CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PEDRO HENRIQUE VIEIRA GRAÇANO

AUDITORIA ENERGÉTICA EM UMA PADARIA DE PEQUENO PORTE

Belo Horizonte

2026

PEDRO HENRIQUE VIEIRA GRAÇANO

AUDITORIA ENERGÉTICA EM UMA PADARIA DE PEQUENO PORTE

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada no Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Frederico Romagnoli Silveira Lima

Belo Horizonte

2026

Graçano, Pedro Henrique Vieira
G729a Auditoria energética em uma padaria de pequeno porte / Pedro Henrique Vieira Graçano. – 2026.
90 f. : il., gráfs., tabs., fotos.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
Orientador: Frederico Romagnoli Silveira Lima.
Banca examinadora: Frederico Romagnoli Silveira Lima, Eduardo Lopes Barbieri e Wesley Cecílio Silva.
Bibliografia: f. 84-87.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Eficiência energética – Teses. 2. Auditoria energética – Teses. 3. Fornos elétricos – Teses. 4. Calor – Radiação e absorção – Teses. 5. Controladores PID – Teses. 6. Estudos de viabilidade – Teses. I. Lima, Frederico Romagnoli Silveira. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDD 621.31

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Jane Marangon Duarte, CRB 6ª 1592 / Cefet/MG

PEDRO HENRIQUE VIEIRA GRAÇANO

AUDITORIA ENERGÉTICA EM UMA PADARIA DE PEQUENO PORTE

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada no Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data de aprovação: 18/06/2026

Frederico Romagnoli Silveira Lima, **Doutor, Orientador**
Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Paulo Eduardo Lopes Barbieri, **Doutor, Avaliador**
Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Wesley Cecilio Silva, **Mestre, Avaliador**
Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

RESUMO

O consumo eficiente de energia elétrica é uma das estratégias para o aumento da competitividade industrial e comercial no cenário de transição energética e altos custos tarifários no Brasil. Este trabalho apresenta o diagnóstico e a proposta de soluções para a redução do consumo de energia elétrica na Padaria Sr Paulino, um estabelecimento comercial de pequeno porte localizado em Belo Horizonte, Minas Gerais, com consumo médio de 3.567,4 kWh/mês. A metodologia fundamentou-se nas diretrizes da norma ISO 50002:2014, adaptadas para a condução da auditoria no estabelecimento, englobando medições de campo de parâmetros elétricos e térmicos dos sistemas de iluminação, força motriz, cocção e refrigeração. Os resultados apontaram que o forno de lastro elétrico e os sistemas de refrigeração são os principais consumidores, correspondendo a 53% e 32% do consumo total do estabelecimento, respectivamente. A avaliação de desempenho indicou ineficiência por perdas na porta do forno e obsolescência nos controles de temperatura, disparidade de desempenho entre os equipamentos ativos de refrigeração, além de um subdimensionamento nos níveis de iluminância nas áreas de produção de alimentos. Como proposta para mitigação, elaborou-se um portfólio integrado de intervenções composto por: readequação iluminotécnica por meio de lâmpadas LED de alta potência (LED High Power); reforço do isolamento térmico da porta do forno com manta de lã de rocha de alta densidade; instalação de controle digital de temperatura com lógica proporcional-integral-derivativa (PID) associado a uma chave estática e substituição dos refrigeradores por modelos comerciais mais eficientes. A análise de viabilidade econômica do portfólio integrado para o horizonte de 5 anos indicou um investimento inicial total (CAPEX) de R$ 11.965,00 tempo de retorno de capital (payback simples) de 1,7 anos, Valor Presente Líquido (VPL) de R$ 11.677,99 e uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 51,98% ao ano, concluindo pela viabilidade técnica e financeira das ações propostas.

Palavras-chave: Eficiência energética; Auditoria energética; Forno de lastro elétrico; Controle PID; Viabilidade econômica.

ABSTRACT

Efficient electricity consumption is a key strategy for increasing industrial and commercial competitiveness in the context of the energy transition and high electricity tariffs in Brazil. This paper presents an energy diagnosis and a proposal of solutions for reducing electricity consumption at Padaria Sr Paulino, a small-sized commercial bakery located in Belo Horizonte, Minas Gerais, with an average consumption of 3,567.4 kWh/month. The methodology was based on ISO 50002:2014 guidelines, adapted for conducting the audit in the establishment, encompassing field measurements of electrical and thermal parameters for lighting, motive power, cooking, and refrigeration systems. The results showed that the electric deck oven and the refrigeration systems are the primary energy consumers, accounting for 53% and 32% of the establishment's total consumption, respectively. The performance evaluation indicated inefficiencies due to thermal losses through the oven door, obsolete temperature controls, performance disparities among active refrigeration units, and undersized illuminance levels in food preparation areas. As mitigation measures, an integrated portfolio of interventions was developed, consisting of: a lighting retrofit using high-power LED lamps (LED High Power); reinforcement of the thermal insulation on the oven door with a high-density rock wool blanket; installation of a digital temperature controller with Proportional-Integral-Derivative (PID) logic coupled with a solid-state switch; and the replacement of refrigerators with more efficient commercial models. The economic forecast analysis of the integrated portfolio for a 5-year horizon indicated a total initial investment (CAPEX) of R$ 11,965.00, a simple payback period of 1.7 years, a Net Present Value (NPV) of R$ 11,677.99, and an Internal Rate of Return (IRR) of 51.98% per year, concluding that the proposed actions are technically and financially sound.

Keywords: Energy audit. Energy efficiency. Electric deck oven. PID control. Economic feasibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Diagrama de fluxo do processo de auditoria energética 16
Figura 3.2 – Curva ABC - Consumo energético em padarias 19
Figura 3.3 – Forno tipo turbo..... 20
Figura 3.4 – Forno de lastro 20
Figura 3.5 – Amassadeira espiral 21
Figura 3.6 – Cilindro 22
Figura 3.7 – Modeladora 22
Figura 3.8 – Refrigerador vertical 23
Figura 3.9 – Fluxo luminoso 24
Figura 3.10 – Escala de eficiência luminosa 24
Figura 3.11 – Lâmpada incandescente 25
Figura 3.12 – Modo de funcionamento da lâmpada fluorescente..... 26
Figura 3.13 – Lâmpada LED 26
Figura 3.14 – Requisitos de iluminação para diferentes atividades e ambientes 27
Figura 3.15 – Classificação da eficiência de consumo para diferentes atividades e ambientes 28
Figura 3.16 – Valores alvo para iluminância mantida de acordo com o índice do recinto e aplicações..... 30
Figura 3.17 – Exemplo para a determinação do Fator de utilização de luminárias..... 31
Figura 3.18 – Curvas características do motor de 100 cv..... 33
Figura 3.19 – Curvas características do motor de 90 cv..... 34
Figura 3.20 – Forno à resistência..... 35
Figura 3.21 – Balanço de energia para a conservação de energia na superfície de um meio 36
Figura 3.22 – Curvas de flutuação de temperatura dos sistemas de controle PID e On/Off. 39
Figura 3.23 – Ciclo teórico de refrigeração a vapor 39
Figura 3.24 – Fabricantes de refrigeradores comerciais no Brasil 41
Figura 3.25 – Consumo de energia dos modelos de refrigeradores de bebidas e os “MEPS” da união europeia (2021 e 2023) e México 42
Figura 3.26 – Parâmetros M e N para o cálculo do consumo padrão 43

Figura 3.27 – Coeficiente compensatório para classe de temperatura 43
Figura 3.28 – Níveis de “MEPS” recomendados; a percentagem de modelos que ficariam fora dos “MEPS” 44
Figura 3.29 – Níveis de eficiência das etiquetas propostas para o refrigerador de bebidas 44
Figura 3.30 – Distribuição de eficiência energética dos modelos de refrigeradores de bebidas obtidos durante a pesquisa de mercado com os fabricantes nas etiquetas propostas. 45
Figura 3.31 – Fluxo de caixa do exemplo 47
Figura 4.1 – Fluxograma das etapas da auditoria energética 49
Figura 4.2 – Placa de identificação técnica de um refrigerador comercial 50
Figura 4.3 – Amperímetro alicate 50
Figura 4.4 – Amperímetro analógico do forno 52
Figura 4.5 – Luxímetro digital 53
Figura 4.6 – Placa de identificação do motor da masseira já desgastada 54
Figura 4.7 – Parte frontal do forno 55
Figura 4.8 – Termômetro infravermelho 55
Figura 4.9 – Termômetro espeto 57
Figura 5.1 – Layout da padaria 63
Figura 5.2 – Histórico do consumo 64
Figura 5.3 – Distribuição do consumo 66
Figura 5.4 – Iluminância medida em 9 pontos da área 8 67
Figura 5.5 – Iluminância medida em 9 pontos da área 9 68
Figura 5.6 – Iluminância medida em 4 pontos da área 10 69
Figura 5.7 – Curva de desempenho do motor W22 Dahlander 70
Figura 5.8 – Curva de desempenho do novo motor W22 Dahlander 75
Figura 5.9 – Especificações técnicas das diferentes configurações do forno de lastro superfecta 77
Figura A.1 – Soluções e convergência das variáveis térmicas de isolamento e perdas de calor 90

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Distribuição do consumo mensal por equipamento 65
Tabela 5.2 – Custos de materiais e execução para o novo isolamento térmico da porta 78
Tabela 5.3 – Custo estimado para a instalação do controle de temperatura 79

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11
2. OBJETIVOS 13
2.1. Objetivo Geral 13
2.2. Objetivos Específicos 13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14
3.1. Auditoria energética 14
3.1.1. Tipos de auditoria energética 14
3.1.2. Abordagem genérica 16
3.2. Energia e as leis da termodinâmica 18
3.3. Uso de energia em padarias comerciais 19
3.4. Estudos energéticos 23
3.4.1. Iluminação 23
3.4.2. Motores elétricos 31
3.4.3. Forno elétrico 34
3.4.4. Sistemas de refrigeração 39
3.5. Análises econômicas de investimento 45
3.5.1. Técnicas de análise de investimento 46
4. METODOLOGIA 49
4.1. Escopo da auditoria 49
4.2. Levantamento das informações gerais da empresa 49
4.3. Caracterização do consumo 49
4.4. Análise do desempenho energético 52
4.4.1. Iluminação 52
4.4.2. Masseira 53
4.4.3. Forno 54
4.4.4. Refrigeração 57

4.5. Desenvolvimento dos estudos técnicos e econômicos 57
4.5.1. Iluminação 58
4.5.2. Masseira 58
4.5.3. Forno 60
4.5.4. Refrigeração 61
4.6. Elaboração das recomendações e análise econômica das propostas 61
5. RESULTADOS 63
5.1. Dados e informações gerais da empresa 62
5.2. Caracterização do consumo 65
5.3. Análise do desempenho energético 67
5.3.1. Iluminação 67
5.3.2. Masseira 69
5.3.3. Forno 70
5.3.4. Refrigeração 72
5.4. Desenvolvimento dos estudos técnicos e econômicos 72
5.4.1. Iluminação 72
5.4.2. Masseira 74
5.4.3. Forno 76
5.4.4. Refrigeração 79
5.5. Elaboração das recomendações e análise econômica das propostas 80
5.5.1. Iluminação 80
5.5.2. Masseira 80
5.5.3. Forno 81
5.5.4. Refrigeração 81
5.5.5. Análise econômica das implementações propostas 81
6. CONCLUSÕES 83
7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS 84

7.1. Iluminação: Ofuscamento e critérios da NBR ISO/CIE 8995-1 (UGR) 84
7.2. Controle PID: Sintonização e segurança térmica contra falhas..... 84
7.3. Integração de sistema solar fotovoltaico 84
8. REFERÊNCIAS 85
9. APÊNDICE A - Memorial de cálculo de transferência de calor no software EES 89

1. INTRODUÇÃO

De acordo com dados e projeções da agência *Energy Information Administration* (EIA) dos Estados Unidos, a demanda global por energia segue uma rota contínua de crescimento, impulsionada pelo aumento populacional e pela melhoria na qualidade de vida em diversos países. O histórico da agência aponta que o consumo mundial subiu em quase todos os últimos 50 anos, mantendo um ritmo recente de expansão entre 1% e 2% ao ano. Os relatórios alertam, ainda, que essa trajetória crescente representa uma séria ameaça ao clima, uma vez que o atendimento a essa demanda permanece dependente de combustíveis fósseis, cujas emissões de dióxido de carbono e demais gases do efeito estufa aceleram o aquecimento global.

Além das mudanças climáticas, a preocupação com o esgotamento dos recursos naturais, o desejo natural das indústrias de reduzir custos operacionais e políticas governamentais de incentivo a práticas sustentáveis contribuem para a existência de uma tendência mundial em relação à busca pelo consumo sustentável e eficiente. Tecnologias se desenvolvem com foco em fontes de energia renováveis, como solar, eólica e hidrelétrica.

O uso de sistemas inteligentes, como redes elétricas inteligentes, e a implementação de práticas de eficiência em edifícios e indústrias também estão em alta. Essas medidas visam não só a redução do consumo, mas também a otimização do uso de energia disponível, reduzindo a dependência de fontes não renováveis.

No Brasil, a matriz energética se difere do resto do mundo por ter mais fontes de energia renováveis e limpas, graças à sua extensão territorial, biodiversidade e condições climáticas. Mais de 60% da energia elétrica gerada no país vem de usinas hidrelétricas. Apesar disso, as tarifas de energia são uma das mais caras do mundo, tanto para as indústrias quanto para os comércios e residências. (ANEEL; EPE, 2025)

Nos últimos anos, diversas regiões têm enfrentado períodos de estiagem, com baixos níveis de chuva. Isso reduz a capacidade de geração hidrelétrica, e faz com que o país recorra a outras fontes, como termoelétricas. Além disso, a alta carga tributária, cerca de 30% do valor total da conta, e o custeamento de subsídios contribuem para o preço elevado da eletricidade no Brasil. (ONS; ANEEL, 2025).

Assim, a adoção de programas de auditoria energética ganha cada vez mais destaque, no Brasil e no mundo, como uma estratégia fundamental para melhorar a

eficiência no uso de energia. Países como Estados Unidos e nações da União Europeia já implementam normas rigorosas, exigindo que grandes consumidores realizem auditorias regularmente.

No Brasil, o Programa de Eficiência Energética regulamentado pela ANEEL incentiva a realização de auditorias em empresas, fornecendo diretrizes e certificações. Mesmo em pequenas indústrias, a redução das perdas de energia é vista como oportunidade de melhoria da eficiência produtiva.

Segundo Nogueira (2006), ainda que o suprimento de energia para os processos produtivos represente uma parcela reduzida dos custos totais, a energia não possui outros substitutos senão a própria energia, sem a qual os processos não se desenvolvem. Dessa forma, a auditoria energética torna-se uma ferramenta essencial para identificar oportunidades de economia e otimização.

A Diretiva 2012/27/UE do parlamento europeu sobre eficiência energética de 2012, define auditoria energética como "um procedimento sistemático com o objetivo de obter um conhecimento adequado do perfil de consumo de energia existente em um edifício ou grupo de edifícios, de uma operação ou instalação industrial ou comercial ou de um serviço público ou privado, identificando e quantificando energia e a relação custo-eficácia entre as oportunidades de poupança e resultados esperados".

A partir desta perspectiva, este trabalho busca propor as melhores alternativas do ponto de vista técnico e econômico para reduzir o consumo de energia em uma padaria de pequeno porte, localizada em Belo Horizonte – Minas Gerais, que funciona 364 h/mês, produzindo e comercializando produtos alimentícios. Para isso, é conduzida uma auditoria energética na padaria, tendo como base as diretrizes da norma ISO 50002:2014, adaptadas à realidade operacional e escala do negócio. O procedimento contempla a análise dos fluxos de energia, a identificação de oportunidades de economia e a seleção de equipamentos a serem modificados ou substituídos. Por fim, o levantamento feito, juntamente com as propostas de melhoria, serve de auxílio para os gestores tomarem as decisões necessárias.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Realizar o diagnóstico do uso de energia da padaria e propor soluções para reduzir o consumo.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar o perfil de consumo e os fluxos energéticos dos subsistemas produtivos e comerciais;
- Medir em campo os parâmetros elétricos e térmicos dos principais equipamentos de cocção, força motriz e refrigeração;
- Avaliar a conformidade técnica das instalações frente às normas de iluminância e desempenho térmico e energético;
- Determinar a viabilidade técnico-econômica de modificações funcionais ou substituições de maquinário;
- Selecionar e propor as melhores soluções.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica que embasa o desenvolvimento deste trabalho, estabelecendo as definições, conceitos e normativas vigentes sobre a gestão de energia. A revisão aborda desde os princípios metodológicos da auditoria energética e a classificação de seus níveis de detalhamento até os aspectos operacionais e de eficiência dos subsistemas térmicos, de refrigeração e de iluminação, os quais constituem as principais cargas do setor de panificação.

3.1. Auditoria energética

O termo: auditoria energética se refere ao procedimento realizado para avaliar os fluxos de energia, seja de um edifício, processo ou sistema, a fim de identificar oportunidades de redução do uso de energia sem comprometer as atividades demandadas. A norma internacional ISO 50002:2014, que especifica o procedimento necessário para o desenvolvimento da auditoria energética, a define como sendo uma "análise sistemática do uso de energia e do consumo de energia dentro de um escopo definido, a fim de identificar, quantificar e relatar as oportunidades para melhorar o desempenho energético". Já a norma diretiva do parlamento europeu sobre eficiência energética de 2012, define auditoria energética como "um procedimento sistemático com o objetivo de obter um conhecimento adequado do perfil de consumo de energia existente em um edifício ou grupo de edifícios, de uma operação ou instalação industrial ou comercial ou de um serviço público ou privado, identificando e quantificando energia e a relação custo-eficácia entre as oportunidades de poupança e resultados esperados".

Para Allouhi (2018) a auditoria energética é a fase fundamental de um programa de eficiência energética por ajudar a compreender, quantificar e analisar o uso de energia em uma organização, permitindo detectar onde ocorrem os desperdícios e descobrir oportunidades de redução do uso de energia. Para Sharma (2021) a auditoria energética é o grande e mais importante passo para reduzir o consumo de energia e poupar dinheiro, por fornecer à organização um ponto de referência para a gestão do consumo e um melhor plano para o uso essencial de energia.

Fundamentalmente, a promoção da eficiência energética é possibilitada pela a aplicação correta de conceitos de engenharia e análise econômica. No entanto, existem técnicas e métodos desenvolvidos de acordo com o tipo de auditoria a ser implementada, que por sua vez, irá depender da necessidade de aprofundamento das análises, do tamanho

da empresa analisada e do setor em que ela está situada, e, do nível de redução almejada. (Sharma, 2021)

3.1.1. Tipos de auditoria energética

A ASHRAE Standard 211-2018 define três tipos, ou níveis, de auditoria energética, cada uma diferindo da outra de acordo com a intensidade de análise e com os resultados esperados.

- **ASHRAE nível 1: análise passo a passo**

"Este nível envolve avaliar os custos de energia do edifício e a eficiência analisando as faturas de energia e fazendo uma breve inspeção no prédio acompanhado pelo operador do edifício. A análise do Nível I identifica e fornece uma análise de economia e custo de medidas de baixo custo/sem custo. Também lista melhorias de capital potenciais que merecem uma consideração adicional, juntamente com uma avaliação inicial dos custos e economias potenciais. Os resultados podem ser usados para desenvolver uma lista de prioridades para os edifícios que são recomendados para uma auditoria de Nível II ou Nível III."

- **ASHRAE nível 2: levantamento e análise energética**

"Inclui levantamento e análises mais detalhadas do edifício. É fornecido um desdobramento do uso de energia do edifício. Uma análise do Nível II identifica e fornece a análise de custos e economias de medidas práticas que atendem às restrições do proprietário e critérios econômicos, juntamente com discussões sobre os efeitos nos procedimentos de operação e manutenção, se aplicável. Uma auditoria do Nível II lista melhorias de capital intensivas potenciais que requerem uma coleta e análise de dados mais detalhadas, juntamente com uma avaliação inicial dos custos e economias potenciais."

- **ASHRAE nível 3: análise detalhada de modificações de alto investimento de capital:**

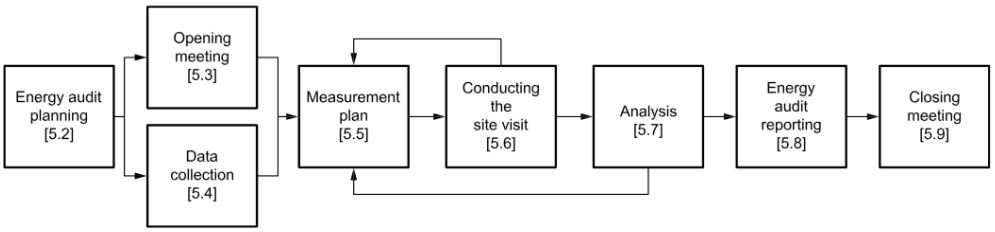
"Este nível de análise concentra-se em projetos de alto investimento de capital potencial identificados durante estudos anteriores, e envolve uma coleta de dados de campo mais detalhada e análise de engenharia. Ele fornece informações detalhadas sobre custos e economias do projeto com um nível de confiança suficientemente alto para decisões de investimento de capital importantes."

3.1.2. Abordagem genérica

Embora existam diversos tipos de auditoria, a norma internacional ISSO 50002:2014 define os requisitos de processo básicos para a realização de auditorias energéticas. Esses requisitos podem ser aplicados a todos os tipos de estabelecimentos e organizações, bem como a todas as modalidades de utilização de energia. Esta metodologia geral de auditoria energética baseia-se nas fases de planejamento da auditoria energética, reunião para tratar, coleta de informações e dados, plano de medição dos dados, execução da visita ao local, análises, elaboração dos relatórios de auditoria e reunião final.

O diagrama de fluxo extraído da norma com as fases da auditoria é ilustrado na figura 3.1.

Figura 3.1 – Diagrama de fluxo do processo de auditoria energética



Fonte: Norma ISO 50002:2014.

A primeira etapa, a do planejamento, envolve a definição do escopo, objetivos, e coleta de informações preliminares da organização. Isso inclui o acordo entre o auditor e a organização a respeito do escopo da auditoria, necessidades e expectativas, detalhamento necessário, período necessário para a realização da auditoria, critérios de avaliação das oportunidades de melhoria, compromisso do tempo e de recursos da organização, dados relevantes a serem disponibilizados pela organização e os relatórios esperados. O auditor também solicita informações para estabelecer o contexto da auditoria, podendo estar relacionadas com requisitos regulatórios, restrições, planos estratégicos e sistemas de gestão.

A reunião para tratativas, ou reunião de abertura, é a fase em que o auditor se encontra com os representantes da organização para apresentar de maneira formal o escopo determinado da auditoria, os objetivos, a metodologia a ser seguida, os cronogramas e as expectativas. É um momento ideal para o esclarecimento de dúvidas,

para estabelecer uma comunicação aberta e definir os papéis e as responsabilidades de ambas as partes.

Durante a fase de coleta de dados, o auditor deve reunir e registrar dados relevantes que apoiem os objetivos da auditoria. Isso inclui informações como lista de sistemas, processos e equipamentos consumidores de energia; características detalhadas dos usos de energia dentro do escopo da auditoria; dados históricos e atuais de desempenho energético; planos futuros que possam afetar o desempenho energético; documentos de projeto, operação e manutenção; estudos anteriores relacionados ao desempenho energético; tarifas de energia atuais ou referências para análise financeira; outros dados econômicos relevantes; conhecimento sobre como a organização gerencia seu uso e consumo de energia; e o sistema de distribuição de energia e sua gestão.

No processo de planejamento de medição, o auditor e a organização devem colaborar para estabelecer um plano abrangente que garanta a obtenção precisa e relevante dos dados necessários, incluindo uma lista detalhada dos pontos de medição relevantes, identificação de pontos adicionais se necessário, especificações de precisão e repetibilidade, frequência e duração das medições, considerações sobre a representatividade temporal das atividades, variáveis operacionais fornecidas pela organização e atribuição de responsabilidades para a realização das medições. A colaboração entre o auditor e a organização é fundamental para garantir a eficácia e relevância do plano de medição, visando a obtenção de dados precisos que fundamentem a análise e as conclusões da auditoria.

Na etapa de visita ao local, os auditores devem observar os usos de energia, avaliar o consumo, compreender o impacto das rotinas operacionais, gerar ideias para melhorias, listar áreas que necessitam de dados adicionais, garantir que os dados históricos sejam representativos e informar a organização sobre dificuldades encontradas. Além disso, deve acordar com a organização a identificação de indivíduos para fornecer acesso e atuar como guias durante as visitas, permitir a instalação de equipamentos de moitoramento e dar acesso a documentos relevantes.

Para as análises os auditores devem avaliar a validade e disponibilidade dos dados, propondo métodos alternativos se necessário. Devem utilizar métodos de cálculo transparentes, documentar suposições feitas e considerar variáveis que afetam a incerteza de medição. Além disso, devem caracterizar e avaliar o desempenho energético atual dos equipamentos dentro do âmbito definido da auditoria, avaliando os indicadores de

desempenho existentes. As oportunidades de melhoria poderão ser identificadas com base na própria experiência e competência do auditor, avaliação das opções de projeto e configuração para atender às necessidades do sistema, vida útil operacional dos objetos auditados, comparações com tecnologias mais eficientes do mercado, melhores práticas e uso futuro de energia e mudanças na operação. Posteriormente, cada oportunidade deve ser avaliada em termos de economia de energia, financeira e critérios acordados. As oportunidades devem ser classificadas e as interações entre elas consideradas. Se necessário, análises adicionais devem ser definidas para o complemento dos resultados.

Quando for reportar os resultados obtidos por meio das análises, o auditor deve garantir que os requisitos acordados com a organização foram cumpridos e deve também identificar as medições relevantes realizadas durante a auditoria, incluindo sua frequência, precisão e justificativa. Além disso o conteúdo do relatório deve incluir um sumário executivo, antecedentes, detalhes da auditoria, oportunidades de melhoria do desempenho energético e conclusões e recomendações.

Por fim, na reunião de encerramento, conforme descrita pela norma, o auditor deve apresentar de forma clara e concisa os resultados para facilitar a tomada de decisões. Ele também deve estar preparado para explicar os resultados e esclarecer quaisquer dúvidas que surjam durante a reunião. Além disso, se necessário, o auditor deve identificar quaisquer itens que requerem análise ou acompanhamento adicional por parte dele.

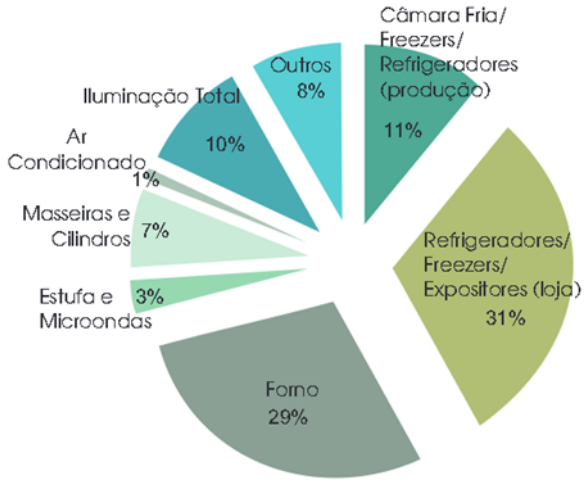
3.2. Energia e as leis da termodinâmica

A maneira mais básica de quantificar e avaliar os fluxos energéticos e identificar as possíveis perdas de energia em sistemas é através de análises termodinâmicas. Segundo Dincer (2018), em qualquer processo ou sistema em que há o uso de energia é extremamente importante compreender termodinamicamente o sistema para projetá-lo, analisá-lo e avaliar seu desempenho por meio de verdadeiras eficiências. Para ele, a termodinâmica pode ser considerada a ciência da energia, que a trata como uma quantidade física da maneira mais abrangente. Segundo Capilla (2005 apud EUROPEAN COMMISSION, 2009) a termodinâmica é a ciência básica que trata da energia e dos vários conceitos e leis que descrevem a conservação de uma forma de energia em outra, e ter algum conhecimento de seus princípios é essencial para a compreensão da energia e da eficiência energética.

3.3. Uso de energia em padarias comerciais

Segundo o levantamento feito pela Agência Brasileira da Indústria da Panificação (ABIP, 2021), o gasto com o uso de energia corresponde em média de 8 a 10% das despesas totais das empresas do setor de panificação, sendo que aproximadamente 40% destes são usados em sistemas de refrigeração e outros 29% em sistemas de cocção. Dentre os equipamentos principais que utilizam energia em uma padaria comercial é possível listar: Forno, masseira, cilindro, modeladora, refrigeradores e lâmpadas, e a distribuição do consumo entre esses equipamentos é ilustrada na figura 3.2.

Figura 3.2 – Curva ABC - Consumo energético em padarias



Fonte: SEBRAE (2015).

Os diferentes tipos de fornos podem utilizar energia a partir da combustão de gás, queima de lenha ou pela passagem de corrente por resistência elétrica. Ainda, o modelo e tipo de forno a ser escolhido depende do volume, regime e particularidades de produção, e do espaço físico disponível para instalação. De maneira geral, existem dois tipos de fornos: Turbo e de lastro.

Os fornos do tipo turbo, como mostrado na figura 3.3, são caracterizados por forçarem a convecção do ar quente dentro da câmara de cocção por meio de uma ventoinha, fazendo com que os pães sejam assados de maneira uniforme. São mais compactos em relação aos fornos de lastro, ideais para produtos com maiores demandas e com saída rápida. (PRÁTICA, 2020).

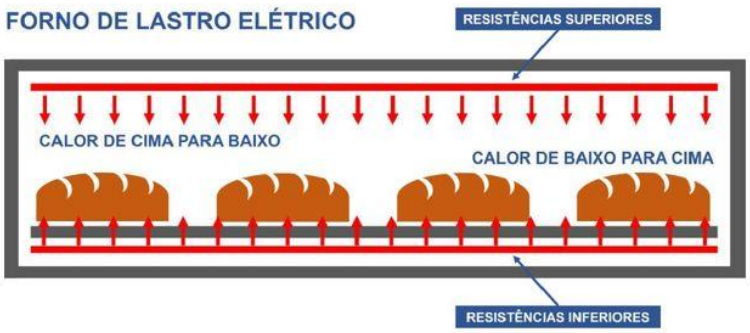
Figura 3.3 – Forno tipo turbo



Fonte: Prática (2020)

Já os fornos de lastro trabalham com a transmissão natural de calor, do equipamento para o alimento, do piso (lastro) cerâmico para cima e do teto para baixo. Os fornos elétricos contam com duas resistências independentes, uma localizada sob o piso e outra sobre o teto, que são programadas em diferentes temperaturas, permitindo atender uma maior variedade de produtos com exigências específicas. A estrutura do forno de lastro é apresentada na figura 3.4. (PRÁTICA, 2023)

Figura 3.4 – Forno de lastro



Fonte: Prática (2023)

A masseira, ilustrada na figura 3.5, também conhecida como amassadeira, tem a função de misturar e uniformizar a massa para atingir o ponto ótimo. Além disso, auxilia na criação da rede de glútem, uma proteína responsável por reter os gases produzidos

durante a fermentação, possibilitando o crescimento do pão. Inclui um eixo, geralmente em forma de espiral, e um tacho. O movimento relativo entre os dois, responsável por mistura a massa, é ocasionado pela transmissão do motor para o eixo e o tacho por meio de correias, fazendo com que ambos girem..(O QUE É AMASSADEIRA?, 2023)

Figura 3.5 – Amassadeira espiral



Fonte: Magazine Luiza (2026)

Por outro lado, o cilindro, representado na figura 3.6, tem a função de uniformizar e compactar as massas. Até a década de 50, as amassadeiras eram responsáveis apenas pela mistura dos ingredientes, enquanto os cilindros eram responsáveis por dar o acabamento à massa. Hoje em dia, apesar das amassadeiras também uniformizarem a massa, os cilindros ainda são úteis em certas situações, como na "sova" da massa. Em regiões com temperaturas elevadas, como o Brasil, as massas costumam crescer mais rapidamente, e o cilindro consegue eliminar as bolhas de ar que impedem a fermentação, dando origem a pães sovados. Ademais, há diversos tipos de cilindros destinados a massas específicas, como o cilindro para pastel, apropriado para massas com hidratação inferior a 40%, e o cilindro para pão, recomendado para massas com hidratação superior a 40% com hidratação abaixo de 60%. (PRÁTICA, 2023)

Figura 3.6 – Cilindro



Fonte: Prática (2023)

Durante a fase de modelagem, determina-se o tamanho, o peso e a forma do pão. A modeladora, ilustrada na figura 3.7, consiste em dois rolos que abrem a massa e dois feltros que se movem em direções contrárias, resultando no enrolamento da massa. Através de uma regulagem, pode-se determinar o grau de achatamento da massa e a quantidade de voltas que o pão deve ter. (MODELADORA, 2022).

Figura 3.7 – Modeladora



Fonte: HAYASHI (2022)

Os dispositivos de refrigeração podem ser aplicados tanto na produção, para guardar os ingredientes das receitas, quanto no setor comercial, atuando como vitrines para bebidas, bolos e similares. Na figura 3.8 é ilustrado um refrigerador vertical.

Figura 3.8 – Refrigerador vertical



Fonte: Gelopar (2024)

Finalmente, a iluminação é classificada como o terceiro item que mais consome eletricidade em padarias, sendo responsável pela iluminação do espaço comercial, especialmente à noite, pela iluminação dos produtos de venda direta, expostos em expositores e freezers, além de iluminar a área de produção, principalmente durante a madrugada e a noite.

3.4. Estudos energéticos

De acordo com Dincer (2018), para uma avaliação correta do desempenho de um sistema energético é necessário um estudo cuidadoso das eficiências e suas melhorias. Para qualquer sistema, a eficiência em geral, pode ser definida como a razão entre a produção desejada (output) realizada pelo sistema e a entrada necessária (input) no sistema. No entanto, segundo Dincer (2018), embora esta definição proporcione uma visão geral e simples de eficiência, é necessário desenvolver uma variedade de relações de eficiências específicas para vários sistemas e operações energéticas.

3.4.1. Iluminação

A iluminotécnica é a ciência que estuda de maneira minusciosa as técnicas das fontes de iluminação artificial, através da energia elétrica. Para Rodrigues (2002), conhecer os termos técnicos básicos usados pela iluminutécnica torna-se necessário para a compreensão das possíveis aplicações de redução/melhoria do uso de energia pelos sistemas de iluminação. Para isso, foi extraído os conceitos e termos fundamentais do manual de iluminação do PROCEL.

Fluxo luminoso: Quantidade de luz que uma fonte luminosa emite por segundo, em todas as direções, na forma de luz, conforme representado pela figura 3.9. A unidade de medida é o lúmen (lm).

Figura 3.9 – Fluxo luminoso



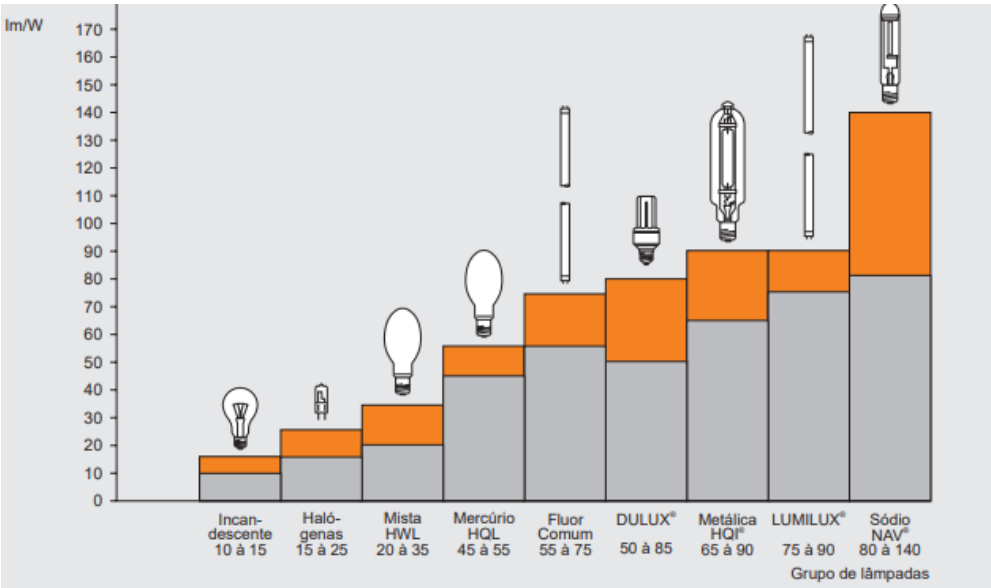
Fonte: PROCEL (2011)

Iluminância: Fluxo luminosos (lm) incidente numa superfície por unidade de área (m^2). Sua unidade é o lux.

Eficiência luminosa: Razão entre o fluxo luminoso e a potência consumida (lm/W).

A escala de eficiência luminosa de cada modelo de lâmpada é ilustrada pela figura 3.10.

Figura 3.10 – Escala de eficiência luminosa



Fonte: PROCEL (2011)

- **Lâmpadas**

A eficiência dos sistemas de iluminação artificial está associada às características técnicas, à eficiência e rendimento de um conjunto de elementos, dentre os quais destacam-se: lâmpadas, luminárias, reatores, circuitos de distribuição e controle, utilização de luz natural, cores das superfícies internas e mobiliário. (RODRIGUES, 2002)

As lâmpadas convertem a energia elétrica em energia luminosa. Existem diferentes tipos de lâmpadas e a eficiência energética de um sistema de iluminação depende de seus aspectos de eficiência luminosa e vida útil.

A lâmpada incandescente, representada na figura 3.11, funciona através da condução de eletricidade pelo filamento de tungstênio, que, ao ser aquecido, produz luz. A presença de gás inerte ou vácuo no bulbo que abriga o filamento impede a sua oxidação.

Figura 3.11 – Lâmpada incandescente



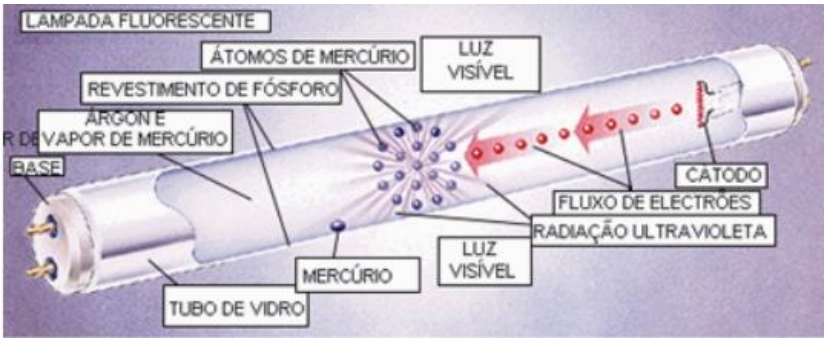
Fonte: Oficina da net (2010)

Seu rendimento luminoso é baixo em comparação com os outros tipos de lâmpadas, significando que grande parte da energia consumida é convertida em calor em vez de luz. Apresenta vida útil também baixa, durando em média de 750 à 1000 horas. (O QUE É LÂMPADA INCANDESCENTE?, 2023)

Na lâmpada de descarga elétrica a luz é gerada de maneira direta ou indireta pela passagem de corrente através de um gás, mistura de gases ou vapores. As lâmpadas fluorescentes contêm gás de mercúrio e fósforo em seu interior, e funcionam a partir da fluorescência do fósforo, quando ele captura a energia da luz ultravioleta emitida pelos elétrons de mercúrio e fragmenta em porções menores de energia, emitindo luz no espectro visível. As lâmpadas fluorescentes apresentam uma redução de consumo de

aproximadamente 80% em comparação com as lâmpadas incandescentes e vida útil de até 10 vezes maior. O funcionamento da lâmpada é ilustrado pela figura 3.12. (LÂMPADAS FLUORESCENTES, 2015)

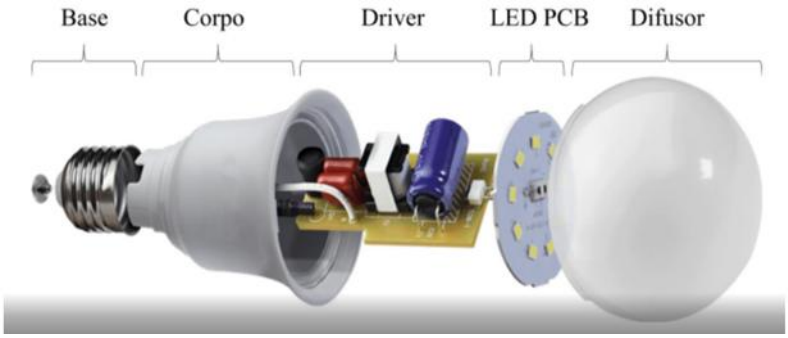
Figura 3.12 – Modo de funcionamento da lâmpada fluorescente



Fonte: Profeletro (2024)

As lâmpadas de LED, por sua vez, são compostas por material semicondutor organizado em chips, que fazem parte de um circuito elétrico que impulsiona a movimentação de elétrons. Quando a corrente elétrica passa pelo material, os elétrons se recombinam dentro do dispositivo, liberando energia na forma de fótons. Os componentes da lâmpada desmontada são apresentados na figura 3.13

Figura 3.13 – Modo de funcionamento da lâmpada fluorescente



Fonte: Blog da engenharia (2022)

Apesar de ter um custo relativamente maior, a redução potencial de consumo de energia, em comparação com as lâmpadas incandescentes, pode chegar à 90%, além de durar em média 25 vezes mais. (LÂMPADAS FLUORESCENTES, 2015)

- **Métricas de desempenho e normatização**

A norma NBR ISO/CIE 8995-1 estabelece os requisitos de iluminação para locais de trabalho visando atender às necessidades de desempenho visual, conforto e segurança. Dentre os principais parâmetros considerados pela norma estão: Iluminância mantida, índice limite de ofuscamento unificado e índice de reprodução de cor mínimo.

Iluminância mantida: Representa o valor abaixo do qual a iluminância média não pode cair. É considerado a depreciação do fluxo luminoso devido ao envelhecimento das lâmpadas e ao acúmulo de sujeira. A iluminância deve ser medida em pontos específicos em áreas pertinentes. As leituras não podem ser inferiores às calculadas para o ponto.

Índice de ofuscamento unificado: Define o limite para o brilho excessivo que pode causar desconforto ou reduzir a capacidade de distinguir detalhes. O fabricante da luminária deve fornecer os dados autênticos de índice de ofuscamento unificado.

Índice de reprodução de cor mínimo: Garante que as cores dos objetos sejam percebidas de forma fiel. Os fabricantes de lâmpadas devem fornecer dados de índice de reprodução de cor para as lâmpadas utilizadas no projeto.

Os níveis de iluminação requeridos para diferentes ambientes e atividades são estabelecidos pela norma, conforme a figura 3.14.

Figura 3.14 – Requisitos de iluminação para diferentes atividades e ambientes.

Tipo de ambiente, tarefa ou atividade	$\overline{E_m}$ lux	UGR_L	R_a	Observações
Cercado para animais doentes, baias para parto de animais	200	25	80	
Preparação dos alimentos, leiteira, lavagem de utensílios	200	25	80	
3. Padarias				
Preparação e fornada	300	22	80	
Acabamento, decoração	500	22	80	

Fonte: norma NBR ISO/CIE 8995-1

A instrução normativa do Inmetro de 2021 especifica os critérios e os métodos para a classificação parcial da edificação para o sistema de iluminação quanto à sua eficiência energética. A avaliação é baseada no cálculo da Densidade de Potência de Iluminação (DPI), expressa em Watts por metro quadrado, conforme a equação (3.1).

$$DPI = \frac{\Sigma P_{lâmpadas}}{\text{Á}} \tag{3.1}$$

Onde:

DPI é a densidade de potência de iluminação;

$\Sigma P_{lâmpadas}$ é a somatório da potência de cada lâmpada do ambiente (W);

A é a área do ambiente (m²).

Este valor é comparado aos limites estabelecidos para edifícios comerciais, determinando se o sistema está sobrecarregado. A eficiência quanto ao consumo de energia do sistema de iluminação é classificada de acordo com uma escala que é elaborada com base na potência de iluminação limite considerando a classificação A e classificação D definida para cada tipo de ambiente/atividade (Figura 3.15). A definição das classes intermediárias da escala resulta da divisão do intervalo entre essas duas classes (A e D) em três partes, "i", conforme equação (3.2):

$$i = \frac{(DPI_D - DPI_A)}{3} \tag{3.2}$$

Onde:

i representa o intervalo de divisão para a definição das classes intermediárias de eficiência;

DPI_D é a densidade de potência de iluminação limite para a classificação D (W/m²);

DPI_A é a densidade de potência de iluminação limite para a classificação A (W/m²).

Figura 3.15 – Classificação da eficiência de consumo para diferentes atividades e ambientes.

Ambientes/Atividades	DPI_L Classif. A (W/m²)	DPI_L Classif. D (W/m²)
Auditórios e Anfiteatros		
Auditório	11,50	13,60
Centro de convenções	11,50	14,08
Cinema	12,25	14,97
Penitenciária	11,50	13,59
Teatro	21,85	41,92
Banco/escritório - área de atividades bancárias	10,00	23,84
Banheiros	9,15	13,73
Biblioteca		
Área de arquivamento	6,00	12,48
Área de leitura	8,85	16,00
Área de estantes	12,90	29,44
Casa de máquinas	4,65	9,60
Centro de convenções		
Espaço de exposições	9,50	24,96
Circulação	7,10	11,36
Área de vendas	13,15	28,96
Provador	5,40	16,32
Cozinhas	11,40	17,12
Depósitos	4,95	8,00
Dormitórios – alojamentos	6,65	10,47
Escadas	6,25	11,84
Escritório	10,00	19,04
Escritório – planta livre	8,70	16,80

Fonte: Inmetro (2021)

De acordo com o guia técnico do Bureau of Energy Efficiency (BEE) a eficiência de um sistema de iluminação é avaliada pela sua capacidade de fornecer o efeito luminoso

exigido com a menor carga instalada possível. A eficácia da carga instalada (ILE) medida em lux/W/m² e calculada de acordo com a equação (3.3), relaciona iluminância média mantida no plano horizontal por cada watt de potência do circuito.

$$ILE = \frac{E_m}{DPI} \tag{3.3}$$

Onde:

ILE é a eficácia da carga instalada (lux/W/m²);

E_mé a iluminância média mantida (lux);

DPI é a densidade de potência de iluminação (W/m²).

A eficiência luminosa é influenciada pela relação entre a área do recinto e a altura do plano de trabalho. Por isso a importância de se caracterizar a geometria do ambiente por meio do cálculo do índice do Recinto (IR), conforme a equação (3.4):

$$IR = \frac{L\,.W}{H_m.(L+W)} \tag{3.4}$$

Onde:

L é o comprimento da área (m);

W é a largura da área (m);

H_m é a altura de montagem, definida pela distância vertical entre a luminária e o plano de trabalho (m).

A eficácia alvo (target) é obtida através de tabelas normativas do BEE (figura 3.16), que estabelecem o valor ideal de lux/W/m^2 para o IR calculado e o tipo de atividade.

Figura 3.16 – Valores alvo para iluminância mantida de acordo com o índice do recinto e aplicações.

Room Index	*Commercial lighting, (Offices, Retail stores etc.) & very clean industrial applications, Standard or good colour rendering. Ra: 40-85*	*Industrial lighting (Manufacturing areas, Workshops, Warehousing etc.) Standard or good colour rendering. Ra: 40-85*	*Industrial lighting installations where standard or good colour rendering is not essential but some colour discrimination is required. Ra: 20-40*
5	*53 (1.89)*	*49 (2.04)*	*67 (1.49)*
4	*52 (1.92)*	*48 (2.08)*	*66 (1.52)*
3	*50 (2.00)*	*46 (2.17)*	*65 (1.54)*
2.5	*48 (2.08)*	*44 (2.27)*	*64 (1.56)*
2	*46 (2.17)*	*42 (2.38)*	*61 (1.64)*
1.5	*43 (2.33)*	*39 (2.56)*	*58 (1.72)*
1.25	*40 (2.50)*	*36 (2.78)*	*55 (1.82)*
1	*36 (2.78)*	*33 (3.03)*	*52 (1.92)*

Fonte: Bureau of energy efficiency (2015)

O indicador final de eficiência é o ILER (Installed Load Efficacy Ratio), calculado conforme a equação (3.5), consiste na razão entre a eficácia da carga instalada (ILE) e a eficácia alvo. Valores acima de 0,75 são considerados satisfatórios, enquanto valores iguais ou inferiores a 0,50 indicam a necessidade de intervenção e modernização do sistema.

$$ILER = \frac{ILE}{Eficácia\ Alvo} \tag{3.5}$$

Onde:

$ILER$ é o índice de eficácia da potência instalada;
ILE é a eficácia da carga instalada (lux/W/m²);
$Eficácia\ Alvo$ é o valor de referência obtido para o índice do recinto e aplicação (lux/W/m²);

- **Projeto de um sistema de iluminação**

O método de cálculo dos lúmens, usual para projetos luminotécnicos, e definido pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE), considera a quantidade total de fluxo luminoso necessária para determinado ambiente, baseada no tipo de atividade desenvolvida, nas refletâncias das superfícies (teto, paredes e piso) e nos tipos de equipamentos (luminárias, lâmpadas e equipamentos) escolhidos. O roteiro a ser seguido para os cálculos necessários consiste em: Escolha do nível de iluminamento (Em);

determinação do fator do local ou índice do Recinto (IR); escolha das lâmpadas e das luminárias; determinação do fator de utilização (Fu); determinação do fluxo total (Ft); cálculo do número de luminárias (n); distribuição das luminárias.

O nível de iluminamento deve ser escolhido em função do tipo de atividade visual a ser desenvolvida no local. A norma ABNT NBR 5413 (1992), sobre iluminância de interiores, apresenta tabelas de iluminância por classes de tarefas, fornecendo valores mínimo, médio e máximo para cada tipo de ambiente.

O índice do recinto (IR) é uma relação definida entre as dimensões do local (Equação (3.4)).

A definição dos equipamentos deve levar em consideração as características fotométricas das luminárias, o desempenho das lâmpadas e as características elétricas dos equipamentos auxiliares. As principais características das lâmpadas a serem consideradas são: eficiência luminosa (lm/W), fluxo luminoso, vida útil e depreciação luminosa.

O fator de utilização é a razão entre o fluxo útil que incide sobre o plano de trabalho e o fluxo total emitido. Seu valor depende da distribuição de luz e do rendimento da luminária, da reflexão do teto, paredes e plano de trabalho ou piso a do fator do local (IR). Pode ser encontrado em tabelas, como a ilustrada na figura 3.17, fornecidas pelo fabricante das lâmpadas ao se cruzar o valor do fator do local (IR) calculado com os dados de refletância da superfície.

Figura 3.17 – Exemplo para a determinação do Fator de utilização de luminárias

TETO (%)		70		50			30		0
PAREDE (%)	50	30	10	50	30	10	30	10	0
PISO (%)		10		10			10		0
KR	FATOR DE UTILIZAÇÃO (X.01)								
0.60	32	28	26	31	28	26	28	26	25
0.80	38	34	31	37	34	31	33	31	30
1.00	42	39	36	41	38	36	38	36	35
1.25	46	43	40	45	42	40	42	40	39
1.50	48	46	44	48	45	43	45	43	42
2.00	52	60	48	51	49	48	49	47	46
2.50	54	53	51	53	52	50	51	50	49
3.00	56	54	53	55	53	52	53	52	50
4.00	57	56	55	56	55	54	54	54	52
5.00	58	57	56	57	56	55	55	55	53

Fonte: PROCEL (2011)

O fluxo total é determinado pela expressão da equação (3.6):

$$fluxo\ total = \frac{Em.S}{Fu.Fm} \tag{3.6}$$

Onde:

$fluxo\ total$ é a quantidade total de fluxo luminoso necessária para o ambiente (lm);
Em corresponde à iluminância média mantida (lux);
S corresponde à área do ambiente (m²);
Fu corresponde ao fator de utilização;
Fm corresponde ao fator de manutenção;

O número de lâmpadas, determinado pela equação (3.7), é calculado ao se dividir o fluxo total necessário para o ambiente e o fluxo luminoso de cada lâmpada:

$$n = \frac{fluxo\ total}{fluxo\ luminoso} \tag{3.7}$$

Onde:

n é número de lâmpadas necessárias;
$fluxo\ total$ corresponde ao valor calculado para o ambiente (lm);
$fluxo\ luminoso$ corresponde ao fluxo luminoso de cada lâmpada (lm);

Por fim, o espaçamento entre as luminárias depende de sua altura ao plano de trabalho e da sua distribuição de luz. Esse valor situa-se geralmente, entre 1 a 1,5 vezes o valor da altura útil em ambas as direções. O espaçamento até as paredes deverá ser a metade desse valor. (Yamashita, 2006)

3.4.2. Motores elétricos

Os motores elétricos são máquinas que transformam energia elétrica em mecânica. Por apresentarem alta eficiência de conversão, o estudo da conservação de energia é realizado a partir do que está conectado ao eixo do motor, ou seja, da carga do sistema. Em alguns casos os motores de indução se encontram sobredimensionados, ou seja, acionando cargas muito inferiores à sua capacidade nominal, acarretando em baixos fatores de potência e rendimentos, contribuindo para a sua aplicação ineficiente. (DINIZ, 2007).

- **Análise de carregamento**

O objetivo da análise de carregamento não é determinar o rendimento de trabalho dos motores, mas justamente seu carregamento, para a observação de eventual sobredimensionamento. A avaliação das condições reais de carregamento dos motores elétricos deve ser feita a partir da obtenção de suas características de operação. Existem

diferentes métodos para a obtenção dessas características, que podem ser classificados em dois grandes grupos: métodos normalizados e métodos expeditos. (Bortoni, 2006)

A aplicação dos métodos normalizados é mais indicada em laboratório, tendo em vista sua complexidade pela necessidade de instrumentos e condições ideais para sua realização. Dentre esses métodos é possível destacar: ensaio através de freio mecânico, ensaio através de dinamômetro, ensaio com máquina calibrada, ensaio de oposição elétrica e mecânica, determinação das perdas separadamente, determinação das perdas totais e o método do diagrama circular com ensaio de frequência reduzida. Ainda assim, podem ocorrer discrepâncias entre os resultados das medições de rendimento, quando aplicado mais de uma vez em um mesmo motor.

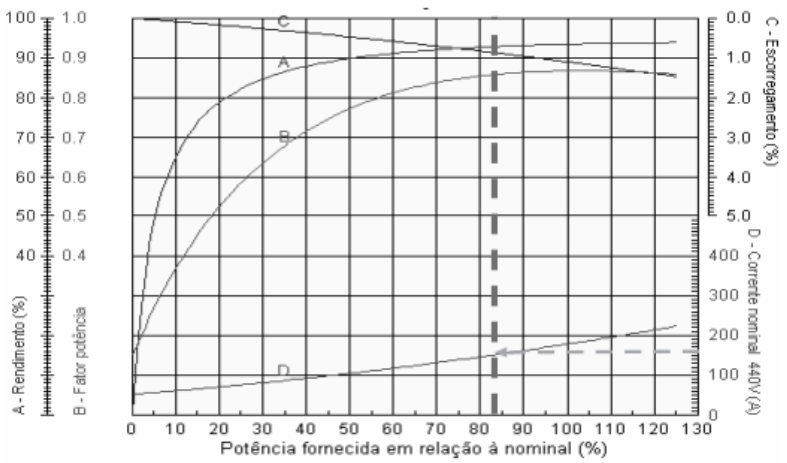
Já os métodos expeditos são mais fáceis de serem executados em campo. Se utilizam de medidas de corrente, rotação, dados de placa e catálogos de fabricante, e eventualmente, potência absorvida da rede.

- **Dados do fabricante**

Esta técnica de análise de carregamento se baseia em dados fornecidos pelo fabricante. O exemplo fornecido por Bortoni (2006) é o de um motor de projeto padronizado com potência de 100 cv, IV polos, em 440 V, operando com uma corrente de 150 A.

Leva-se a informação da corrente na curva do fabricante, mostrada na figura 3.18, para se obter a potência de trabalho, rendimento, fator de potência e outras informações. Verifica-se que a potência de trabalho deste motor é de aproximadamente 83%, ou seja, 85 cv, com um rendimento de 93 %.

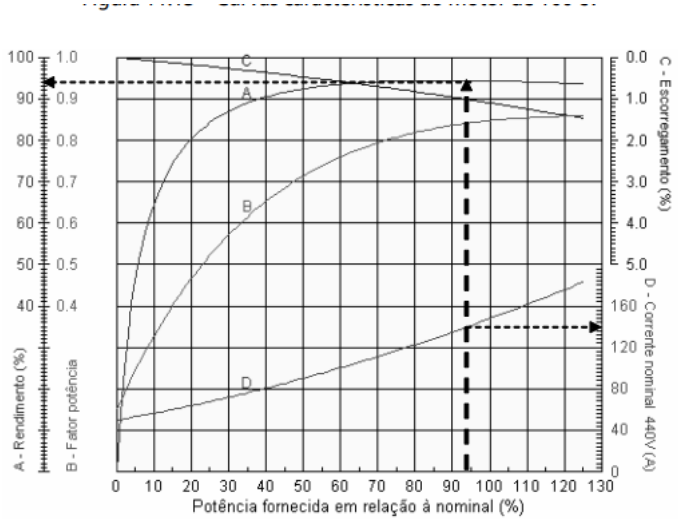
Figura 3.18 – Curvas características do motor de 100 cv



Fonte: Livro Conservação de Energia (2006)

Neste caso, poderia ser empregado um motor mais próximo da potência da carga, por exemplo, um motor de 90 cv de alto rendimento. Nestas novas condições, o novo rendimento seria de 93% e a corrente de trabalho de 140 A, como se vê na curva do fabricante mostrada na figura 3.19.

Figura 3.19 – Curvas características do motor de 90 cv



Fonte: Livro Conservação de Energia (2006)

3.4.3. Fornos elétricos

Segundo Mamede (2010) os fornos elétricos à resistência são os que utilizam o calor gerado por perdas Joule em uma resistência elétrica que é atravessada por uma corrente de alta intensidade. Pela lei de Ohm, a potência de um forno elétrico é estimada pela relação da equação (3.8):

$$P = V \,.\, I \tag{3.8}$$

Onde:

P é a potência (Watts)

V é a tensão (Volts);

I é a corrente (Amperes);

O trabalho realizado, ou energia consumida pelo forno, é mensurado conforme a equação (3.9):

$$W = P \,.\, t \tag{3.9}$$

Onde:

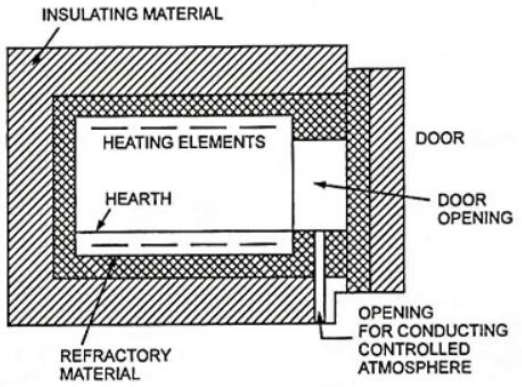
W é a energia consumida (Joule)

P é a potência (Watts);

t é o tempo (segundos);

Neste tipo de forno o material a ser processado fica contido em uma câmara isolada termicamente e o calor é transferido da resistência elétrica através dos fenômenos de condução, convecção e radiação. Normalmente, é construído com tijolos refratários ou outro material isolante térmico apoiado em uma estrutura metálica. A natureza do material necessário para o isolamento é determinada pela temperatura máxima da face interna da camada de isolamento da câmara. A estrutura e a configuração de um forno de resistência são apresentadas na figura 3.20.

Figura 3.20 – Forno à resistência



Fonte: EE GUIDE (2023)

A eficiência térmica dos fornos elétricos é elevada, se comparada à dos fornos à combustão, já que a perda térmica geralmente acontece de maneira expressiva apenas por mal isolamento. As perdas térmicas podem ser estimadas ao se efetuar o balanço da energia que passa pelo isolamento do forno. Para o caso específico de uma superfície em um meio, a exigência de conservação de energia é aplicada, considerando as superfícies de controle em ambos os lados do isolamento. Neste caso, a exigência da conservação de energia, de acordo com a equação (3.10), se torna:

$$E(in) = E(out) \tag{3.10}$$

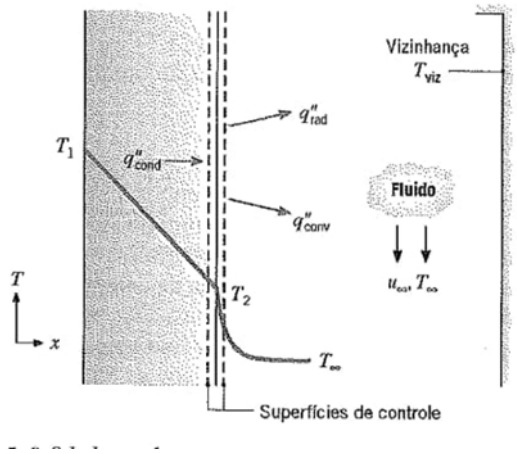
Onde:

$E(in)$ é a energia que entra na superfície de controle;

$E(out)$ é a energia que sai da superfície de controle;

Portanto, o calor que entra na superfície de controle (porta do forno) por condução deverá ser equivalente ao calor que sai por convecção e radiação, conforme é ilustrado na figura 3.21 e mensurado de acordo com a equação (3.11).

Figura 3.21 – Balanço de energia para a conservação de energia na superfície de um meio



Fonte: INCROPERA (2005)

$$q"(cond) = q"\,(rad) + q"(conv) \qquad (3.11)$$

Onde:

$q"(cond)$ é o calor que entra na superfície de controle por condução (J/kg.m²);

$q"\,(rad)$ é o calor que sai da superfície de controle por radiação (J/kg.m²);

$q"(conv)$ é o calor que sai da superfície de controle por convecção (J/kg.m²).

Atualmente, a fabricação e comercialização de fornos elétricos comerciais no Brasil são regidas pela Portaria Inmetro nº 267/2021, que estabelece os Requisitos de Avaliação da Conformidade (RAC), focando na segurança elétrica e na declaração do consumo de energia para fins de etiquetagem. Entretanto, a relevância da eficiência energética no setor tem levado a uma revisão dos critérios atuais. Recentemente, o Inmetro promoveu uma consulta pública visando atualizar a regulamentação de fornos elétricos comerciais. Segundo o Inmetro, a revisão se tornou necessária para dar clareza sobre o que está abrangido pela regulamentação, para se alinhar às normas internacionais mais recentes e para haver a incorporação de novas diretrizes de etiquetagem.

A norma internacional ASTM F1496-22 (Standard Test Method for Performance of Convection Ovens), difere da regulamentação nacional por propor a classificação da eficiência do forno baseada na decomposição do seu comportamento energético em três estados críticos:

1. **Energia de Pré-aquecimento (Preheat Energy):** Mensura o consumo e o tempo necessários para que a câmara atinja o regime estável. Reflete a inércia térmica e a potência do sistema.
2. **Taxa de Energia em Repouso (Idle Energy Rate):** Avalia o consumo energético necessário para manter a temperatura estável sem carga. Este parâmetro é o indicador mais preciso da qualidade do isolamento térmico e da estanqueidade das vedações, pontos fundamentais em auditorias de equipamentos em uso.
3. **Eficiência de Cozimento (Cooking Energy Efficiency):** Quantifica a parcela da energia consumida que é efetivamente transferida para o alimento, considerando o balanço entre calor sensível e latente.

A eficiência térmica (η) é fundamentada no balanço de energia absorvida pelo produto, conforme a equação (3.12):

$$\eta = \frac{m.c_p.\left(T_f - T_i\right) + m_{evap}.L_v}{E_{forno}}.100 \qquad (3.12)$$

Onde:

m é a massa da fornada (kg);

c_p é o calor específico da massa (kJ/kg x °C);

T_f e T_i são as temperaturas final e inicial do miolo (°C);

m_{evap} é a massa de água evaporada (kg);

L_vé o calor latente de vaporização da água (kJ/kg);

E_{forno} é a energia total consumida no ciclo (kJ).

Os resultados obtidos permitem a comparação direta com *benchmarks* internacionais de eficiência energética. O principal referencial para fornos de convecção comerciais é o programa **Energy Star**, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA), que utiliza os ensaios da ASTM para certificar os equipamentos. Para fornos elétricos de convecção, o programa estabelece que a eficiência de cozimento (*Cooking Energy Efficiency*) deve ser igual ou superior a **70%**, enquanto a taxa de energia

em repouso (*Idle Energy Rate*) não deve ultrapassar **2,0 kW** para modelos de tamanho padrão.

- **Sistemas de controle de temperatura**

Um sistema de controle de temperatura é um conjunto de tecnologias projetado para monitorar e ajustar a temperatura de um ambiente, equipamento ou processo industrial, mantendo-o dentro de limites específicos e seguros. (KALATEC, 2022).

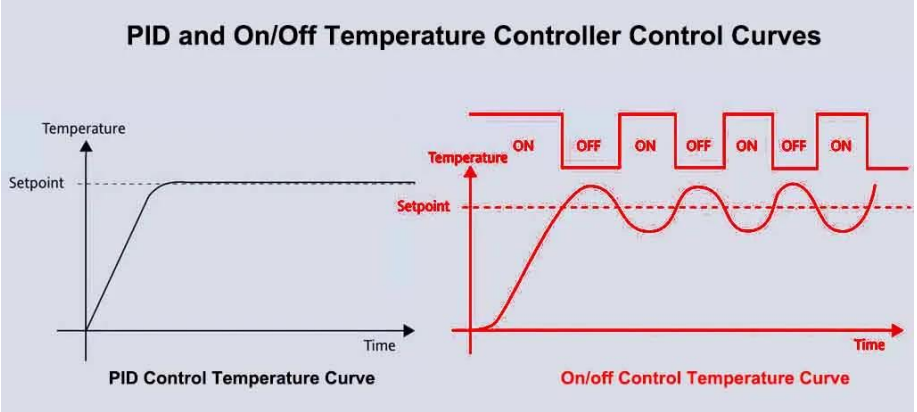
O sistema de temperatura do tipo on/off é o mais simples possível. É composto por um sensor (que lê a temperatura), controlador (cérebro do sistema) e atuador (relé, contator ou válvula que liga/desliga). No caso de um forno elétrico, a resistência é ligada quando a temperatura atinge um limite e desligada quando atinge outro. Devido à inércia térmica a temperatura continua a subir ou descer mesmo após o equipamento ser desligado, e esta oscilação constante causa desgaste mecânico nos contatores e válvulas além de maior consumo de energia devido aos picos de acionamento.

O sistema de controle PID (proporcional, integral e derivativo) é o algoritmo de controle mais utilizado para processos que exigem precisão e estabilidade. Diferente do sistema on/off o PID calcula continuamente a diferença entre a temperatura desejada e a real, aplicando a quantidade exata de energia necessária.

A ação proporcional olha para o erro atual. Se a temperatura está muito longe do alvo, ele aumenta potência. Conforme a temperatura se aproxima do alvo, ele reduz a potência. A ação integral acumula o erro ao longo do tempo. Se o sistema travou a 2°C abaixo do alvo e não sai disso, a ação integral percebe a demora e vai aumentando a energia gradativamente até eliminar o erro. A ação derivativa, por sua vez, analisa a velocidade da mudança. Se a temperatura está subindo rápido demais, o Derivativo "pisa no freio" antes do tempo para evitar que o sistema passe do ponto (overshoot). Ele age como um amortecedor contra variações bruscas.

Enquanto o On-Off faz a temperatura subir e descer em ondas de forma contínua, o PID estabiliza a temperatura exatamente em cima do valor desejado, gerando economia de energia, como mostra a figura 3.22. (LORENTZZI, 2024)

Figura 3.22 – Curvas de flutuação de temperatura dos sistemas de controle PID e On/Off.



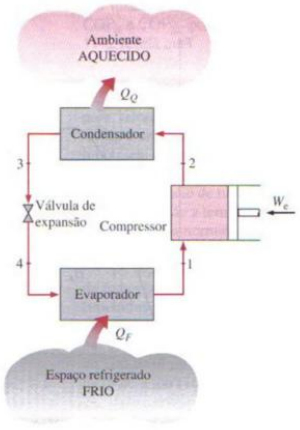
Fonte: Lorentzzi (2024)

3.4.4. Sistemas de refrigeração

De acordo com Matos (2004), a refrigeração "consiste no processo de retirar calor de um corpo ou espaço para reduzir sua temperatura e transferir este calor para um outro espaço ou corpo". De maneira natural, a transferência de calor ocorre da fonte de maior temperatura para a fonte de menor temperatura. A refrigeração possibilita a realização do processo inverso, ao transferir, portanto, o calor do espaço de menor temperatura para o de maior temperatura.

A operação dos refrigeradores ocorre de forma cíclica, com o fluido refrigerante atuando como fluido de operação em um circuito fechado. Na figura 3.23 é ilustrado o ciclo de refrigeração a vapor, que consiste em quatro elementos principais: compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador.

Figura 3.23 – Ciclo teórico de refrigeração a vapor



Fonte: Çengel e Boles (2007)

Compressor: comprime o refrigerante da fase de pressão de evaporação para a fase de pressão de condensação.

Condensador: O refrigerante comprimido de alta temperatura condensa após rejeitar o calor através do trocador para o meio externo.

Válvula de expansão: A temperatura e pressão do refrigerante caem de maneira expressiva devido ao estrangulamento à medida que o refrigerante passa pelo tubo capilar.

Evaporador: O refrigerante de baixa temperatura evapora à medida que absorve o calor do espaço refrigerado. Em seguida, o fluido de trabalho retorna ao compressor e o ciclo é concluído.

A eficiência energética dos refrigeradores é representada pelo coeficiente de performance (COP), que é a razão entre o calor absorvido do espaço refrigerado e o trabalho necessário que entra no compressor.

O Brasil ainda não possui um sistema de registros de produtos ou um regulamento de eficiência energética para refrigeradores comerciais. O projeto “Marco Nacional para Aceleração da Eficiência Energética e Redução de Emissões nos Refrigeradores Comerciais no Brasil”, financiado pelo Fundo Verde para o Clima (Green Climate Fund – GCF), e coordenado pelo Ministério de Minas e Energia visa estabelecer as bases para a implementação de Padrões Mínimos de Eficiência Energética (MEPS, na sigla em inglês), além de etiquetas comparativas e/ou selos de endosso e outras políticas de eficiência energética no Setor de refrigeração comercial no Brasil. Para isso, o projeto tem como base as informações obtidas do relatório de “Mapeamento do Mercado de Refrigeradores Comerciais” realizado pelo PROCEL em dezembro de 2021 e também uma pesquisa complementar realizada pela própria GCF. (MME, 2021; PROCEL, 2021).

O estudo realizado pelo PROCEL propôs analisar o mercado de refrigeradores, com entrevistas junto à indústria e usuários finais. Dentre os principais resultados, foi verificado que 95% dos refrigeradores utilizados no Brasil são de fabricantes instalados no país, e os principais clientes de refrigeradores comerciais são hipermercados, supermercados, bares, lanchonetes, lojas de conveniência, restaurantes e padarias. Os equipamentos podem ser vendidos diretamente ao cliente e instalados pelo fabricante de refrigeradores, ou por meio de uma distribuidora. Na figura 3.24 são indicados os 7 maiores fabricantes de refrigeradores comerciais no Brasil, os quais detêm 70% do mercado, sendo que os outros 30% são divididos entre mais de 200 empresas de menor porte. Para os refrigeradores comerciais integrais (com compressor incorporado), assim

como os refrigeradores de bebidas, conservadores de sorvetes, refrigeradores multiuso, e outros, as empresas Metalfrio e Imbera são as principais, e atuam fortemente no setor institucional.

Figura 3.24 – Fabricantes de refrigeradores comerciais no Brasil

Fabricantes Principais	Volume de vendas 2020 em 1000 unidades
Metalfrio Solutions	270
Mercofricon	230
Imbera	130
Gelopar	100
Refrimate	70
Esmaltec	30
Eletrofrio	18
Outros Fabricantes	
Arneg	Sem informação
Plotter Racks	Sem informação
AHT Service	Sem informação
Venax Eletrodomésticos	Sem informação
Conservex	Sem informação
Castellmaq	Sem informação
Kofisa	Sem informação
Ártico	Sem informação
Polofrio	Sem informação
Polar	Sem informação
outros	Total vendas outros = 343
Tota de venda Brasil	1.191

(Fonte: estudo do PROCEL [1])

Fonte: Estudo do PROCEL (2021)

A maior parte dos fabricantes acredita que uma movimentação para a aquisição de compressores de velocidade variável não seria feita voluntariamente, dado ao seu alto custo em comparação com o compressor padrão. Da mesma forma, outras tecnologias energeticamente mais eficientes e mais caras, como vidros low-e, sensores e controladores inteligentes, entre outros, dependem de normatização ou programas governamentais de incentivo para uma adesão mais ampla.

A GCF realizou uma pesquisa complementar com os fabricantes, de forma a obter dados mais detalhados acerca dos diferentes tipos de refrigeradores comerciais produzidos.

De 70 modelos encaminhados pelos fabricantes, 48 modelos cumpriam com a definição de refrigerador de bebidas adotada na ISO 22044:2021. É apresentado na figura 3.15 o consumo de energia desses equipamentos, cujos ensaios experimentais foram conduzidos sob condições controladas de temperatura e umidade relativa ambientes, parametrizadas a 32,2 °C e 65% de Umidade Relativa (UR).

Figura 3.25 – Consumo de energia dos modelos de refrigeradores de bebidas e os "MEPS" da união europeia (2021 e 2023) e México.

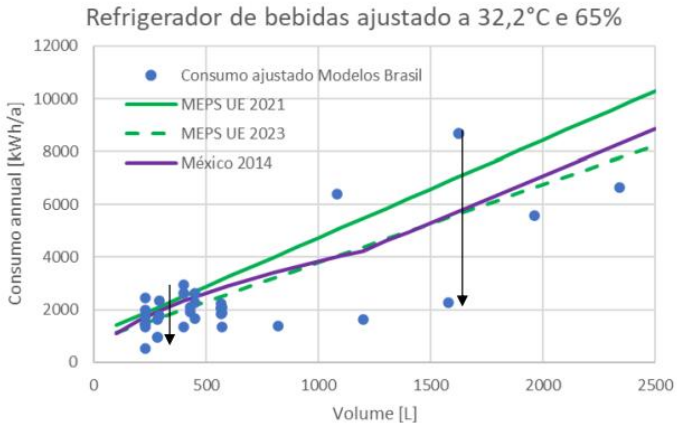


Figura 3 Consumo de energia dos modelos de refrigeradores de bebidas e os MEPS da União Europeia (2021 e 2023) e México ajustado a 32,2°C e 65% UR

Fonte: Estudo do PROCEL (2021)

Para os modelos em estudo, 6 modelos não passariam nos MEPS da União Europeia para 2021, e 11 modelos não passariam nos MEPS que serão adotados a partir de 2023. Seriam ainda 9 modelos que não passariam os MEPS atuais do México.

O índice de eficiência (Ie) é definido como a razão entre o consumo de energia mensal e o consumo padrão mensal. O valor de Ie, calculado de acordo com a equação (3.13), é representado em porcentagem, e quanto maior, menor a eficiência do modelo avaliado.

$$I_e = \frac{CE_M}{C_p} \tag{3.13}$$

Onde:

I_e é o índice de eficiência;

CE_M é o consumo de energia mensal (kW.h);

C_p é o consumo padrão mensal (kW.h).

O consumo padrão está relacionado com o consumo de energia equivalente ao volume interno do espaço refrigerado. Normalmente, as equações básicas do consumo padrão são construídas a partir de dados de consumo no mercado e/ou modelos matemáticos que simulam a eficiência dependendo das características técnicas dos refrigeradores. O seu cálculo pode ser representado pela equação (3.14):

$$C_P = 30 \cdot (M + N \cdot Vb) \cdot C \quad (3.14)$$

Os parâmetros M e N são mostrados na figura 3.26 e definem a equação do consumo.

Figura 3.28 – Parâmetros M e N para o cálculo do consumo padrão.

Tipo de refrigerador comercial	Valor de M	Valor de N
Expositor Frigorífico Vertical e Combinado para Resfriados	9,1	9,100
Expositor Frigorífico Horizontal para Resfriados	4,4	4,200
Expositor Frigorífico Vertical e Combinado para Congelados	7,5	19,300
Expositor Frigorífico Horizontal para Congelados	4,0	10,300
Refrigerador de Bebidas	2,9	0,008
Congelador para Sorvetes	2,0	0,009
Congelador Horizontal com Porta Cega (2025)	0,325	298,6
Congelador Horizontal com Porta Cega (2030)	0,209	192,6

Fonte: Estudo do PROCEL (2021)

C faz referência ao coeficiente compensatório para diferentes temperaturas do compartimento (figura 3.27).

Figura 3.27 – Coeficiente compensatório para classe de temperatura.

Tipo de refrigerador	Classe de Temp.	Coeficiente C proposto Brasil
Refrigerador de Bebidas (fechado sem abertura de portas) Classe de temperatura: ISO 22044:2021	K5**	1,25
	K3	1,20
	K2	1,08
	K1	1,04
	K4*	1,00
Expositor Frigorífico para resfriados (horizontal e vertical; aberto e fechado) Classe de temperatura: ISO 23953-2	M0	1,15
	M1	1,10
	M	1,05
	M2*	1,00
	H2	0,92
	H1	0,85
Expositor Frigorífico para congelados (horizontal e vertical; aberto e fechado) Classe de temperatura: ISO 23953-2	L1*	1,00
	L2	0,92
	L3	0,92
Congelador para sorvetes Classe de temperatura: ISO 22043:2020	C1*	1,00
	C2	0,70

*Classe de temperatura de referência

Fonte: Estudo do PROCEL (2021)

Segundo a norma ISO 22044, a classe de temperatura é K1 quando a temperatura interna varia entre 0 e 7 °C, K2 quando varia entre -1 e 6 °C, K3 quando varia entre -3,5 e 1°C e K4 quando varia entre 1 e 9°C.

No relatório “Recomendações para as métricas, normas de ensaio e níveis de MEPS e Etiquetas dos Refrigeradores Comerciais no Brasil” publicado em abril de 2023,

foi previsto a implementação dos MEPS (“Padrões mínimos de eficiência energética”) para os refrigeradores de bebidas em duas etapas, sendo a primeira em 2025 com o índice máximo de eficiência Ie até 100%, e a segunda em 2028 com Ie máximo de 80%. Na figura 3.28 é mostrado os níveis e também a estimativa da porcentagem de modelos que ficariam fora dos MEPS em cada uma das etapas, e compara com os níveis de MEPS da União Europeia.

Figura 3.28 – Níveis de “MEPS” recomendados; a percentagem de modelos que ficariam fora dos “MEPS”.

Tipo	Brasil MEPS 2025	Não cumprem 2025	Brasil MEPS 2028	Não cumprem 2028	EU 2021	EU 2023	MR U4E
Refrigerador de Bebidas	**100%**	18%	**80%**	32%	100%	80%	100%

Fonte: Estudo do PROCEL (2021)

Na figura 3.29 são apresentados os níveis das classes de eficiência das duas etiquetas propostas para o refrigerador de bebidas. Neste caso, a etiqueta E.1 seria utilizada por cinco anos (entre 2025 e 2030) e em 2030 seria atualizada com os níveis da etiqueta E.2.

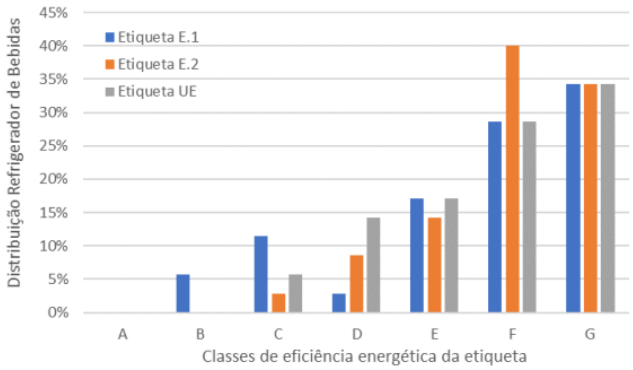
Figura 3.29 – Níveis de eficiência das etiquetas propostas para o refrigerador de bebidas

Classe	Etiqueta 1 (2025 – 2030)	Etiqueta 2 (2030 – 2035)	União Europeia (desde 2021)
A	$I_e < 28\%$	$I_e < 17\%$	$I_e < 10\%$
B	$28\% \leq I_e < 35\%$	$17\% \leq I_e < 23\%$	$10\% \leq I_e < 20\%$
C	$35\% \leq I_e < 43\%$	$23\% \leq I_e < 31\%$	$20\% \leq I_e < 35\%$
D	$43\% \leq I_e < 53\%$	$31\% \leq I_e < 42\%$	$35\% \leq I_e < 50\%$
E	$53\% \leq I_e < 65\%$	$42\% \leq I_e < 58\%$	$50\% \leq I_e < 65\%$
F	$65\% \leq I_e < 80\%$	$58\% \leq I_e < 80\%$	$65\% \leq I_e < 80\%$
G	$I_e \geq 80\%$	$I_e \geq 80\%$	$I_e \geq 80\%$
Melhoria por classe	≈ 19%	≈ 27%	Variável

Fonte: Estudo do PROCEL (2021)

Na Figura 3.30 é mostrada uma estimativa da distribuição de eficiência energética dos modelos de Refrigeradores de Bebidas, obtida durante a pesquisa de mercado com os fabricantes, para as etiquetas propostas E.1 e E.2 e também na etiqueta da EU.

Figura 3.30 – Distribuição de eficiência energética dos modelos de refrigeradores de bebidas obtidos durante a pesquisa de mercado com os fabricantes nas etiquetas propostas.



Fonte: Estudo do PROCEL (2021)

3.5. Análises econômicas de investimento

Carvalho (2014) define o investimento de uma organização empresarial como o comprometimento de capital cujo caráter é durável, tendo por expectativa manter ou agregar valor à organização em sua situação econômica. Para ele, os diferentes tipos de investimento podem ser classificados em sua natureza quanto ao objetivo proposto, forma física, e impacto potencial.

Quanto ao objetivo proposto, os investimentos podem ser de reposição, modernização ou para expansão da capacidade. Reposição quando os equipamentos são trocados por outros mais novos, mas com as mesmas características, ou seja, mesma capacidade de produção e custos operacionais. Neste caso, a intenção do tomador de decisão é apenas executar as mesmas tarefas com o equipamento novo. Modernização quando há a adoção de um novo modo de organização da produção, visando melhorar a produtividade, qualidade dos produtos ou serviços, flexibilidade do sistema produtivo, etc. E, expansão da capacidade quando há a intenção de ampliar as atividades da organização, permitindo atender o crescimento futuro de demanda.

Quanto à forma física, os investimentos podem ser materiais quando são constituídos pela compra de máquinas ou equipamentos, construção de edificações destinadas à produção ou estoques e contas a receber. Podem ser imateriais os investimentos de longo prazo aplicados com a intenção de manter ou melhorar os resultados, como em pesquisa e desenvolvimento, formação e capacitação de pessoal, estrutura de gestão, pesquisa de mercado, e etc.

Quanto ao impacto potencial à organização, os investimentos podem ser classificados como investimentos correntes e estratégicos. Os investimentos correntes são os considerados de baixo nível de risco, ou risco normal do negócio. São considerados de baixo risco os investimentos de substituição, modernização e expansão, relacionados aos produtos atuais da empresa, seja na forma material ou imaterial. Já os estratégicos, são os investimentos de maior risco, que em caso de sucesso poderão fornecer uma grande oportunidade de desenvolvimento para a empresa, mas em caso de fracasso, poderão colocar em risco a sua capacidade de sobrevivência.

3.5.1. Técnicas de análise de investimento

Para avaliar os possíveis retornos e riscos associados à projetos financeiros é aplicadas algumas técnicas de análise como payback simples, valor presente líquido (VPL), e taxa interna de retorno (TIR).

- **Payback simples**

Segundo Lima (2019) o payback, ou tempo de retorno, é o período necessário para que o fluxo operacional do caixa do projeto recupere o valor investido. É uma ferramenta de fácil aplicação, e o período pode ser calculado considerando ou não o custo de capital. No caso do payback simples, se considera apenas o custo do investimento e seu benefício, desprezando o custo de capital, ou taxa de juros. Pode ser calculado pela equação (3.15):

$$n = \frac{I}{A} \tag{3.15}$$

Onde:

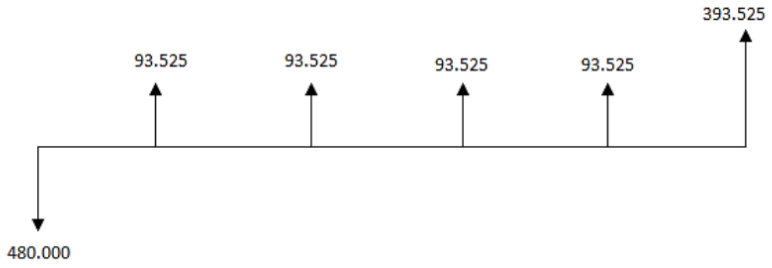
n representa o número de períodos, geralmente em anos ou meses, necessários para se recuperar o investimento;

I representa o investimento inicial (R$);

A é o fluxo de caixa periódico. É o valor constante do benefício financeiro, lucro líquido ou economia gerada em cada período (R$).

Lima (2019) sugere um exemplo para simplificar o entendimento. Neste caso, é apresentado o fluxo de caixa do projeto, conforme a figura 3.31, com um investimento inicial de 480 mil dólares, um retorno anual de 93,525 mil dólares do primeiro ao quarto ano e 393,525 mil dólares no quinto ano.

Figura 3.31 – Fluxo de caixa do exemplo



Fonte: Livro Viabilidade econômica e financeira de projetos (2019)

Para calcular o tempo de retorno, ele somou o valor acumulado dos primeiros quatro anos e verificou que ainda restava 105,9 mil para integralizar o valor inicialmente investido. Portanto, no quinto ano, apenas uma fração do período seria necessária para 'pagar' o valor restante, que foi calculado dividindo este valor restante pelo fluxo de caixa do período:

$$n = 4 + \frac{105{,}9}{393,525} = 4{,}27$$

Portanto, neste exemplo, o período necessário para se recuperar o valor inicial investido foi de 4,27 anos, ou aproximadamente 51 meses.

- **Valor presente líquido (VPL)**

O método do valor presente líquido, segundo Carvalho (2014), compara na data em que o projeto terá seu início todas as entradas e saídas existentes projetadas no fluxo de caixa, trazendo esses valores futuros para a data inicial descontando o custo de capital da empresa. É a diferença, portanto, entre o valor presente das entradas futuras menos o valor presente dos desembolsos futuros. É calculado conforme o modelo matemático da equação (3.16):

$$VPL = \left[\frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \frac{FC_3}{(1+i)^3} + \cdots \frac{FC_n}{(1+i)^n}\right] + (-FC_0) \qquad (3.16)$$

Onde:

VPL: Valor presente líquido. É o resultado final que indica a viabilidade do projeto em valores monetários de hoje. (R$);

$FC_1, FC_2, FC_3 \ldots FC_n$ Representam os fluxos de caixa esperados em cada período (1, 2, 3 até o período final n). São as entradas ou saídas de dinheiro futuras. (R$);

FC_0 Representa o fluxo de caixa Inicial (investimento no tempo zero). (R$).

i É a taxa de desconto ou custo de capital. É a taxa de juros utilizada para trazer os valores futuros para o valor presente.

O VPL positivo significa que o projeto está aumentando a riqueza da empresa em além da remuneração do capital. O autor explica que quanto maior for o VPL, melhor será o projeto, pois estará gerando caixa suficiente para pagar os juros e remunerar os acionistas da empresa. Caso o VPL calculado fosse negativo, a aprovação deste projeto significaria uma perda financeira para a empresa.

- **Taxa interna de retorno (TIR)**

Carvalho (2014) define a taxa interna de retorno (TIR) como a taxa de desconto que iguala o valor presente líquido (VPL) dos fluxos de caixa de um projeto a zero. Segundo ele, o projeto deve ser aceito quando esta taxa superar o custo de capital, "significando que as aplicações da organização estarão rendendo mais que o custo dos recursos usados na entidade como um todo." A forma para seu cálculo, de acordo com a equação (3.17), é:

$$VPL = \left[\frac{FC_1}{(1+TIR)^1} + \frac{FC_2}{(1+TIR)^2} + \frac{FC_3}{(1+TIR)^3} + \cdots \frac{FC_n}{(1+TIR)^n}\right] = 0 \qquad (3.17)$$

Onde:

VPL: Valor presente líquido. É o resultado final que indica a viabilidade do projeto em valores monetários de hoje. (R$);

$FC_1, FC_2, FC_3 \ldots FC_n$ Representam os fluxos de caixa esperados em cada período (1, 2, 3 até o período final n). São as entradas ou saídas de dinheiro futuras. (R$);

TIR é taxa de desconto que iguala o valor presente líquido (VPL) dos fluxos de caixa do projeto a zero.

Portanto, quando o VPL é zero, obtem-se a taxa interna de retorno, que será comparada com o custo de capital. Se for maior, a análise deve recomendar o investimento no projeto.

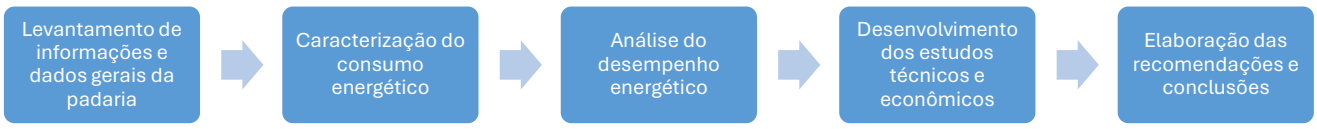
4. METODOLOGIA

Esta seção apresenta a metodologia aplicada no desenvolvimento da auditoria energética e na modelagem econômica do estabelecimento. Os procedimentos adotados fundamentaram-se em diretrizes de eficiência energética e normas técnicas nacionais e internacionais específicas para cada equipamento e subsistema.

4.1. Escopo da auditoria

O escopo da auditoria compreende a avaliação do uso de energia nos sistemas produtivo e comercial da padaria, em um nível de detalhamento suficiente para identificar as principais fontes de consumo, analisar o desempenho energético dos principais subsistemas, avaliar as viabilidades técnicas e econômicas de possíveis implementações e recomendar as melhores alternativas. Para o desenvolvimento do diagnóstico, as etapas de campo e análise foram estruturadas de acordo com as diretrizes da norma ISO 50002:2014, seguindo a sequência de atividades adaptada e apresentada na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Fluxograma das etapas da auditoria energética



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4.2. Levantamento das informações gerais da empresa

Esta etapa consiste na coleta de informações e dados gerais da padaria abrangendo a localização, tamanho, nível de produção, horário de funcionamento, número de funcionários, histórico de consumo de energia. Esta primeira aproximação é fundamental para entender o contexto e as necessidades específicas da empresa, identificar oportunidades e direcionar as ações da auditoria de forma eficaz. Para a coleta das informações foram feitas entrevistas com os gestores, análise de documentos e visitas ao local.

4.3. Caracterização do consumo

Para ter uma visão clara e detalhada do modo de consumo, esta etapa consiste em identificar os sistemas, processos e equipamentos e quantificar o nível de energia que cada um deles consome. A análise do perfil do consumo permite entender os padrões e como eles afetam os custos, permite identificar oportunidades de redução, desenvolver estratégias e estabelecer uma base para avaliar a eficácia de medidas.

Foram feitas visitas ao local para observar os processos e mapear os principais equipamentos. Para estimar a contribuição de cada equipamento para o consumo mensal, conforme a equação (4.1), foi necessário obter a potência de cada um e medir o tempo médio diário em que cada equipamento é usado.

$$E = P.t \tag{4.1}$$

Onde:

E é a energia consumida mensalmente por cada equipamento (kWh/mês);

P é a potência de cada equipamento (kW);

t é o tempo médio em que cada equipamento é usado (h/mês).

Para alguns equipamentos, como a maioria dos freezers, a potência nominal é encontrada na etiqueta onde há as informações técnicas. (figura 4.2)

Figura 4.2 – Placa de identificação técnica de um refrigerador comercial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Uma forma alternativa de quantificar a potência é por meio da medição da corrente de operação usando um amperímetro alicate. (figura 4.3)

Figura 4.3 – Amperímetro alicate.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Cálculo da potência (Equação (4.2)):

$$P = \frac{I.U.FP}{1000} \tag{4.2}$$

Onde:

P é a potência calculada (kW);

I é o valor da corrente medida (A);

U é a tensão da rede (V);

FP é o fator de potência (adimensional).

O tempo médio diário de funcionamento de cada freezer foi estimado por meio da observação direta e periódica do tempo de desarme do motor do compressor. Já o tempo médio de outros equipamentos, como a masseira e o cilindro, foram estimados através de entrevistas e também por meio do acesso às câmeras de monitoramento.

Somente o consumo médio diário do forno foi calculado de maneira diferente, já que a potência e o tempo de cocção variam ao longo do dia de acordo com cada produto. Essa variação é monitorada pela corrente de linha indicada no amperímetro do equipamento (figura 4.4). A intensidade da corrente muda conforme o arranjo operacional: o acionamento isolado da resistência do piso (lastro), o acionamento simultâneo das resistências do piso e do teto, ou a comutação do circuito interno entre as ligações estrela (Y) e triângulo (Δ).

Cálculo da potência do forno (Equação (4.3)):

$$P = \frac{I_L.U.\sqrt{3}.FP}{1000} \tag{4.3}$$

Onde:

P é a potência calculada (kW);

I_L é o valor da corrente medida (A);

U é a tensão da rede (V);

FP é o fator de potência (adimensional).

Figura 4.4 – Amperímetro analógico do forno.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Foram medidos os intervalos de tempo ao longo do dia para cada nível de potência e o consumo médio diário de energia do forno foi calculado pela soma do consumo de cada período.

4.4. Analise do desempenho energético

A caracterização do modo de consumo facilitou o direcionamento da etapa de análise do desempenho dos subsistemas. O diagnóstico analítico dos principais consumidores de energia permitiu a identificação de ineficiências, desperdícios e inconformidades frente aos padrões normativos de desempenho energético, além de também fundamentar a identificação de oportunidades tanto para a redução do consumo de energia quanto para o aumento da eficiência de alguns equipamentos.

4.4.1. Iluminação

A avaliação do sistema de iluminação teve por objetivo verificar o nível de conservação de energia e a conformidade da instalação em relação aos requisitos de desempenho funcional. Para isso, a metodologia baseou-se em três pilares normativos: o guia do Bureau of Energy Efficiency (BEE), a norma NBR ISO/CIE 8995-1 e a instrução normativa do Inmetro relacionada à iluminação e eficiência energética de 2021.

O levantamento para as análises incluiu a caracterização da carga instalada e das dimensões geométricas do recinto. Os dados de iluminância foram coletados por meio de um luxímetro digital (figura 4.5), posicionado no plano de trabalho, seguindo as

recomendações de malha de pontos e procedimentos da NBR ISO/CIE 8995-1. A análise dos dados seguiu os critérios específicos de cada norma.

Figura 4.5 – Luxímetro digital.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O valor calculado para a iluminância média foi comparado diretamente com os valores exigidos em tabelas de iluminância mantida para atividades de panificação e comércio. A eficiência da carga instalada foi quantificada através do cálculo da Densidade de Potência de Iluminação (DPI), expressa em W/m². O cálculo seguiu a relação entre a potência nominal total das lâmpadas e a área útil do recinto. O resultado permitiu classificar o nível de eficiência energética da edificação de acordo com os limites estabelecidos para o setor comercial. A eficácia do sistema foi determinada por meio do cálculo do Installed Load Efficacy Ratio (ILER). Para isso, calculou-se o Índice do Recinto (IR), que relaciona as dimensões da área com a altura de montagem, para a definição da Eficácia Alvo (Target Efficacy). O propósito desta análise foi classificar a eficácia da conversão de energia elétrica em luz útil.

4.4.2. Masseira

Dentre os equipamentos de processamento, que convertem energia elétrica em mecânica por meio dos motores elétricos, a masseira foi selecionada para análise devido ao seu nível significativo de consumo. A abordagem de análise de eficiência em motores elétricos consiste em avaliar possível sobredimensionamento do motor para a carga de operação e avaliar o seu rendimento. Para realizar as análises foi necessário acessar a placa de identificação do motor (figura 4.6), que no caso da masseira, é localizada na parte interna do equipamento. A placa fornece informações importantes, como o modelo,

tipo de motor, a potência, tensão, corrente e rotação nominais, e também o regime de operação.

Figura 4.6 – Placa de identificação do motor da masseira já desgastada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Devido ao desgaste da placa, não foi possível identificar o modelo exato do motor, então foi utilizada a curva de desempenho de um motor semelhante (W22 dahlander) para comparar os parâmetros de operação. Após medir a corrente de operação com o amperímetro, essa informação é usada na curva de desempenho fornecida pelo fabricante para determinar a potência de trabalho, rendimento e fator de potência. Com esses dados, é possível avaliar se o motor está sobredimensionado para a carga de operação, comparando os parâmetros de operação reais com os valores nominais da curva de desempenho. A perda de energia pode ser estimada de acordo com a equação (4.4):

$$Perda = (1 - \eta).CE_M \tag{4.4}$$

Onde:

$Perda$ é o valor calculado para a perda de energia mensal (kW.h/mês);

η é o rendimento estimado do motor em valor decimal;

CE_M é o consumo mensal de energia do motor (kW.h/mês).

4.4.3. Forno

A análise da eficiência do forno elétrico consistiu em avaliar as perdas de calor através do isolamento da porta, por ser um fator significativo na eficiência geral do

equipamento, e também em avaliar o comportamento do forno em seus três estados críticos: Pré-aquecimento, em repouso e cozimento.

O sistema de abertura e fechamento das portas ocorre por meio de um mecanismo de cremalheira interposto entre as portas (figura 4.7). Por ser constituído de material ferroso de alta condutividade térmica e apresentar ausência de elementos de vedação térmica, esse conjunto atua como uma ponte térmica crítica e uma via de escape de massa de ar.

Figura 4.7 – Parte frontal do forno



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Foram realizadas medições periódicas das temperaturas da superfície externa da porta e da cremalheira ao longo do dia, utilizando um termômetro infravermelho (figura 4.8), de acordo com a variação da temperatura interna do forno. Além disso, foram medidas as dimensões da porta e da cremalheira para calcular a área de transferência de calor.

Figura 4.8 – Termômetro infravermelho



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O material de revestimento externo da porta foi considerado como alumínio, e o material da cremalheira foi identificado como ferro fundido. No entanto, o material isolante da porta não pôde ser identificado, mas o coeficiente de transferência de calor do isolamento foi estimado através de cálculos.

As temperaturas médias, interna e externa, foram utilizadas no cálculo do balanço de energia. A porta e a cremalheira foram consideradas como superfícies de controle, e o software EES (Engineering Equation Solver) foi utilizado para resolver as equações e realizar os cálculos termodinâmicos de transferência de calor. O script com as equações implementadas no software é apresentado no Apêndice A.

A avaliação do comportamento do forno em seus três estados críticos fundamentou-se no método padrão proposto pela norma internacional ASTM F1496-22. A energia de pré-aquecimento foi determinada cronometrando-se o intervalo entre o acionamento inicial do equipamento e o momento em que a câmara atingiu a temperatura de operação. O consumo associado à taxa de energia em repouso foi calculado mediante o acionamento manual corretivo sempre que ocorria decaimento térmico, registrando-se a potência demandada e o tempo de permanência no estado ligado. Por fim, para estimar a eficiência térmica de cozimento, conforme a Equação 12, foram medidas a massa e a temperatura do miolo de amostras de pães, utilizando um termômetro de espeto (figura 4.9), tanto antes quanto após a cocção, além do tempo e potência de cozimento. No entanto, a restrição do balanço térmico unicamente à etapa de assamento induziu uma distorção analítica, caracterizando o rendimento aparente superior à 100%, o que é termodinamicamente impossível. Isso se deve ao uso do calor previamente armazenado na estrutura do forno proveniente do ciclo de pré-aquecimento cuja entrada de energia elétrica não havia sido integrada à fronteira de cálculo desse período isolado. Para amenizar esta distorção foi repetido o mesmo método de medição para a fornada subsequente, de pão de queijo, para englobar os três períodos no balanço energético a fim de se ter uma estimativa mais realista da eficiência térmica de “cozimento”.

Figura 4.9 – Termômetro espeto



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para determinar o nível de desempenho do equipamento, os resultados obtidos foram comparados com valores de referência.

4.4.4. Refrigeração

A avaliação da eficiência dos refrigeradores não foi realizada por meio do cálculo direto das perdas de energia, devido à complexidade de medições em campo. Em vez disso, foi adotado o método indireto baseado na análise do Consumo Padrão (Cp), que serve como referência para o desempenho energético.

O Consumo Padrão (Cp) é um valor teórico de consumo de energia para um equipamento de refrigeração, determinado por equações que consideram suas características principais, como volume e classe de temperatura. Ele é a base para o cálculo do Índice de Eficiência Energética (Ie), que é a métrica padrão proposta pelo GCF para comparar a eficiência energética de diferentes modelos.

Pra calcular o Índice de eficiência Energética, portanto, foi necessário obter as informações do volume interno dos equipamentos a partir das etiquetas com as informações técnicas fornecidas pelos fabricantes e também do consumo de energia mensal. Após o cálculo, cada equipamento pôde ser classificado de acordo com o seu nível de eficiência.

4.5. Desenvolvimento dos estudos técnicos e econômicos

Depois da análise do desempenho energético, a próxima etapa da auditoria consistiu em desenvolver análises técnicas e econômicas de possíveis modificações ou trocas dos equipamentos.

4.5.1. Iluminação

A possível modernização do sistema de iluminação foi avaliada com base no método de cálculo dos lúmens que considera a quantidade total de fluxo luminoso necessária do ambiente, baseada no tipo de atividade desenvolvida, nas refletâncias das superfícies (teto, paredes e piso) e nos tipos de equipamentos escolhidos. O roteiro a ser seguido para os cálculos consiste em: Determinação do nível de iluminamento; determinação do fator do local; escolha das lâmpadas e das luminárias; determinação do fator de utilização; determinação do fluxo total; cálculo do número de luminárias; distribuição das luminárias. Para alcançar a quantidade de fluxo luminoso total necessária considerou-se tanto o aumento de pontos de luz quanto a instalação de lâmpadas com maior eficiência e fluxo luminoso.

Realizou-se o levantamento de custos para fundamentar a escolha da alternativa de melhor custo-benefício.

Com o valor da nova potência a ser instalada é possível calcular a diferença entre o consumo atual e o novo consumo, de acordo com a equação (4.5):

$$\Delta C = CE_{M(atual)} - (P_{nova} \times h_{dia} \times d_{mes}) \tag{4.5}$$

Onde:

ΔC é o valor calculado para a diferença de consumo de energia mensal (kWh/mês);

P_{nova} é a nova potência instalada (kW);

h_{dia} é o valor médio para as horas diárias de consumo (h);

d_{mes} é o número de dias por mês em que se consome (n/mês);

$CE_{M(atual)}$ é o consumo de energia atual do sistema de iluminação (kWh/mês).

4.5.2. Masseira

Quanto à masseira avaliou-se a possibilidade de substituição do motor. Neste caso, o motor poderá ser trocado por um outro com as mesmas características, mas que se adeque melhor à carga ou poderá ser trocado por um com outras características que seja mais eficiente e compatível com o regime de funcionamento da masseira. Para a primeira opção, foi identificado um motor do mesmo modelo, mas com a potência nominal mais próxima à potência de trabalho. Levando a corrente de trabalho na curva do fabricante,

identifica-se nova potência de trabalho e o novo rendimento. Com o novo rendimento é possível estimar a economia de energia com a possível troca (Equação (4.6)).

$$\Delta C = (\eta_{atual} - \eta_{motor\ novo}) \times CE_M \quad (4.6)$$

Onde:

ΔC é o valor calculado para a diferença no consumo de energia mensal (kW.h/mês);

η_{atual} é o rendimento do motor atual;

η_{novo} é o rendimento do motor novo;

CE_M é o consumo mensal de energia do motor (kW.h/mês).

A outra opção é a troca por um motor de alto rendimento que seja compatível com o regime de funcionamento da masseira, ou seja, tenha duas velocidades, uma para homogeneizar a massa e outra para misturá-la. Após identificado o motor que atenda essas exigências, é possível estimar a economia de energia, sabendo o novo rendimento do motor.

Também foi avaliado a possibilidade de trocar a masseira por outra menor que atenda à demanda e que consuma menos energia. Esta alternativa é possível já que atualmente se verifica que a masseira não é usada em sua capacidade máxima. Nesse caso a possível economia de energia é calculada pela diferença entre o consumo médio mensal da nova masseira e o consumo da masseira atual, como mostra a equação (4.7).

$$\Delta C = CE_{M(atual)} - CE_{M(novo)} \quad (4.7)$$

Onde:

ΔC é o valor calculado para a diferença no consumo de energia mensal (kWh/mês);

$CE_{M(atual)}$ é o consumo mensal de energia do equipamento atual (kWh/mês);

$CE_{M(novo)}$ é o consumo mensal de energia do novo equipamento (kWh/mês).

Com a economia de energia estimada e os respectivos custos de implementação, e considerando a tarifa atual de energia, realizou-se a análise de viabilidade econômica das propostas para a masseira. Para uma primeira análise comparativa foi calculado o tempo de retorno (payback) para cada investimento.

4.5.3. Forno

As estratégias de intervenção no forno dividiram-se entre a substituição integral e a modernização do forno atual.

Para a troca do forno considera-se um que consuma menos energia, mas que ao mesmo tempo, tenha as mesmas características, ou seja, à lastro com vapor, e que também atenda à demanda. A possível economia de energia é calculada pela diferença entre o consumo mensal do forno atual e o consumo médio mensal do novo forno.

Para a modificação do forno atual considera-se a troca do isolamento térmico da porta e a instalação de um controle digital de temperatura.

Para a análise do isolamento térmico, o potencial de economia foi calculado alterando-se a resistência térmica da porta no modelo matemático de balanço de calor. Ao trocar o valor do coeficiente de transferência por condução do material atual no balanço de energia pela condutividade térmica do novo material isolante, no caso, lã de rocha, foi possível estimar o novo valor da transferência de calor pela porta. O cálculo da economia de energia pode também ser estimado pela diferença do calor perdido atual e o novo calor perdido através da nova porta isolante (Equação (4.8)).

$$\Delta C = Q_{atual} - Q_{novo} \tag{4.8}$$

Onde:

ΔC é o valor calculado para a diferença no consumo de energia mensal (kWh/mês);

Q_{atual} é o valor calculado para o calor total perdido pela porta atual do forno ao longo do mês (kWh/mês);

Q_{novo} é o valor calculado para o calor total perdido pela nova porta do forno ao longo do mês (kWh/mês).

O levantamento econômico foi realizado por meio de uma cotação comercial direta com a empresa Thermominas, especializada em isolamento térmico e acústico, obtendo-se o custo real dos materiais e da mão de obra necessários para a execução da reforma da porta.

O cálculo da economia de energia a ser obtida pela instalação do controle digital de temperatura, conforme a equação (4.9), fundamentou-se em índices de eficiência validados pelo mercado de automação térmica, que apontam uma redução no consumo

energético entre 15% e 30% após a substituição. Estabeleceu-se o valor médio de 20 % para fins de modelagem matemática e simulação financeira.

$$\Delta C = p \times CE_{M(atual)} \quad (4.9)$$

Onde:

ΔC é o valor calculado para a diferença no consumo de energia mensal (kWh/mês);

p é o índice percentual estimado de redução (%);

$CE_{M(atual)}$ é o consumo mensal de energia do equipamento atual (kWh/mês).

O levantamento financeiro para a aquisição dos componentes e mão de obra necessária para a instalação do controlador foi realizado por meio de cotação comercial com a empresa Imtech Automação.

Para uma primeira análise comparativa foi calculado o tempo de retorno (payback) para cada investimento, considerando a tarifa atual de energia.

4.5.4. Refrigeração

No caso dos freezers a possibilidade mais comum para reduzir o consumo é simplesmente trocar aqueles mais ineficientes, já que modificá-los pode não ser viável devido à complexidade e ao custo. É importante destacar que os novos freezers deverão ser selecionados com base não apenas no seu nível de consumo, mas também em seu índice de eficiência. A análise da distribuição de eficiência energética obtida através da pesquisa de mercado com os fabricantes mostra que, embora a maioria dos modelos produzidos no Brasil se encontre entre as classes E, F e G, a classe D acaba sendo o benchmark de referência para o setor, por representar o limite de eficiência alcançável com as tecnologias maduras e de custo acessível. A economia de energia pode, portanto, ser calculada através da diferença do consumo mensal do freezer atual e o consumo mensal do novo freezer cuja classe de eficiência seja no mínimo D.

Por fim, calcula-se o tempo de retorno do investimento para as trocas utilizando os valores de mercado dos novos equipamentos e o fluxo de caixa gerado pela economia de energia.

4.6. Elaboração das recomendações e e análise econômica das propostas

A partir do diagnóstico realizado nos diferentes subsistemas, identificaram-se as oportunidades de melhoria do desempenho energético. A elaboração das recomendações

fundamentou-se na conciliação entre a eficiência técnica, o cumprimento de diretrizes normativas e a viabilidade econômica, mensurada pelo tempo de retorno do investimento (*payback*). As diretrizes propostas visam subsidiar estudos futuros e mais aprofundados para a efetiva implementação das medidas.

Por fim, realizou-se a análise de viabilidade econômico-financeira do portfólio de intervenções aplicando indicadores clássicos de desempenho. O investimento inicial total (CAPEX) foi quantificado pelo somatório dos custos totais para as medidas sugeridas. A Redução Mensal de Consumo (RMC) global foi obtida pelo somatório das reduções mensais estimadas para cada medida de conservação de energia individualmente. A partir disso, a economia financeira anual (EFA) foi estimada a partir da RMC multiplicada pela tarifa média vigente da Cemig. Os fluxos de caixa foram projetados para um horizonte de análise de 5 anos, período que se justifica por alinhar-se ao ciclo de vida útil estimado para os componentes tecnológicos propostos e refletir as práticas usuais de mercado para investimentos de capital em empresas de pequeno porte. Para avaliar a real atratividade das propostas frente à taxa mínima de atratividade (TMA) adotada, aplicaram-se os indicadores: tempo de retorno (payback simples), Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR), conforme modelagem matemática e equações apresentadas na revisão bibliográfica (Seção 3.5).

5. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da metodologia aplicada para a realização da auditoria energética e da modelagem econômica das propostas de modernização.

5.1. Dados e informações gerais da empresa

• Nome: Padaria Sr Paulino

• Localização: Belo Horizonte

• Produção: A padaria produz uma variedade de produtos de panificação, incluindo pães, bolos, biscoitos e salgados. Como a demanda é estável e previsível, a produção é programada, e basicamente, são feitos os mesmos produtos em quantidades iguais todos os dias. A padaria opera 11 horas por dia em 6 dias da semana e 5 horas em 1 dia da semana. Os principais produtos são:

Pães: 33% da produção total

Bolos: 11% da produção total

Biscoitos: 16% da produção total

Salgados: 40% da produção total

A produção é destinada à venda direta ao consumidor no estabelecimento.

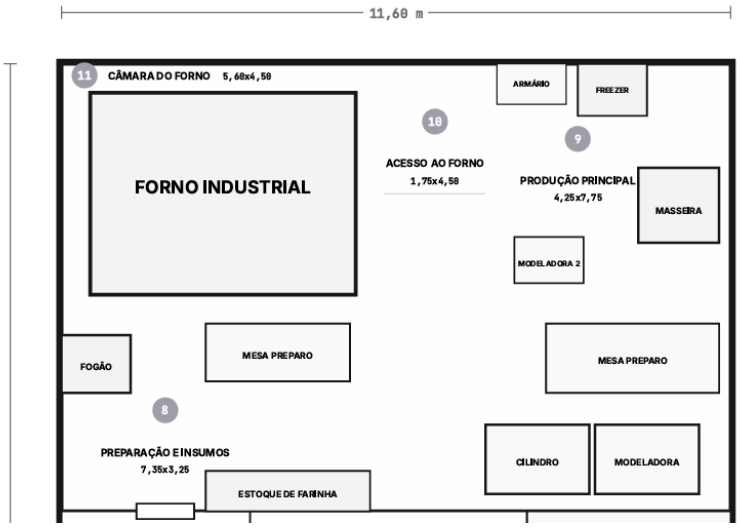
• Horário de funcionamento: 6:00 às 20:00

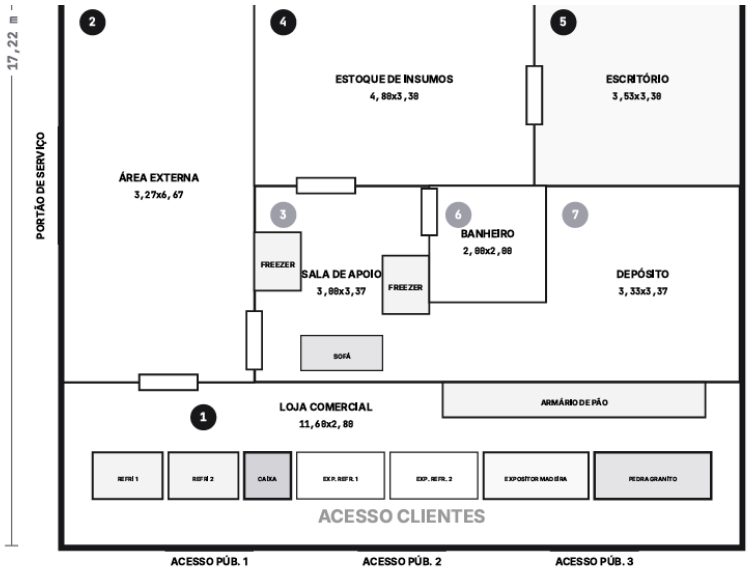
• Número de funcionários: 10

• Área total: 200 m²

• Layout (figura 5.1):

Figura 5.1 – Layout da padaria

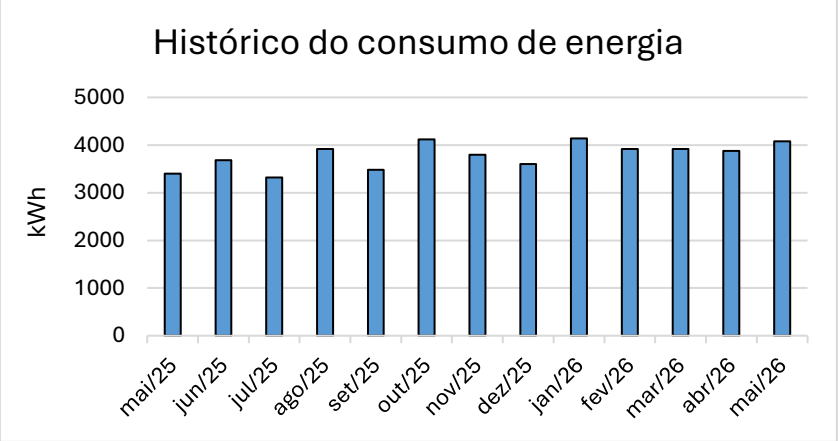




Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

- Histórico do consumo de energia (figura 5.2):

Figura 5.2 – Histórico do consumo



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

• Tarifa de energia atual de referência para análise financeira: Adotou-se como referência a tarifa de energia elétrica vigente de R$ 1,04 por kWh, baseada na estrutura tarifária para consumidores comerciais da CEMIG.

5.2. Caracterização do consumo

A infraestrutura operacional da padaria é dividida em dois sistemas funcionais. Cada um deles engloba processos específicos e os equipamentos que demandam energia para o funcionamento.

1) Sistema de produção: O sistema de produção concentra as atividades de fabricação e processamento dos alimentos. Ele é composto pelos seguintes processos e equipamentos:

- Cocção e Fritura: Processos responsáveis pelo assamento e fritura dos produtos, utilizando o forno de lastro elétrico e o fogão.
- Mistura e Homogeneização das Massas: Etapa inicial de preparação dos ingredientes, realizada por meio da masseira.
- Uniformização e Compactação das Massas: Processo de refino e "sova" da massa para atingir a textura ideal, utilizando o cilindro.
- Modelagem das Massas: Etapa de corte e moldagem geométrica dos pães antes do crescimento, feita pela modeladora.
- Armazenamento de Ingredientes: Processo de conservação de matérias-primas e insumos na área interna, utilizando os freezers de produção.
- Iluminação: Lâmpadas.

2) Área Comercial: A área comercial corresponde ao espaço de atendimento ao cliente e venda direta. Ela envolve os seguintes processos e equipamentos:

- Armazenamento e Exposição de Produtos: Utiliza-se refrigeradores e expositores.
- Iluminação: Lâmpadas.

A distribuição do consumo mensal individualizada por equipamento é apresentada pela tabela 5.1.

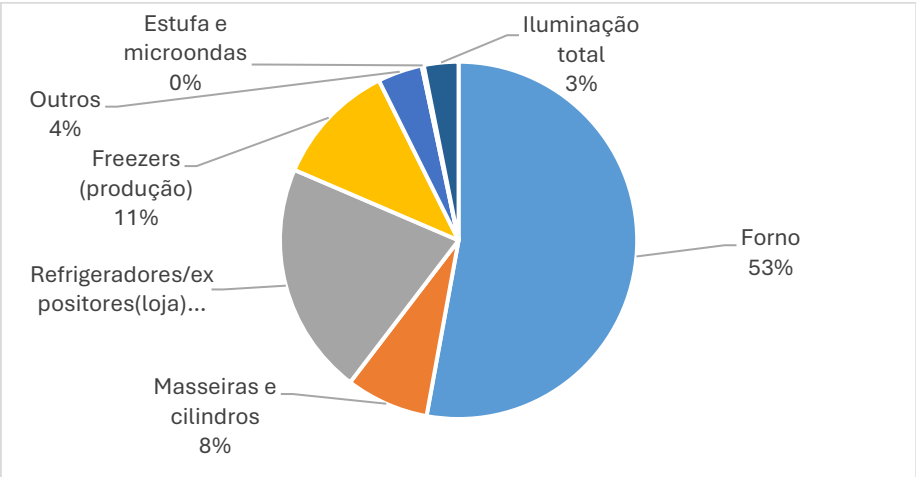
Tabela 5.1 – Distribuição do consumo mensal por equipamento

Equipamento	**Potência (kW)**	**Tempo de utilização (h/dia)**	**Consumo mensal (kW.h)**
Forno	11,9	5,25	1874,25
Masseira	3,9	2	234
Cilindro	2	0,36	22
Modeladora	0,32	0,83	8,2
Refrigerador 1	0,91	8	219,4
Refrigerador 2	0,3	12	109,7
Expositor 1	0,38	12	138,9
Expositor 2	0,39	24	283,4
Freezer 1	0,32	12	114,3
Freezer 2	0,32	12	114,3
Freezer 3	0,47	12	170,5
Computadores	0,2	24	144

Lâmpada 1 Loja	0,024	5	3,6
Lâmpada 2 Loja	0,024	5	3,6
Lâmpada 3 Loja	0,024	5	3,6
Lâmpada 4 Loja	0,024	5	3,6
Lâmpada 5 Loja	0,024	5	3,6
Lâmpada 6 Loja	0,018	5	2,7
Lâmpada 1 Escritório	0,015	1	0,45
Lâmpada 1 Área externa	0,015	12	5,4
Lâmpada 1 Industria	0,009	16	4,32
Lâmpada 2 Industria	0,03	16	14,4
Lâmpada 3 Industria	0,04	16	19,2
Lâmpada 4 Industria	0,04	16	19,2
Lâmpada 5 Industria	0,04	16	19,2
Lâmpada 6 Industria	0,018	16	8,64
Estufa e microondas	1,4	0,16	7
Total			3567,4

O gráfico com a composição do consumo segregada por grupos de equipamentos. é ilustrado pela figura 5.3.

Figura 5.3 – Distribuição do consumo



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O sistema térmico de cocção (Forno) detém a maior parcela do consumo total, representando 53%. Somado a este, o setor de refrigeração (composto por expositores de loja e freezers de produção) totaliza 32% da demanda (21% e 11%, respectivamente). Juntos, esses dois grupos concentram 85% de toda a energia consumida.

5.3. Análise do desempenho energético

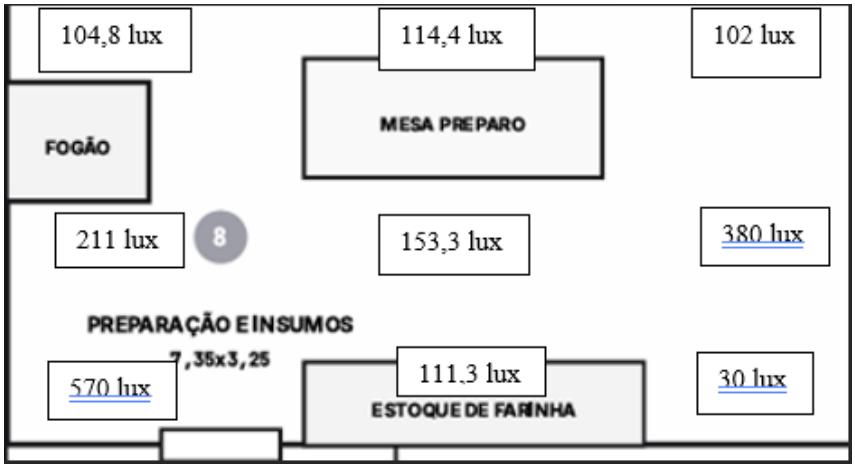
5.3.1. Iluminação

A avaliação do sistema de iluminação mostra um cenário contraditório: o setor consome pouca energia e usa tecnologias eficientes, mas não entrega a quantidade de luz necessária para o ambiente. A norma NBR ISO/CIE 8995-1 estabelece que a iluminância média mantida deve ser de no mínimo 300 lux para as áreas de preparação e fornada em padarias, e 500 lux em áreas de acabamento e decoração.

- **Área de Preparação e Insumos (Área 8)**

O nível de iluminância média medido nesta área ficou abaixo do exigido. Enquanto a norma determina um mínimo de 00 lux o valor encontrado foi de 197,4 lux, classificando o ambiente como não conforme. Na figura 5.4 são mostrados os valores medidos da iluminância em 9 pontos da área 8.

Figura 5.4 – Iluminância medida em 9 pontos da área 8



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Esta área possui uma área total de 26,6 m² e conta com duas lâmpadas instaladas (uma de 9 W e outra de 30 W), totalizando 39 W de potência.

Densidade de Potência de Iluminação (DPI): A DPI calculada foi de 1,46 W/m², garantindo a Classificação A em eficiência de consumo.

Desempenho de Iluminação: O Índice do Recinto (IR) foi determinado em 1,34, gerando um valor de referência (Target) de 43 lux/W/m². A eficácia da carga instalada (ILE) foi calculada em 135,2 lux/W/m² e o indicador final ILER calculado foi de 3,1.

Situação: Embora os indicadores de desempenho demonstrem baixo consumo de energia e eficiência na conversão em luz, a iluminação média medida nos 9 pontos coletados ficou abaixo dos 300 lux exigidos.

- **Área Principal da produção (Área 9)**

O nível de iluminância média medido nesta área também ficou abaixo do exigido. A norma determina um mínimo de 500 lux, e o valor encontrado foi de 167,7 lux, classificando o ambiente como não conforme. Na Figura 5.5 são mostrados os valores medidos da iluminância em 9 pontos da Área 9.

Figura 5.5 – Iluminância medida em 9 pontos da área 9



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Esta área possui uma área total de 32,9 m² e utiliza três lâmpadas de 40 W, totalizando uma potência de 120 W.

Densidade de Potência de Iluminação (DPI): A DPI calculada foi de 3,65 W/m², garantindo a Classificação A em eficiência de consumo.

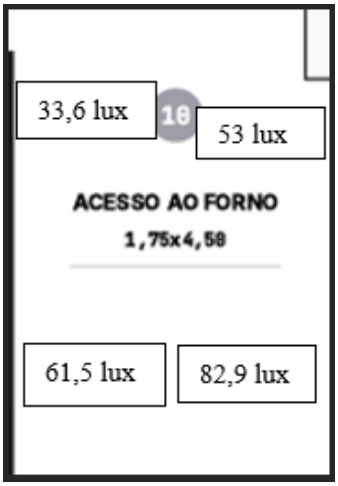
Desempenho de Iluminação: O Índice do Recinto (IR) foi determinado em 1,49, gerando um valor de referência (Target) de 43 lux/W/m². A eficácia da carga instalada (ILE) foi calculada em 47,1 lux/W/m² e o indicador final ILER calculado foi de 1,1.

Situação: Embora os indicadores de desempenho demonstrem baixo consumo de energia e eficiência na conversão em luz, a iluminação média medida nos 9 pontos coletados ficou abaixo dos 500 lux exigidos.

- **Área de acesso ao forno (Área 10)**

De igual modo, o nível de iluminância média medido nesta área ficou abaixo do exigido. Enquanto a norma determina um mínimo de 300 lux, o valor encontrado foi de 57,7 lux, classificando o ambiente como não conforme. Na figura 5.6 são mostrados os valores medidos da iluminância nos pontos da área 10.

Figura 5.6 – Iluminância medida em 4 pontos da área 10



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Esta área possui uma área total de 5,07 m² e conta com uma lâmpada instalada de 18 W, totalizando 18 W de potência.

Densidade de Potência de Iluminação (DPI): A DPI calculada foi de 3,55 W/m², garantindo a Classificação A em eficiência de consumo.

Desempenho de Iluminação: O Índice do Recinto (IR) foi determinado em 0,59, gerando um valor de referência (Target) de 36 lux/W/m². A eficácia da carga instalada (ILE) foi calculada em 16,26 lux/W/m² e o indicador final ILER calculado foi de 0,45.

Situação: Embora os indicadores de desempenho demonstrem baixo consumo de energia e eficiência na conversão em luz, a iluminação média medida nos pontos coletados ficou abaixo dos 300 lux exigidos.

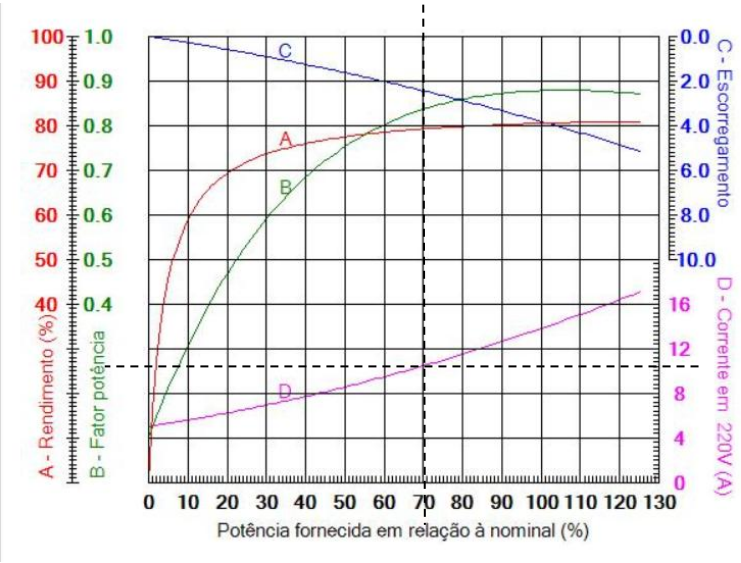
5.3.2. Masseira

- **Análise de sobredimensionamento do motor**

A avaliação do motor de indução da masseira revela que o equipamento opera fora do seu ponto de rendimento ideal. Para esta análise, o motor atual de duas velocidades

(Modelo 112M1179, 8/4 polos, 2,5/5 cv, 10/15 A) foi comparado com a curva de desempenho de um motor comercial moderno equivalente, o modelo WEG W22 Dahlander (8/4 polos, 3/5 cv, 10,8/13,8 A), ilustrada na Figura 5.7. Durante o funcionamento prático, a corrente de operação registrada foi de 10,4 A, o que equivale a 70% da corrente nominal do motor.

Figura 5.7 – Curva de desempenho do motor W22 Dahlander



Fonte: WEG (2026)

Potência de Trabalho e Rendimento**:** Com base nesse regime de carga, a potência real de trabalho desenvolvida é de aproximadamente 3,5 cv (70% da capacidade). Ao projetar esse ponto de operação na curva de desempenho do fabricante (Figura 5.7), constatou-se que o motor opera com um rendimento reduzido de 0,8 (80%).

Perda Estimada de Energia**:** Considerando o consumo mensal total da masseira de 237,7 kWh, o cálculo das perdas geradas pelo baixo rendimento indicou que o sistema desperdiça cerca de 47,54 kWh por mês.

Conclusão: O motor da masseira encontra-se levemente sobredimensionado e com baixo rendimento se comparado aos motores modernos.

5.3.3. Forno

A avaliação do forno de lastro elétrico permitiu mapear os fluxos de calor, o consumo nas diferentes etapas de operação e a eficiência real da cocção dos produtos.

- **Perda de Calor pela Porta Ensaios de Operação**

Perda de Calor pela Porta: Com o forno operando a uma temperatura média interna de 473 K, a superfície externa da porta atingiu 328 K, à uma temperatura ambiente de 300

K. A simulação no software EES indicou que a energia perdida para fora do volume de controle por meio da porta é de 362,9 kWh/mês.

- **Ensaios de Operação**

Energia de Pré-aquecimento: Para elevar a temperatura do forno de 150 °C para 250 °C durante o período de 1 hora, com o equipamento operando em sua potência de 20,96 kW, o consumo de energia calculado foi de 20,96 kWh.

Taxa de Energia em Repouso: O ensaio para manter o forno estabilizado em 225 °C por 1 hora e consumiu 2,5 kWh. Durante esse tempo, o forno operou de forma cíclica: permaneceu ligado por 20 minutos (com potência de 7,62 kW) e desligado nos 40 minutos restantes.

- **Eficiência de cozimento**

Lote de Pão Francês: O lote de 375 pães (massa inicial de 63,75 g a 27,05 C e massa final de 49,66 g a 82,76 C absorveu 4,35 kWh de energia térmica. O tempo de assamento foi de 23 minutos com o forno operando a 7,62 kW, gerando um consumo elétrico de 2,92 kWh. O cálculo resultou em uma eficiência de cozimento isolada de 149%.

Lote de Pão de Queijo: O lote de 400 pães de queijo (massa inicial de 53,25 g a -4,5 C e massa final de 28 g a 82,3 C absorveu 7,36 kWh. O processo durou 27 minutos (21 minutos a 7,62 kW e 6 minutos a 19 kW), resultando num consumo elétrico de 4,56 kWh.

Eficiência Global: Ao integrar todo o ciclo operacional, englobando o pré-aquecimento, o lote de pão francês e o lote de pão de queijo, a eficiência global do sistema foi calculada em 41,1%.

Conclusão: Os resultados revelam aspectos críticos sobre a termodinâmica e a operação do forno. O consumo de 20,96 kWh no pré-aquecimento evidencia a alta inércia térmica do sistema, mostrando que a carcaça metálica e a massa refratária retêm uma grande quantidade de calor. O ensaio em repouso confirma isso ao demonstrar que o forno precisa ficar ativo apenas 33% do tempo para manter a temperatura estável, refletindo o equilíbrio entre o calor retido e o resfriamento natural do equipamento.

Identificou-se que o forno não possui um sistema automático de controle de temperatura (como uma automação digital), contando apenas com um termopar conectado a um termômetro analógico. Sem carga, o padeiro precisa ligar e desligar as resistências manualmente de forma visual e intuitiva para evitar a queda de temperatura.

A eficiência isolada de 149% no pão francês não representa um erro de medição, mas sim um comportamento físico real do processo. Durante os 23 minutos de assamento, a massa consome majoritariamente a energia térmica que já estava acumulada nas paredes refratárias e no lastro do forno devido ao pré-aquecimento, demandando pouca energia da rede elétrica naquele intervalo. Por fim, quando analisamos o ciclo completo de forma global, a eficiência cai para 41,1%. Esse rendimento final está abaixo dos valores de referência para fornos elétricos comerciais modernos, o que é diretamente explicado pela alta taxa de perda de calor identificada na porta do equipamento.

5.3.4. Refrigeração

A avaliação do sistema de refrigeração consistiu no cálculo do consumo padrão de energia de cada equipamento e na determinação de seus respectivos índices e classes de eficiência energética.

Refrigerador 1: Com um volume de 565 litros, o cálculo resultou em um consumo padrão de 240,4 kWh. O índice de eficiência calculado enquadrou o equipamento na Classe G.

Refrigerador 2: Com um volume de 449,7 litros, o consumo padrão calculado foi de 210,5 kWh. O índice de eficiência obtido enquadrou o equipamento na Classe D.

Balcão Expositor 1: Com um volume de 576 litros, apresentou um consumo padrão de 270,3 kWh. Seu índice de eficiência o posicionou na Classe D.

Balcão Expositor 2: Com um volume de 675 litros, o cálculo indicou um consumo padrão de 249 kWh. O índice de eficiência calculado enquadrou o ativo na Classe G.

Conclusão: O refrigerador 1 consome mais energia e é menos eficiente que o refrigerador 2. De igual modo, o balcão expositor 2 consome mais energia e é menos eficiente que o balcão expositor 1. Os refrigeradores cuja classe de eficiência é D são os de referência para o mercado brasileiro.

5.4. Desenvolvimento dos estudos técnicos e econômicos

5.4.1. Iluminação

Para solucionar a não conformidade da falta de luz identificada foram desenvolvidos estudos técnicos para determinar o fluxo luminoso necessário em cada área operacional, seguidos por uma análise econômica comparando duas alternativas de melhoria.

- **Dimensionamento do Fluxo Luminoso Necessário**

O cálculo do fluxo luminoso total necessário foi realizado com base nas características físicas de cada ambiente, considerando as dimensões das áreas (S), os índices do recinto (K), os fatores de utilização (Fu) obtidos para paredes e tetos claros, e um fator de manutenção (Fm) de 0,8 devido às condições ambientais de uma padaria.

Área de Preparação e Insumos: Com uma área de 23,07 m², K = 1,22 e Fu = 0,46, a meta de atingir a iluminância alvo de 300 lux exige um fluxo luminoso total de 18.807 lúmens. Se o estabelecimento optar por utilizar lâmpadas comuns padrão LED de 40 W (que fornecem 2.400 lúmens cada), seriam necessários 8 pontos de luz. Por outro lado, caso decida manter apenas os 2 pontos de iluminação existentes hoje, cada lâmpada precisaria entregar um fluxo individual de 9.403,5 lúmens.

Área Principal da Produção: Com uma área de 32,94 m², K = 1,49 e Fu = 0,53, a meta normativa sobe para 500 lux, exigindo um fluxo luminoso total de 38.844 lúmens. Utilizando o padrão LED de 40 W (2.400 lúmens), seriam necessários 16 pontos de luz. Mantendo-se estritamente os 3 pontos de iluminação atuais, cada bocal precisaria suportar uma lâmpada com fluxo de 12.948 lúmens.

Área de Acesso ao Forno: Com uma área de 5,07 m², K = 0,59 e Fu = 0,3, a iluminância alvo de 300 lux demanda um fluxo total de 6.337,5 lúmens. Utilizando lâmpadas padrão de 2.400 lúmens, seriam necessários 3 pontos de luz. Para manter apenas o único bocal existente, a lâmpada instalada precisaria fornecer sozinha 6.337,5 lúmens.

- **Análise Econômica e Comparação de Soluções**

A partir das necessidades de fluxo luminoso calculadas, foram estruturadas duas propostas de intervenção para o estabelecimento, avaliando o investimento financeiro e o impacto na demanda de energia.

Solução A: Adequação por novos pontos de luz.

Esta proposta foca na instalação física de novos bocais e fiação, distribuindo a iluminação por meio de lâmpadas LED comuns de 40 W (2.400 lúmens) até atingir as metas normativas.

Esta medida exigiria a adição de mais 6 pontos na Área de Preparação, mais 13 pontos na Produção Principal e mais 2 pontos no Acesso ao Forno, totalizando 21 novos pontos de iluminação na padaria.

Com base nos preços médios praticados em 2026 para materiais elétricos básicos e serviços de mão de obra de eletricista, o investimento total necessário para implementar os 21 pontos ficaria situado na faixa entre R$ 2.800,00 e R$ 4.600,00.

Solução B: Adequação Tecnológica (Lâmpadas de Alta Potência)

Esta alternativa consiste em manter os mesmos 6 pontos de luz já existentes na estrutura atual, substituindo as lâmpadas queimadas ou subdimensionadas por modelos de alta potência (High Power) ou pelo uso de adaptadores de bocal.

Área de Preparação e Insumos: Substituição das lâmpadas atuais por 2 lâmpadas LED High Power de 100 W (aproximadamente 10.000 lúmens cada). Custo estimado: R$ 260,00.

Área Principal da Produção: Instalação de 3 adaptadores duplos (conectores em "Y") nos bocais existentes. Nesses 6 encaixes disponíveis, seriam utilizadas 6 lâmpadas LED de 50 W ou 60 W (cerca de 6.000 lúmens cada). Custo estimado: R$ 435,00.

Área de Acesso ao Forno: Substituição por 1 lâmpada LED de 60 W ou 80 W (cerca de 7.000 lúmens). Custo estimado: R$ 70,00.

Custo Estimado Total: O investimento total para a Solução B fica em torno de R$ 765,00.

- **Discussão**

A comparação entre as duas propostas demonstra que a Solução B (Adequação Tecnológica) apresenta-se como a escolha mais viável para a realidade da padaria. Ela exige um investimento inicial de R$ 765,00, o que representa uma economia financeira imediata de pelo menos R$ 2.035,00 em relação ao custo mínimo de reforma física previsto na Solução A (R$ 2.800,00). Além disso, a Solução B elimina a necessidade de obras civis, fiação exposta ou interrupções prolongadas na rotina de produção da panificação.

Ao trocar as lâmpadas antigas e de baixa potência por modelos de alta potência e adaptadores em "Y", a potência total instalada no sistema de iluminação passará de 178 W para 560 W. De acordo com a Equação 4.5, essa mudança gerará um acréscimo no consumo mensal de 183,84 kWh.

5.4.2. Masseira

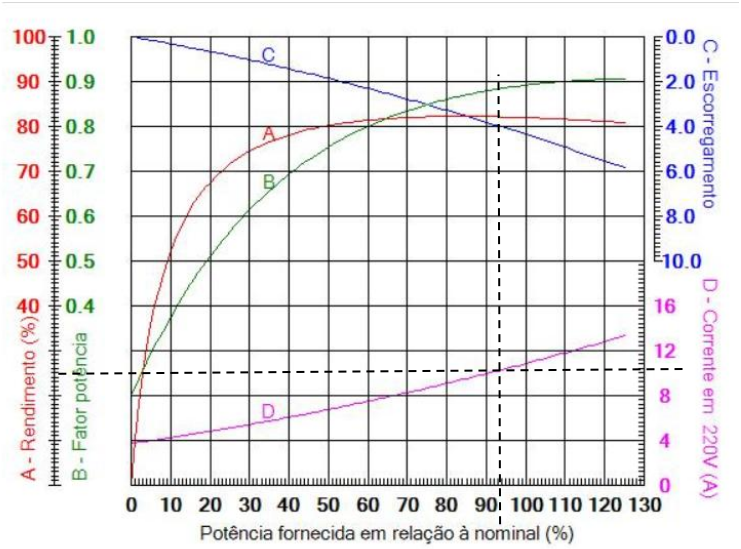
Para corrigir o sobredimensionamento do motor da masseira e reduzir as perdas por baixo rendimento, foram estudadas três alternativas de intervenção técnica, cada uma acompanhada de sua respectiva análise de viabilidade financeira

- **Troca do motor por um com potência menor adequada à carga**

Esta alternativa propõe a substituição do motor atual por um modelo WEG W22 Dahlander com potência menor e mais ajustada ao esforço real medido (2,5/4 cv, 8/4 polos, 9,29/10,8 A).

Desempenho Técnico: Mantendo-se a corrente de operação real de 10,4 A, o novo motor passaria a trabalhar a aproximadamente 94% da sua capacidade nominal (potência de trabalho de 3,76 cv). Ao projetar esse novo ponto de operação na curva de desempenho do fabricante (figura 5.8), o rendimento do sistema subiria para 0,82 (82%).

Figura 5.8 – Curva de desempenho do novo motor W22 Dahlander



Fonte: WEG (2026)

Análise Econômica: Essa melhora na eficiência gera uma economia de energia calculada em 4,75 kWh por mês (Equação 4.6). Considerando o preço de aquisição do motor de R$ 2.900,00 e a tarifa de energia local de R$ 1,04/kWh, o cálculo do Payback Simples indicou um tempo de retorno do investimento de 48,9 meses.

- **Troca do motor por um com alto rendimento, e compatível com a masseira**

Esta proposta consiste em manter a faixa de potência atual, mas substituindo o motor antigo por um modelo moderno de alto rendimento (89%) que seja compatível com a estrutura mecânica da masseira atual.

Análise Econômica: De acordo com a Equação 4.6, a economia de energia estimada seria de 21,4 kWh por mês, o que representa uma redução financeira de R$ 22,25/mês na fatura. Frente ao custo de compra do motor de R$ 4.200,00 e à tarifa de R$ 1,04/kWh, o Payback Simples resultou em 188,7 meses (15,7 anos).

- **Troca da masseira por outra menor que consome menos e que atende à demanda:**

Esta alternativa consiste em descartar o conjunto atual e adquirir uma nova masseira de menor capacidade física, cujo projeto e motorização já venham de fábrica dimensionados exatamente para a demanda diária de produção da padaria.

Análise Econômica: A economia de energia calculada pela Equação 4.7 foi de 81,7 kWh por mês. Devido ao alto valor de mercado do novo equipamento, cotado em R$ 14.044,44, o cálculo do Payback Simples apontou um tempo de retorno financeiro de 165 meses (13,7 anos).

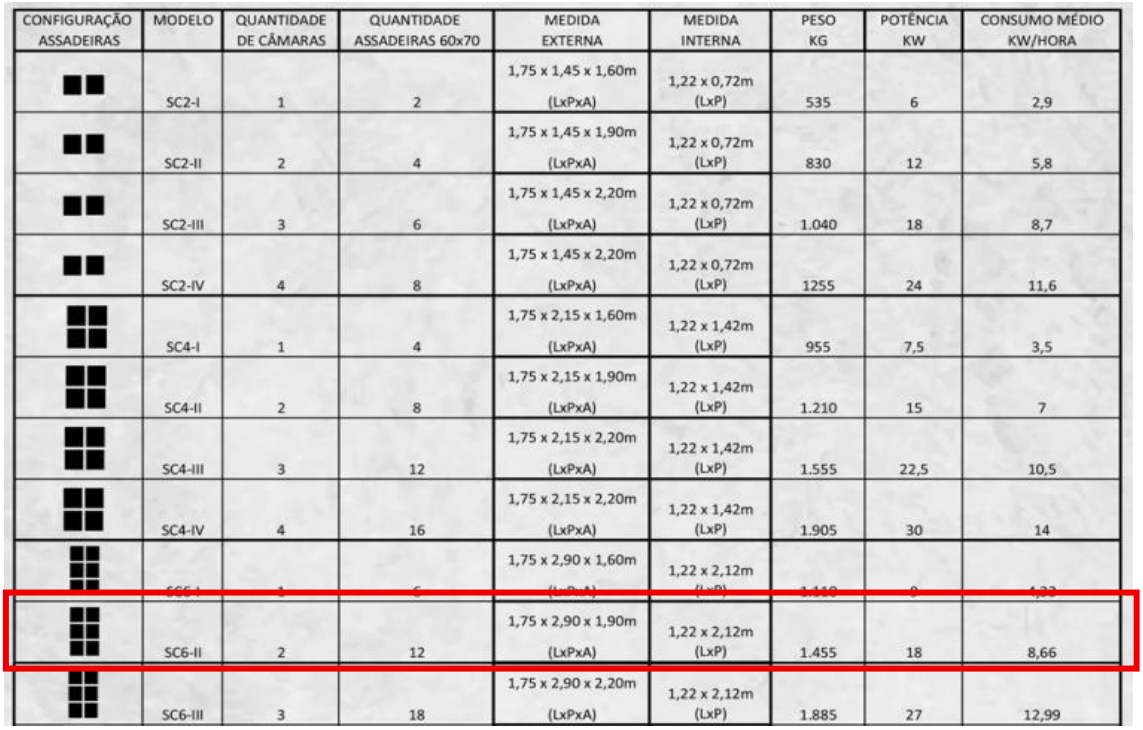
5.4.3. Forno

Com o objetivo de mitigar as perdas na porta, otimizar os ciclos de aquecimento e corrigir a ausência de controle automático no forno elétrico de lastro, foram estudadas três propostas de intervenção técnica e avaliadas suas respectivas viabilidades financeiras.

- **Proposta de implementação 1: Troca do forno por outro menor e mais eficiente que atenda a demanda.**

Esta proposta consiste na troca do equipamento atual por um forno de lastro elétrico menor da marca Superfecta (configuração de duas câmaras e 12 assadeiras), cujas especificações técnicas estão dispostas na figura 5.9, operando com um consumo médio diário de 8,66 kW/hora.

Figura 5.9 – Especificações técnicas das diferentes configurações do forno de lastro superfecta.



CONFIGURAÇÃO ASSADEIRAS	MODELO	QUANTIDADE DE CÂMARAS	QUANTIDADE ASSADEIRAS 60x70	MEDIDA EXTERNA	MEDIDA INTERNA	PESO KG	POTÊNCIA KW	CONSUMO MÉDIO KW/HORA
	SC2-I	1	2	1,75 x 1,45 x 1,60m (LxPxA)	1,22 x 0,72m (LxP)	535	6	2,9
	SC2-II	2	4	1,75 x 1,45 x 1,90m (LxPxA)	1,22 x 0,72m (LxP)	830	12	5,8
	SC2-III	3	6	1,75 x 1,45 x 2,20m (LxPxA)	1,22 x 0,72m (LxP)	1.040	18	8,7
	SC2-IV	4	8	1,75 x 1,45 x 2,20m (LxPxA)	1,22 x 0,72m (LxP)	1255	24	11,6
	SC4-I	1	4	1,75 x 2,15 x 1,60m (LxPxA)	1,22 x 1,42m (LxP)	955	7,5	3,5
	SC4-II	2	8	1,75 x 2,15 x 1,90m (LxPxA)	1,22 x 1,42m (LxP)	1.210	15	7
	SC4-III	3	12	1,75 x 2,15 x 2,20m (LxPxA)	1,22 x 1,42m (LxP)	1.555	22,5	10,5
	SC4-IV	4	16	1,75 x 2,15 x 2,20m (LxPxA)	1,22 x 1,42m (LxP)	1.905	30	14
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	1,75 x 2,90 x 1,60m [illegible]	1,22 x 2,12m [illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
	SC6-II	2	12	1,75 x 2,90 x 1,90m (LxPxA)	1,22 x 2,12m (LxP)	1.455	18	8,66
	SC6-III	3	18	1,75 x 2,90 x 2,20m (LxPxA)	1,22 x 2,12m (LxP)	1.885	27	12,99

Fonte: Superfecta (2026)

Economia de Energia: A substituição geraria uma redução no consumo de energia calculada em 522,25 kWh por mês (Equação 4.7).

Análise Econômica: Considerando o preço de aquisição do novo equipamento cotado em R$ 50.000,00 e a tarifa de energia local de R$ 1,04/kWh, o cálculo do Payback Simples indicou um tempo de retorno de 92 meses (7,6 anos).

Proposta de implementação 2: Reforço do isolamento térmico

Propõe-se a instalação de uma manta de lã de rocha de alta densidade na face interna da porta, selada por uma contraplaca de aço inoxidável. Para sanar o problema crítico de infiltração de massa de ar quente verificado no mecanismo de abertura, recomenda-se a instalação de gaxetas de vedação de alto desempenho compatíveis com a temperatura de operação.

A redução da condutividade térmica da porta diminuirá as perdas para o ambiente e o tempo que as resistências precisam ficar ligadas. Os cálculos térmicos detalhados no Apêndice A apontam que a perda mensal cairia para 252 kWh/mês. Isso representa uma economia líquida de energia de 110,9 kWh por mês (Equação 4.8).

Análise Econômica: Os custos de materiais e execução foram levantados junto à empresa Thermominas e estão consolidados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Custos de materiais e execução para o novo isolamento térmico da porta.

ITEM	CUSTO ESTIMADO	OBSERVAÇÃO
Visita Técnica	R$ 150,00 — R$ 250,00	Geralmente abatida se o serviço for fechado.
Kit Materiais (6 portas)	R$ 650,00 — R$ 950,00	Lã de rocha + Gaxetas + Inox.
Mão de Obra Especializada	R$ 800,00 — R$ 1.200,00	Instalação, ajustes e vedação.
TOTAL ESTIMADO	R$ 1.600,00 — R$ 2.400,00	Valor para o conjunto completo.

Considerando o custo médio da reforma de R$ 2.000,00 e a tarifa de R$ 1,04/kWh, o tempo de Payback Simples calculado para o investimento foi de 17,3 meses (1,44 anos).

- **Proposta de implementação 3: Controle de temperatura PID e Chave Estática**

O sistema atual opera em malha aberta, sem qualquer controle automático de temperatura. O equipamento possui apenas um termopar conectado a um termômetro analógico para indicação visual, o que exige que o operador intervenha manualmente ligando e desligando as resistências em períodos intuitivos para evitar o decaimento térmico, especialmente quando o forno está sem carga. Esse processo manual resulta em oscilações bruscas, imprevisibilidade e desperdício de energia. A implementação consiste na instalação de um controlador digital com lógica PID (Proporcional-Integral-Derivativo) associado a uma chave estática industrial trifásica de 150 A. O algoritmo PID calcula a potência exata necessária para atingir e manter o setpoint, enquanto a chave estática permite o chaveamento rápido e fracionado da carga sem o desgaste mecânico de contatores comuns e fornecendo o suporte térmico e elétrico seguro para os 25 kW de potência do forno. O controle PID estabiliza a curva térmica do forno, eliminando os picos de consumo desnecessários após a estabilização da temperatura. Além da economia energética, a estabilidade térmica garante uma padronização superior na qualidade final dos produtos. A economia estimada é de 15% a 30% do consumo total do equipamento, resultando em uma redução de média de 377,24 kWh por mês (Equação 4.9).

Análise econômica: Os custos necessários para a implementação do sistema de controle da temperatura, obtidos a partir do levantamento comercial junto à Imtech

Automação, estão detalhados na Tabela 5.3, englobando os componentes de hardware e os serviços de engenharia e programação.

Tabela 5.3 – Custo estimado para a instalação do controle de temperatura.

ITEM	DESCRIÇÃO	CUSTO ESTIMADO
Hardware de Automação	Controlador PID digital (Ex: Novus N1030 ou Coel HW), Termopar tipo K industrial e Chave estática de 150 A.	R$ 2.800,00 — R$ 2.950,00
Painel e Proteção	Minipainel plástico ou metálico, disjuntor de proteção, fiação de silicone (para alta temperatura) e conectores.	R$ 200,00 — R$ 350,00
Mão de Obra Especializada	Instalação física, configuração dos parâmetros do PID (Auto-tuning), testes de carga e entrega técnica.	R$ 800,00 — R$ 1.300,00
TOTAL ESTIMADO		R$ 3.800,00 — R$ 4.600,00

Considerando o custo médio estimado de R$ 4.200,00 e a tarifa de R$ 1,04/kWh, o cálculo do Payback Simples indicou um tempo de retorno de 10,9 meses (0,9 anos).

5.4.4. Refrigeração

Para mitigar o consumo excessivo e corrigir os baixos índices de eficiência energética identificados nos equipamentos de Classe G (Refrigerador Vertical 1 e Balcão Expositor 2), foram estudadas propostas de substituição tecnológica integradas à viabilidade financeira.

- **Troca do refrigerador vertical 1 por um semelhante ao refrigerador 2:**

Esta proposta consiste na substituição do refrigerador 1 (classe G) por um modelo com características de consumo e volume equivalentes ao Refrigerador 2 (Classe D).

Economia de Energia**:** De acordo com a Equação 4.7, a troca resultaria em uma redução de consumo estimada em 109,72 kWh por mês na fatura de energia.

Análise Econômica**:** Uma vez queo novo refrigerador poderá ser fornecido pela distribuidora de bebidas, a substituição possui custo inicial zero.

- **Troca do balcão refrigerador 2 por um semelhante ao balcão 1:**

Esta alternativa consiste na substituição do Balcão 2 (Classe G), por um balcão novo com o mesmo padrão de eficiência energética do Balcão 1 (Classe D).

Economia de Energia: A troca do equipamento por um modelo mais eficiente resultará em uma economia calculada em 144,46 kWh por mês (Equação 4.7).

Análise Econômica: O valor de investimento para a compra de um balcão expositor novo, com as mesmas características operacionais e volumétricas do Balcão 1, foi cotado a partir da média de preços de mercado em R$ 5.270,00. Considerando a tarifa local de R$ 1,04/kWh, o cálculo do Payback Simples indicou um tempo de retorno de 35,1 meses.

5.5. Elaboração das recomendações e análise econômica das implementações propostas

5.5.1. Iluminação

Embora as lâmpadas atuais apresentem boa eficiência de conversão (classificação “A” em DPI), há um subdimensionamento nas áreas de produção, operando abaixo do mínimo estipulado pela norma NBR ISO/CIE 8995-1. Por isso, recomenda-se a substituição dos pontos atuais por lâmpadas LED High Power utilizando adaptadores em "Y" (Solução B), mantendo a infraestrutura existente, mas readequando o fluxo luminoso. Esta medida corrige a conformidade de segurança sem a necessidade de reforma dos circuitos elétricos e é viabilizada devido ao baixo custo de capital para a compra dos componentes.

5.5.2. Masseira

O diagnóstico indicou que o motor da masseira se encontra levemente sobredimensionado e com o rendimento inferior se comparado ao dos motores mais atuais. Embora haja uma perda mensurável (47,54 kWh/mês) a aquisição de um novo motor ou até mesmo de uma nova masseira é inviabilizada pelo baixo retorno financeiro. O tempo de retorno (payback) mostrou-se alto concluindo-se que a melhor estratégia seria manter o equipamento atual e programar a substituição por um modelo de alta eficiência ao final de sua vida útil.

5.5.3. Forno

O sistema de cocção é responsável por mais da metade do consumo total de energia da padaria. O diagnóstico do desempenho energético do forno evidenciou perdas por calor dissipado devido ao desgaste do isolamento e flutuações excessivas de temperatura causadas pelo controle manual. Recomenda-se a substituição do isolamento da porta por mantas de lã de rocha de alta densidade para reduzir diretamente a energia de pré-aquecimento e as perdas em regimes de repouso, resultando em um payback simples estimado de 17,3 meses. Também a substituição do termostato analógico por um controlador digital com algoritmo PID acoplado a um relé de estado sólido (SSR) que mitigará os picos de corrente causados pelas oscilações térmicas, apresentando um payback de 12,26 meses.

5.5.4. Refrigeração

A análise do sistema de refrigeração revelou que o refrigerador 1 consome mais energia e é menos eficiente que o refrigerador 2, que por sua vez é classificado como referência para o mercado brasileiro quanto ao seu nível de eficiência energética. O mesmo acontece para o balcão refrigerador 2 em relação ao balcão refrigerador 1. Por isso é justificada a troca, tanto do refrigerador 1 por um modelo semelhante ao refrigerador 2, quanto a troca do balcão 2 por um modelo semelhante ao balcão 1. A primeira troca terá um ganho imediato considerando que o novo refrigerador vertical poderá ser fornecido pelo distribuidor de bebidas a um custo zero. Apesar do investimento inicial, a outra troca também se mostra viável pelo ganho operacional e pelo tempo de retorno aceitável.

5.5.5. Análise econômica das implementações propostas

Para avaliar a atratividade e a viabilidade financeira das soluções integradas que apresentaram viabilidade técnica isolada (readequação iluminotécnica, isolamento da porta do forno, automação por controle PID e substituição do refrigerado 1 e balcão expositor 2), foi estruturado um estudo macroeconômico considerando um horizonte de projeto de 5 anos. Os indicadores globais obtidos sintetizam o impacto financeiro conjunto das melhorias.

Investimento Inicial Total (CAPEX): O capital necessário para a execução simultânea de todas as recomendações totaliza R$ 11.965,00, composto pela soma dos custos médios de cada intervenção viável:

$$CAPEX = R\$\,765 + R\$\,2000 + R\$\,4200 + R\$\,5270 = R\$\,11.965{,}00$$

Redução Mensal do Consumo: A ação conjunta das melhorias resulta em uma redução na demanda elétrica correspondente a 558,48 kWh/mês (15,65 %).

Economia Financeira Anual: Multiplicando-se a redução mensal acumulada de energia pela tarifa de energia local e projetando-se o ganho para o período de doze meses, o portfólio gera uma economia anual de R$ 6.969,83 no faturamento.

Payback Simples: Dividindo-se o investimento inicial pelo fluxo anual de economia gerada, o tempo de retorno para a recuperação integral do capital investido foi determinado em 1,7 anos (aproximadamente 20 meses).

Taxa Mínima de Atratividade (TMA): Arbitrou-se como taxa de desconto a Taxa Selic oficial vigente de 14,5% ao ano, servindo de balizador para o custo de oportunidade do capital.

Valor Presente Líquido (VPL): Descontando-se os fluxos de caixa gerados anualmente ao longo do ciclo de 5 anos pela TMA de 14,5%, o saldo financeiro atualizado e líquido do projeto resultou em um ganho real de R$ 11.677,99 para o caixa da empresa.

Taxa Interna de Retorno (TIR): O rendimento financeiro do projeto foi calculado em 51,98% ao ano.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho cumpriu o objetivo de realizar o diagnóstico energético da Padaria Sr. Paulino e propor soluções práticas de otimização. A auditoria energética sistemática foi fundamentada nas diretrizes da norma internacional ISO 50002:2014 e em normas técnicas nacionais (ABNT) e internacionais (ASHRAE, ASTM, ISO).

A caracterização do modo de consumo permitiu a identificação do bloco "térmico-refrigeração" como o coração do consumo da planta, respondendo por mais de 85% da demanda elétrica total. A análise do desempenho energético revelou baixas eficiências causadas por perdas térmicas e falta de controle automático no forno (eficiência global de 41,1%), equipamentos de refrigeração obsoletos de Classe G e subdimensionamento funcional da iluminação nas bancadas de trabalho.

Para solucionar essas ineficiências, foi proposto um portfólio integrado de melhorias de baixo custo, composto pelo isolamento térmico e automação PID do forno, adequação geométrica das lâmpadas existentes com adaptadores em "Y", e modernização dos equipamentos críticos de refrigeração. A análise econômica consolidada dessas intervenções demonstrou uma excelente viabilidade do projeto:

Este estudo valida, portanto, a premissa de que a eficiência energética em padarias de pequeno porte não exige pesados investimentos em infraestrutura. Com intervenções focadas em manutenção, isolamento e automação simples, é perfeitamente viável reduzir custos fixos e aumentar a competitividade do negócio de forma imediata.

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1. Iluminação: Ofuscamento e critérios da NBR ISO/CIE 8995-1 (UGR)

Propõe-se, a condução de um estudo luminotécnico computacional tridimensional detalhado aplicável às áreas produtivas e de acesso ao forno. Embora a solução baseada em adaptadores de geometria dupla (tipo 'Y') e lâmpadas LED High Power reduza o custo inicial e resolva o déficit funcional de iluminância, o aumento expressivo do fluxo luminoso traz riscos de ofuscamento. Esse efeito é nocivo em superfícies reflexivas, tais como as bancadas de inox de modelagem e a face de alumínio do forno de lastro. Futuros estudos deverão mapear as curvas de intensidade luminosa e computar o Índice de Ofuscamento Unificado (UGR — Unified Glare Rating), garantindo que os limites estabelecidos pela NBR ISO/CIE 8995-1 (UGR máximo de 22 para áreas de panificação) não sejam ultrapassados.

7.2. Controle PID: Sintonização e segurança térmica contra falhas do relé estático (SSR)

Sugere-se a realização de uma modelagem termodinâmica dinâmica do forno de lastro elétrico da padaria, acompanhada por uma análise de segurança funcional do sistema de automação proposto. Para as resistências de alta potência a parametrização dos coeficientes proporcional, integral e derivativo do algoritmo PID exige verificação matemática rigorosa a fim de mitigar picos de temperatura (overshoot), que poderiam acelerar a falha das resistências. Adicionalmente, existe a necessidade de analisar e mitigar os perigos associados ao modo de falha padrão de chaves estáticas semicondutoras de estado sólido (SSR), que se danificam em estado de curto-circuito fechado.

7.3. Integração de sistema solar fotovoltaico

Propõe-se, como desenvolvimento de trabalhos futuros, a realização de um estudo técnico-econômico de viabilidade para a instalação de um sistema de microgeração distribuída solar fotovoltaica. O dimensionamento deve ser conduzido após à implementação das medidas de eficiência recomendadas. Esta estratégia reduzirá a carga de demanda mensal primeiro, em aproximadamente 15 %. Esse decréscimo diminui a potência total necessária e o tamanho nominal do inversor de frequência, diminuindo significativamente o investimento inicial de capital (CAPEX).

8. REFERÊNCIAS

ALLOUHI, A. **Energy Auditing**. Comprehensive Energy Systems, Sidi Mohamed Ben Abdellah University, Fez (Marrocos), v. 5, p. 1–44, 2018.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE/ACCA Standard 211-2018: Standard for Commercial Building Energy Audits**. Atlanta: ASHRAE, 2018.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA; EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Tarifas e Estrutura de Consumo da Matriz Elétrica Brasileira**. Brasília: ANEEL/EPE, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PANIFICAÇÃO E CONFEITARIA (ABIP). **Indicadores da Panificação e Confeitaria Brasileira: Perfil de custos e consumo energético do setor**. Brasília: ABIP/ITPC, 2021. Disponível em: https://www.abip.org.br/. Acesso em: 28 maio 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho — Parte 1: Interior**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5413: Iluminância de interiores**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. (Reimpressão da antiga NB-57).

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM F1496-22: Standard Test Method for Performance of Convection Ovens**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. **Fundamentos da termodinâmica**. 8. ed. University of Michigan: Editora Edgar Blucher, 2013

BORTONI, E.; SANTOS, A. **Conservação de energia.** 3. ed. Itajubá, 2006

BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY (BEE). **Energy Efficiency in Electrical Utilities: Chapter 10 - Lighting System. New Delhi: BEE, 2015**. Disponível em: beeindia.gov.in. Acesso em: 28 maio 2026.

CARVALHO, José Meireles de. **Análise de Projetos de Investimento**. 3. ed. Rio de Janeiro: Mosaico, 2014.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2007.

DINCER, I. **Energy and Exergy Efficiencies**. Comprehensive Energy Systems, University of Ontario Institute of Technology, Ontário (Canadá), v. 1, p. 267–339, 2018.

DINIZ, W. **Motor Elétrico: Guia básico.** Edição seriada. Eletrobrás, 2007.

ENERGY EFFICIENCY GUIDE FOR INDUSTRY (EE GUIDE). **Thermal energy equipment: furnaces and refractories.** [S. l.]: EE Guide, 2023. Disponível em: http://www.energyefficiencyasia.org. Acesso em: 24 jun. 2026.

EUROPEAN COMMISSION. **Integrated Pollution Prevention and Control: Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency**. Sevilha: European IPPC Bureau, 2009. Disponível em: europa.eu. Acesso em: 28 maio 2026.

GELOPAR. **Catálogo de Produtos 2024/2025: Refrigeração Comercial**. Araucária: Gelopar, jun. 2024. Disponível em: https://pub.gelopar.com.br/pandora/catalogos/24_25-Catalogo-Gelopar-Revendas.pdf. Acesso em: 24 jun. 2026.

HAYASHI, Mário. **Os impactos da eficiência energética na indústria de alimentos.** Revista AdNormas, São Paulo, 14 abr. 2022. Disponível em: https://www.adnormas.com.br/artigo-exemplo. Acesso em: 24 jun. 2026

HOW Digital Temperature Controllers Save Energy Costs. **Shtrol Cooling Blog**, [s. l.], 17 dez. 2025. Disponível em: https://www.shtrolcooling.com/blog/how-digital-temperature-controllers-save-energy-costs. Acesso em: 3 jun. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Consulta Pública: Atualização da Regulamentação de Fornos Elétricos Comerciais.** Brasília, DF: Inmetro, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/inmetro/pt-br/centrais-de-conteudo/noticias/inmetro-abre-consulta-publica-para-atualizar-regulamentacao-de-fornos-eletricos-comerciais. Acesso em: 15 abr. 2026

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria nº 267, de 16 de junho de 2021: Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Fornos Elétricos Comerciais**. Rio de Janeiro: Inmetro, 2021. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002781.pdf. Acesso em: 15 abr. 2026

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria nº 309, de 20 de julho de 2021: Aprova os Requisitos Aperfeiçoados para Avaliação da Conformidade da Eficiência Energética de Edificações**. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 22 jul. 2021. Disponível em: in.gov.br. Acesso em: 28 maio 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 22044:2021: Commercial beverage coolers — Classification, requirements and test conditions.** Genebra: ISO, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 50002:2014: Energy audits — Requirements with guidance for use**. Geneva: ISO, 2014.

KALATEC. **Sistema de controle de temperatura: o que é e sua importância** Disponível em: https://blog.kalatec.com.br/sistema-controle-temperatura/. Acesso em: 5 jun. 2026.

LÂMPADAS FLUORESCENTES: Ofluorescentes.htm. Acesso em: 27 maio 2024.

LIMA, F. **Viabilidade econômica e financeira de projetos.** Volta Redonda: Editora FERP, 2019.

LORENTZZI. **Temperature controller types: a comprehensive guide**. Disponível em: https://lorentzzi.com/temperature-controller-types-a-comprehensive-guide/. Acesso em: 5 jun. 2026.

MAGAZINE LUIZA. **Máquina de massa espiral 7kg cv bivolt mana 110v/220v malta. Catálogo de produtos.** Disponível em: https://www.magazineluiza.com.br/maquina-de-massa-espiral-7kg-cv-bivolt-mana-110v-220v-malta/p/gagb2a010f/pi/msin/. Acesso em: 24 jun. 2026.

MAMEDE, J. **Instalações elétricas industriais.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MATOS, R. **Apostila de refrigeração e climatização**. Universidade Federal do Paraná, 2004.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Projeto Marco Nacional para Aceleração da Eficiência Energética e Redução de Emissões nos Refrigeradores Comerciais no Brasil**. Brasília: MME, 2021.

MODELADORA: **Confira como utilizar e cuidar deste equipamento**. 14 mar. 2022. Disponível em: https://blog.praticabr.com/modeladora-equipamento-padaria/utm_sourcerssutm_mediumrssutm_campaignmodeladora-equipamento-padaria. Acesso em: 23 maio 2024.

NOGUEIRA, L.; MARTINS, A. **Conservação de energia.** 3. ed. Itajubá, 2006.

OFICINA DA NET. **Como funciona a lâmpada incandescente?** Oficina da Net, 17 nov. 2010. Disponível em: https://www.oficinadanet.com.br/artigo/ciencia/como_funciona_a_lampada_incandescente. Acesso em: 24 jun. 2026.

O QUE É AMASSADEIRA? CONHEÇA ESTE EQUIPAMENTO DA PADARIA. 25 jul. 2023. Disponível em: https://blog.praticabr.com/o-que-e-amassadeira-conheca-este-equipamento-da-padaria/utm_sourcerssutm_mediumrssutm_campaigno-que-e-amassadeira-conheca-este-equipamento-da-padaria. Acesso em: 22 maio 2024.

O QUE É LÂMPADA INCANDESCENTE? - **UNILUMI Projetos de iluminação**. Disponível em: https://unilumi.com.br/glossario/o-que-e-lampada-incandescente/. Acesso em: 27 maio 2024.

O QUE SÃO LÂMPADAS HALÓGENAS? – **Materiais elétricos para todo o Brasil**. Disponível em: https://www.g20brasil.com.br/o-que-sao-lampadas-halogenas/. Acesso em: 27 maio 2024.

ONS. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO; ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Impactos do Regime Hidrológico e Encargos Setoriais no Custo da Geração Elétrica**. Rio de Janeiro/Brasília: ONS/ANEEL, 2025.

PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2012/27/UE, de 25 de outubro de 2012: Relativa à eficiência energética, que altera as Diretivas 2009/125/CE e 2010/30/UE e revoga as Diretivas 2004/8/CE e 2006/32/CE.

Jornal Oficial da União Europeia, L 315, p. 1–56, 2012. Disponível em: europa.eu. Acesso em: 28 maio 2026.

PRÁTICA. **Cilindro: saiba mais sobre este equipamento de padaria**. Blog Prática, 21 set. 2023. Disponível em: https://blog.praticabr.com/cilindro-equipamento-padaria/. Acesso em: 22 maio 2024.

PRÁTICA. **Forno de lastro: aprenda tudo sobre ele**. Blog Prática, 7 ago. 2023. Disponível em: https://blog.praticabr.com/forno-de-lastro-aprenda-tudo-sobre-ele/. Acesso em: 21 maio 2024.

PRÁTICA. **Forno para padaria: como escolher o ideal para seu negócio?** Blog Prática, 13 mar. 2020. Disponível em: https://blog.praticabr.com/forno-para-padaria-como-escolher-o-ideal-para-o-seu-negocio/. Acesso em: 21 maio 2024.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (PROCEL**)**. **Manual de iluminação eficiente.** Coordenação de Pierre Rodrigues. Rio de Janeiro: Eletrobrás/Procel; Cepel, 2002. Disponível em: http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/Manual_Iluminacao.pdf. Acesso em: 28 maio 2026.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (PROCEL). **Manual de iluminação eficiente.** Rio de Janeiro: Eletrobras, 2011. Disponível em: http://www.procelinfo.com.br. Acesso em: 24 jun. 2026.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (PROCEL). ***Mapeamento do Mercado de Refrigeradores Comerciais***. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2021

RODRIGUES, P. Manual de iluminação eficiente. 1. ed. PROCEL, 2001.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (SEBRAE). **Sustentabilidade em Padarias: Cartilha de Eficiência Energética e Redução de Desperdícios.** Brasília: SEBRAE, 2015. Disponível em: https://bibliotecas.sebrae.com.br/. Acesso em: 28 maio 2026.

SHARMA, P. **Energy audit: types, scope, methodology and report structure.** Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, Dong-Gu (Republic of Korea), v. 22, n. 1, p. 45–52, 1 abr. 2021

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **International Energy Data. Washington, D.C.: EIA, 2026**. Disponível em: eia.gov. Acesso em: 28 maio 2026.

YAMASHITA, R.; HADDAD, J. **Conservação de energia.** 3. ed. Itajubá, 2006

YILDIZ, I. **Energy Units, Conversions, and Dimensional Analysis**. Comprehensive Energy Systems, Dalhousie University, Nova Scotia (Canadá), v. 1, p. 1–23, 2018.

9. APÊNDICE A – Memorial de cálculo de transferência de calor no software EES

Este apêndice apresenta o memorial de cálculo e o código termodinâmico desenvolvido no software Engineering Equation Solver (EES) para quantificar as perdas de calor por condução, convecção natural e radiação através das portas e da cremalheira do forno de lastro elétrico.

O script foi estruturado em duas etapas consecutivas:

1. Diagnóstico da porta original: Determinação da taxa de perda térmica mensal sob o isolamento térmico atual e estimativa indireta de sua condutividade térmica equivalente.
2. Simulação do retrofit: Modelagem do comportamento com a substituição do isolamento atual por uma manta de lã de rocha de alta densidade, calculando a nova temperatura na superfície externa da chapa e a nova taxa de perda mensal.

Considerações e hipóteses:

- Regime permanente de operação térmica;
- Transferência de calor unidimensional (direção perpendicular às superfícies das portas);
- Propriedades físicas e condutividades térmicas constantes ao longo da faixa de temperatura de operação;
- Estado estacionário equivalente (médias diárias): As medições de temperatura interna do forno, temperatura externa da porta e da cremalheira correspondem a valores médios integrados ao longo do ciclo operacional transiente do forno. Embora existam flutuações cíclicas térmicas a modelagem termodinâmica adota esses valores como equivalentes constantes em regime permanente para fins de cálculo de balanço de energia mensal acumulado.
- Coeficiente de transferência de calor por convecção constante: Adotou-se o coeficiente médio de transferência por convecção como 12 W/(m^2*K). Esse valor é um benchmark amplamente aceito na literatura técnica para superfícies planas verticais sob condições de escoamento livre de ar em ambientes internos protegidos de correntes forçadas.

Código desenvolvido no EES:

```
"================================================================================"
" APÊNDICE A - SIMULAÇÃO DAS PERDAS TÉRMICAS E BALANÇO DE ENERGIA DO FORNO "
"================================================================================"

"----- Dados de Entrada Físicos e Geométricos (Estado Atual) -----"
T_i = 473 [K]              "Temperatura média interna do forno"
T_e = 328 [K]              "Temperatura média da superfície externa da porta"
T_inf = 300 [K]            "Temperatura ambiente média da área de produção"
x = 0,02 [m]               "Espessura  da camada da porta"
epsilon_aluminio = 0,09    "Emissividade térmica da chapa de alumínio externa"
```

```
sigma = 5,6697e-8 [W/(m^2*K^4)] "Constante de Stefan-Boltzmann"
A_porta = 1,17 [m^2]        "Área total de escoamento das 6 portas"
h = 12 [W/(m^2*K)]          "Coeficiente de convecção natural externa estimado"

"----- Parâmetros Térmicos da Cremalheira (Ponte Térmica) -----"
T_cremalheira = 388 [K]     "Temperatura superficial medida na cremalheira de ferro"
epsilon_ferrofundido = 0,6  "Emissividade térmica do ferro fundido"
A_cremalheira = 0,0585 [m^2]"Área de exposição da cremalheira"

"----- Propriedades Térmicas de Melhoria (Proposta de Intervenção) -----"
k_laderocha = 0,04 [W/m*K] "Condutividade térmica da manta de lã de rocha de alta
densidade"

"========================================================================
=="
"                    EQUACIONAMENTO                    "
"========================================================================
=="

"1. Cálculo do fluxo de energia total que sai do volume de controle (Estado Atual)"
q_rad_porta = epsilon_aluminio * sigma * A_porta * ((T_e^4) - (T_inf^4))
q_conv_porta = h * A_porta * (T_e - T_inf)

q_rad_crema = epsilon_ferrofundido * sigma * A_cremalheira * ((T_cremalheira^4) - (T_inf^4))
q_conv_crema = h * A_cremalheira * (T_cremalheira - T_inf)

"Perda térmica total atual acumulada nas portas"
q_sai = q_conv_porta + q_rad_porta + q_rad_crema + q_conv_crema

"2. Cálculo do coeficiente de condutividade real 'k' do isolamento atual degradado"
"Pela conservação de energia: q_sai = q_entra por condução"
k = -q_sai * x / ((T_e - T_i) * A_porta)

"3. Simulação Térmica com o novo isolamento de Lã de Rocha (Estado Proposto)"
"No balanço de energia modificado, Tx é a nova temperatura externa de equilíbrio"
(-k_laderocha * (T_x - T_i)) / x = h * (T_x - T_inf) + epsilon_aluminio * sigma * ((T_x^4) -
(T_inf^4))

"Cálculo das novas perdas térmicas totais estimadas por condução"
q2_sai = (h * (T_x - T_inf) + epsilon_aluminio * sigma * ((T_x^4) - (T_inf^4))) * A_porta
```

Na figura A.1 são mostrados os valores encontrados para o fluxo de calor que sai pela porta e cremalheira do volume de controle por convecção e radiação, o somatório do fluxo total, o coeficiente k de condutividade do isolamento atual e a nova temperatura da porta e o novo fluxo de calor total que sai do volume de controle para a substituição do isolamento.

Figura A.1 – Soluções e convergência das variáveis térmicas de isolamento e perdas de calor

Table 1

1..10	$q_{rad;porta}$ [kW]	$q_{conv;porta}$ [kW]	$q_{rad;crema}$ [kW]	$q_{conv;crema}$ [kW]	q_{sai} [kW]	k [W/m*K]	T_x [K]	$q2_{sai}$ [kW]
Run 1	20,74	393,1	28,98	61,78	504,6	0,05949	323,7	349,4

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A energia total mensal que se perde através do isolamento atual da porta e do novo isolamento pode ser calculada em kWh/mês:

$$E(atual) = q_{sai} \times 24\ horas \times 30\ dias$$

$$E(atual) = 504\ kW \times 24\ horas \times 30\ dias = 362{,}8\frac{kWh}{mês}$$

$$E(novo) = q2_{sai} \times 24\ horas \times 30\ dias$$

$$E(novo) = 349{,}4\ kW \times 24\ horas \times 30\ dias = 251{,}5\frac{kWh}{mês}$$