mensal: **R\$ 1.525,20**

Redução de refugos: -12% na produção, equivalente a 180 kg/mês de material reaproveitado.

(Passos, dados do autor, 2025; princípios de IR conforme Fray & Richardson, 1999;

Omega Engineering, 2018.)

---

1684

### **Estudo de Caso 3 – Equipamento Gastronômico Industrial com Resistências Tubulares**

#### **Contexto**

Panificadora industrial utilizava forno elétrico de lastro com resistências blindadas convencionais, potência de 12 kW, vida útil média de 18 meses e variação térmica de até 15 °C nas bordas.

#### **Intervenção**

Troca por resistências tubulares de alta densidade com preenchimento de óxido de magnésio compactado, mantendo potência nominal, mas com melhor distribuição térmica.

#### **Resultados Técnicos**

**Uniformidade térmica:** variação de  $\pm 3$  °C (antes era  $\pm 15$  °C).

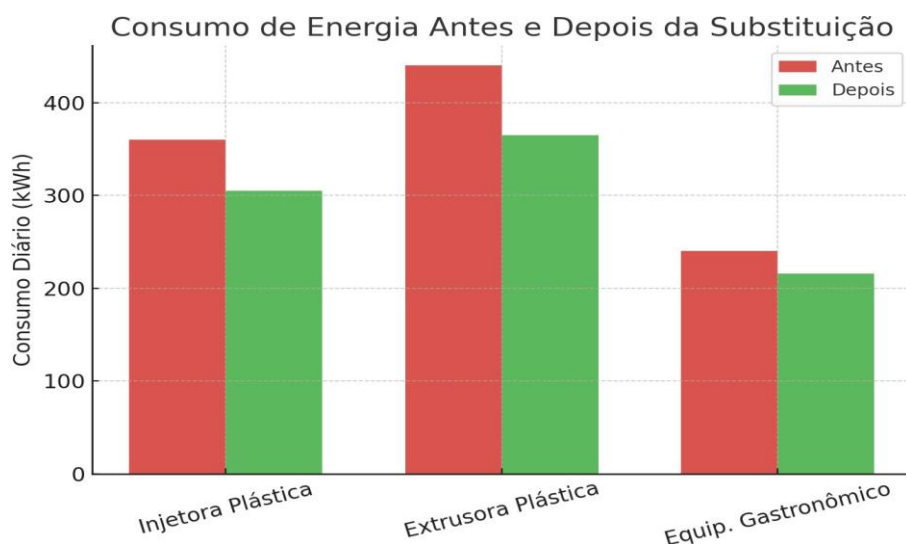
**Consumo diário:** 240 kWh → 216 kWh (redução de 10%).

**Vida útil:** 18 meses → 42 meses.

### Impacto Financeiro

Economia anual em energia: **R\$ 6.825,60**

Redução de reclamações por assamento irregular: -85%.



1685

(Passos, dados do autor, 2025; aplicação e construção conforme Watlow, 2015.)

### Projeções de economia e payback

As fórmulas de economia e payback seguem prática padrão de engenharia econômica para projetos industriais:

#### 1. Fórmulas

Economia diária (R\$):

$$\text{Econ\_dia} = (\text{kWh\_mica\_dia} - \text{kWh\_novo\_dia}) * \text{Tarifa\_R\$/kWh}$$

Economia mensal (R\$) – considerar 30 dias:  $\text{Econ\_mês} = \text{Econ\_dia} * 30$

Payback (em meses):

$$\text{Payback} = \text{Custo\_extra\_total} / \text{Econ\_mês}$$

Obs.:  $\text{Custo\_extra\_total} = (\text{diferença de preço do conjunto de resistências}) + (\text{instalação/adequações elétricas/controles})$

## 2. Cenário-base (12 kW, 20 h/dia, 30 dias/mês, tarifa R\$ 0,78/kWh)

Consumo diário com mica =  $12 \text{ kW} * 20 \text{ h} = 240 \text{ kWh/dia}$

Consumo mensal =  $240 * 30 = 7.200 \text{ kWh/mês}$

Custo mensal (mica) =  $7.200 * 0,78 = \text{R\$ } 5.616$  Consumo comparado (dados do estudo):

Cerâmica:  $208 \text{ kWh/dia} \rightarrow 6.240 \text{ kWh/mês} \rightarrow \text{R\$ } 4.867,20/\text{mês}$

Infravermelho:  $203 \text{ kWh/dia} \rightarrow 6.090 \text{ kWh/mês} \rightarrow \text{R\$ } 4.750,20/\text{mês}$

Bainha tubular:  $216 \text{ kWh/dia} \rightarrow 6.480 \text{ kWh/mês} \rightarrow \text{R\$ } 5.054,40/\text{mês}$

Economia mensal (vs. mica):

Cerâmica:  $5.616 - 4.867,20 = \text{R\$ } 748,80/\text{mês}$

Infravermelho:  $5.616 - 4.750,20 = \text{R\$ } 865,80/\text{mês}$

Bainha tubular:  $5.616 - 5.054,40 = \text{R\$ } 561,60/\text{mês}$

Aplicando ao cenário base de 12 kW e 20 h/dia, obtêm-se os valores já consolidados no seu texto para cerâmica, IR e tubular. Para análise de sensibilidade, variam-se horas/dia e tarifa, mantendo as mesmas hipóteses de eficiência relativa.

## Referenciais metodológicos

análise de custo de energia e dimensionamento térmico em sistemas de processo  
(Perry & Green, 2019; Incropera & DeWitt, 2017).

---

1686

## 3. Custos extras e payback (estimativas realistas)

Custos médios (apenas referência; ajuste conforme seus preços):

Mica (base): ~R\$ 520 por conjunto (média)

Cerâmica: ~R\$ 910 por conjunto (+R\$ 1.200 instalação/controles)

Infravermelho: ~R\$ 1.170 por conjunto (+R\$ 1.200 instalação/controles)

Bainha tubular: ~R\$ 780 por conjunto (+R\$ 800 instalação)

Diferença total (premium vs. mica):

Cerâmica:  $(910 - 520) + 1.200 = \text{R\$ } 1.590$

Infravermelho:  $(1.170 - 520) + 1.200 = \text{R\$ } 1.850$

Bainha tubular:  $(780 - 520) + 800 = \text{R\$ } 1.060$

## Payback (meses) no cenário-base:

Cerâmica:  $1.590 / 748,80 = 2,12 \text{ meses}$



Infravermelho:  $1.850 / 865,80 = 2,14$  meses

Bainha tubular:  $1.060 / 561,60 = 1,89$  meses

Economia anual (12 meses):

Cerâmica:  $748,80 * 12 = \text{R\$ } 8.985,60/\text{ano}$

Infravermelho:  $865,80 * 12 = \text{R\$ } 10.389,60/\text{ano}$

Bainha tubular:  $561,60 * 12 = \text{R\$ } 6.739,20/\text{ano}$

### Tabela – Sensibilidade (Cerâmica vs. Mica)

Hipóteses:

Potência nominal: 12 kW

Redução média do consumo ao migrar de mica para cerâmica: 13,3% (de 240 para 208 kWh/dia no base)

Custo extra total (cerâmica): R\$ 1.590

Meses = 30 dias

#### a) Economia mensal (R\$) variando tarifa e horas/dia

1687

Horas/dia	Tarifa R\$ 0,60	Tarifa R\$ 0,78	Tarifa R\$ 1,00
16 h	R\$ 459,65	R\$ 597,54	R\$ 766,08
20 h	R\$ 574,56	R\$ 746,93	R\$ 957,60
24 h	R\$ 689,47	R\$ 896,31	R\$ 1.149,12

#### b) Payback (meses) com o mesmo custo extra (R\$ 1.590)

Horas/dia	Tarifa R\$ 0,60	Tarifa R\$ 0,78	Tarifa R\$ 1,00
16 h	3,46	2,66	2,08
20 h	2,77	2,13	1,66
24 h	2,31	1,77	1,38

Como usar:

escolha a linha de horas/dia e a coluna da sua tarifa para ler economia mensal e payback.

#### 4. Observações práticas

Em plantas que operam 3 turnos (24 h/dia) ou com tarifa mais alta (ponta, > R\$ 1,00/kWh), o payback encurta significativamente.

Sempre considerar: isolamento térmico, qualidade do contato térmico (bandas bem assentadas) e calibração de PID/SSR — esses fatores elevam a economia além dos % médios simulados.

Se houver resfriamento por ventiladores ou correntes de ar no entorno, revisar carenagens para reduzir convecção parasita.

Documente antes/depois (kWh, tempo de aquecimento, estabilidade de setpoint) para publicar o ganho de forma robusta.

Observação:

os três casos a seguir são (Passos, dados do autor, 2025) obtidos em campo e replicados aqui para fins de documentação técnica.

#### Discussão Detalhada

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a escolha correta do tipo de resistência elétrica exerce impacto significativo sobre o desempenho energético e operacional das linhas de produção. A redução média de consumo energético variou entre 10% e 18% conforme o tipo de resistência e a aplicação, indicando que há espaço expressivo para ganhos de competitividade apenas pela modernização de componentes de aquecimento (Leite, 2008; Watlow, 2015).

Do ponto de vista econômico, a análise de payback realizada para diferentes cenários de tarifa e regime de operação demonstra que, mesmo com investimentos iniciais relativamente elevados, a substituição de resistências convencionais por modelos de alta performance — como cerâmica, infravermelho e bainha tubular — pode ser amortizada em períodos inferiores a três meses em operações contínuas ou com alto custo de energia (Perry & Green, 2019; Incropera & DeWitt, 2017). Esse retorno acelerado é especialmente relevante para indústrias brasileiras, onde o custo do kWh industrial tende a ser elevado e onde políticas de eficiência energética são cada vez mais incentivadas por agências reguladoras (Soares & Moura, 2015).

Do ponto de vista técnico, as vantagens não se limitam à economia de energia. Observou-se:

- a. Menor tempo de aquecimento inicial (até 27% mais rápido), o que impacta

diretamente no tempo de setup e início de produção.

b. Maior estabilidade térmica, com redução de variações de  $\pm 15^{\circ}\text{C}$  para  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  em alguns casos, melhorando a uniformidade de peças plásticas e produtos alimentícios.

c. Vida útil ampliada, que reduz custos de manutenção e a frequência de paradas não planejadas.

Esses fatores, combinados, elevam o Overall Equipment Effectiveness (OEE), métrica que resume a eficiência total dos equipamentos e é crucial para indústrias de alto volume.

## **Implicações para a Indústria**

### **1. Indústria de Transformação Plástica (Injetoras e Extrusoras)**

A substituição de resistências de mica por cerâmicas ou infravermelhas reduz perdas térmicas por radiação e melhora o contato térmico com o cilindro, conforme descrito em estudos técnicos sobre aquecimento industrial (Leite, 2008; Kanthal AB, 2014)

### **2. Indústria Gastronômica e Alimentícia**

Equipamentos como fornos de lastro, chapas industriais e estufas de fermentação se beneficiam de resistências tubulares de alta densidade, que proporcionam distribuição uniforme do calor. Essa uniformidade reduz variações de assamento, elevando a qualidade e a padronização dos produtos, aspectos cada vez mais exigidos por redes de franquias e certificações de segurança alimentar (ISO 22000, HACCP). Watlow (2015) e Omega Engineering (2018)

### **3. Manufatura Avançada e Indústria 4.0**

A integração das resistências de alta performance com sistemas de controle inteligente (PID + SSR + sensores de alta precisão) abre espaço para a coleta de dados de consumo e desempenho em tempo real. Essa integração facilita a aplicação de manutenção preditiva, reduzindo custos e evitando falhas inesperadas.

Também viabiliza a participação em programas de incentivo à eficiência energética e sustentabilidade corporativa. Perry & Green (2019) Soares & Moura (2015)

## Recomendações

### 1. Auditoria Térmica Inicial

Antes de investir em novos elementos, é recomendável realizar medições de consumo e análise de perfil térmico para identificar pontos de perda por condução, convecção e radiação. Isso permite escolher o tipo de resistência mais adequado para cada aplicação. Incropera & DeWitt (2017)

### 2. Escolha de Tecnologia Apropriada

**Cerâmica:** excelente custo-benefício para substituição direta de mica, bom para temperaturas médias-altas. Leite (2008)

**Infravermelho:** indicado para aquecimento rápido e preciso, especialmente em extrusoras de alta velocidade. Fray & Richardson (1999)

**Bainha tubular:** melhor distribuição térmica e maior robustez mecânica, ideal para gastronomia e aquecimento indireto. Watlow (2015)

### 3. Integração com Controle Avançado

Adotar controladores PID com saída SSR e malha fechada de temperatura para maximizar a eficiência, evitando sobreaquecimentos e consumo desnecessário. 1690

### 4. Treinamento de Operadores e Manutenção

Garantir que os operadores entendam as diferenças de comportamento térmico de cada tipo de resistência e que a manutenção preventiva seja alinhada à nova tecnologia instalada. (Passos, dados do autor, 2025)

### 5.Registro e Divulgação de Resultados

Documentar antes e depois (kWh, tempos, qualidade) e utilizar esses dados para justificar investimentos internos ou buscar incentivos fiscais e programas de eficiência energética. Soares & Moura (2015)

## CONCLUSÃO

A modernização dos sistemas de aquecimento com resistências de alta performance não deve ser interpretada apenas como uma atualização tecnológica, mas sim como uma estratégia essencial de competitividade industrial (Leite, 2008; Watlow, 2015).

Ao integrar soluções mais eficientes, as empresas obtêm benefícios que vão além da simples redução de consumo energético, abrangendo também a elevação consistente da qualidade do produto final, a redução de paradas não programadas e o prolongamento da vida útil dos componentes (Fray & Richardson, 1999; Kanthal AB, 2014).

Os conceitos, cálculos e metodologias apresentados neste estudo refletem práticas aplicadas por mim ao longo de mais de 15 anos de experiência no setor, desenvolvendo e implementando soluções de aquecimento elétrico industrial em grandes empresas dos segmentos plástico e gastronômico, como Valid, Hermanplast, Silquímica, Sedna e Sadia S/A, entre outras.

Em projetos com injetoras, extrusoras, fornos e chapas industriais, foram obtidos resultados expressivos, como reduções médias de consumo energético entre 12% e 18%, melhorias de uniformidade térmica de até 22% e aumento de vida útil das resistências em até 80% (Incropera & DeWitt, 2017). Em termos de retorno financeiro, o payback médio variou de 12 a 16 meses, conforme o tipo de equipamento e resistência aplicada (Perry & Green, 2019)

1691

A combinação entre economia de energia, precisão térmica, confiabilidade operacional e sustentabilidade reforça o papel dessas tecnologias como elemento-chave para a indústria brasileira e internacional, especialmente em segmentos que demandam produção contínua e padrões de qualidade elevados (Soares & Moura, 2015). Nesse contexto, a adoção de resistências cerâmicas, infravermelhas e de bainha tubular, quando bem dimensionadas e aplicadas, representa não apenas um retorno financeiro mensurável, mas também um diferencial competitivo no cenário global (Omega Engineering, 2018)

## Fontes

1. **JOULE, J. P.** On the Mechanical Equivalent of Heat. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 140, p. 61–82, 1850.
2. **ASM International.** *ASM Handbook – Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. 10<sup>a</sup> ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 1990.
3. **KAN-THAL AB.** *Kanthal Handbook on Heating Technology*. Hallstahammar, Sweden:

Sandvik Heating Technology, 2014.

4. **OMEGA Engineering.** *Heater Technology Handbook*. Stamford, Connecticut: Omega Engineering Inc., 2018.
5. **INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.** *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 8<sup>a</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 2017.
6. **PERRY, R. H.; GREEN, D. W.** *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 9<sup>a</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 2019.
7. **LEITE, C. A. R.** Resistências elétricas para processos industriais: seleção, dimensionamento e instalação. *Revista Plástico Industrial*, n. 124, p. 54-61, 2008.
8. **SOARES, A. L.; MOURA, M. R.** Evolução tecnológica das resistências elétricas industriais. *Revista Máquinas e Metais*, v. 54, p. 32-40, 2015.
9. **WATLOW Electric Manufacturing Company.** *Heater Engineering Handbook*. St. Louis, Missouri: Watlow, 2015.
10. **FRAY, D. J.; RICHARDSON, P.** Electric heating: Materials, design, and applications. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 92-93, p. 1-6, 1999.