

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

CINTIA LEMES

INVESTIGAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO

**Bagé
2021**

CINTIA LEMES

INVESTIGAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientadora: Sabrina Neves da Silva

**Bagé
2021**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

L552i Lemes, Cintia
INVESTIGAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA
DE FUNDIÇÃO / Cintia Lemes.
101 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)--
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIA,
2021.

"Orientação: Sabrina Neves da Silva".

1. Eficiência Energética. 2. Fundição. 3. Perdas. I.
Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

CINTIA LEMES

INVESTIGAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientadora: Sabrina Neves da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 04 de outubro de 2021.

Banca examinadora:

Prof. Dra. Sabrina Neves da Silva
Orientadora
UNIPAMPA

Prof. Dr. Alexandre Ferreira Gálio
UNIPAMPA

Prof. Dr. Luciano Vieceli Taveira
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **SABRINA NEVES DA SILVA, Diretor(a) Campus Bagé**, em 30/09/2021, às 13:45, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normavas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANO VIECELI TAVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/10/2021, às 14:40, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normavas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALEXANDRE FERREIRA GALIO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/10/2021, às 15:32, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normavas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.uni_pampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_or_gao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0625805** e o código CRC **88AD31B6**.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a minha orientadora Profa. Dra. Sabrina Neves, pois se não fosse por ela, desde a metade da graduação quando ela surgiu como a melhor orientadora que há, não chegaria até este momento. Aos professores da Unipampa, que de diferentes maneiras contribuíram para que fosse possível chegar até aqui, em especial ao professor Luiz, que me mostrou o verdadeiro sentido da educação, quando eu estive apenas no modo automático.

Agradeço imensamente aos meus amigos Iago e Pedro, pelas noitadas de estudo e por mostrarem um outro lado da universidade, ao Lalim, as minhas duas Amandas, Eloane e Wander, por terem sido meus grandes presentes da graduação, por termos caminhado juntos com muito apoio e amizade, minha admiração por eles é imensa.

Meu maior agradecimento vai para minha família que mesmo sem ter o conhecimento do que é a Universidade, me deu todo o apoio possível, prezando acima de tudo pelo meu bem estar físico e mental, palavreando minha mãe “Não vai ficar doente, sem comer ou dormir direito por causa da escola”. Também ao meu namorado Elton Luis por ter sido um grande incentivador e meu maior apoio nessa etapa final. E não menos importante agradeço a todos os meus colegas e amigos do Xadrez Chapecó e Sorocaba, pois foram grande inspiração para a minha jornada.

“Ninguém nunca ganhou uma partida de xadrez abandonando.”

Savielly Tartakower

RESUMO

Desde a crise do petróleo ocorrida em 1973, que afetou fortemente as políticas energéticas, diversos países vêm estudando maneiras de diminuir a dependência de combustíveis fósseis, sem prejudicar a evolução de sua economia. No Brasil, um país de matriz elétrica predominantemente renovável, uma série de apagões ocorridos a partir de 2001 levou o governo a instaurar medidas administrativas e práticas de redução, como blecautes programados e taxaço dos setores ou consumidores que não atendessem às metas de economia de energia prevista. A apuração dos motivos que culminaram nestes eventos revelou, dentre outras coisas, a necessidade de diversificação da matriz energética e a importância de criar incentivos e medidas de eficiência energética. Neste contexto, após análise setorial do consumo de energia no país, observou-se que o setor industrial é historicamente o maior consumidor, contudo, é também o setor que menos desenvolve práticas de eficiência energética, como possível visualizar ao longo dos anos pela ODEX Brasil. Destaque para o setor de ferro-ligas, aço e pelotas que possui grandes demandas energéticas, sendo então selecionado o setor de fundição para estudo. Foram analisados dados históricos da ABIFA, concluindo que dentro dessa indústria poucos projetos de eficiência energética são contemplados, mesmo a energia sendo um insumo de elevado custo dentro dessa. É então, estudado neste trabalho como se comporta a distribuição de energia na indústria, e após identificado o maior insumo consumido (no caso energia elétrica), foram investigadas as diversas perdas agregadas nos processos, como exemplo, na etapa de fusão do material as perdas oriundas da má qualidade da sucata a ser fundida, nos motores o superdimensionamento deste equipamento ou a ineficiência luminosa nos setores. Então, após pesquisa por meio de bibliografias já reconhecidas, foram levantadas práticas para mitigação das perdas na etapa de fusão, iluminação, motores, bombas e exaustores, também foram levantadas novas tecnologias possíveis de se aplicar nessa indústria. Algumas dessas práticas são: Utilização de pré-aquecedores, medidas que reduzem a demanda de energia elétrica em cerca de 30 a 60 kWh/t, inserção de concentrador de fluxo magnético “*shunt*”, diminuindo as perdas nas bobinas em até 5%, reaproveitamento do calor residual, limpeza da carga metálica, entre outras.

Palavras-Chave: Eficiência energética. Fundição. Perdas.

ABSTRACT

Since the 1973 oil crisis, which strongly affected energy policies, several countries have been studying ways to reduce their dependence on fossil fuels, without harming the evolution of their economy. In Brazil, a country with a predominantly renewable electricity matrix, a series of blackouts that took place from 2001 onwards led the government to institute administrative measures and reduction practices, such as programmed blackouts and taxation of sectors or consumers that did not meet energy saving targets expected. The investigation of the reasons that led to these events revealed, among other things, the need to diversify the energy matrix and the importance of creating incentives and energy efficiency measures. In this context, after sectoral analysis of energy consumption in the country, it was observed that the industrial sector is historically the largest consumer, however, it is also the sector that least develops energy efficiency practices, as seen over the years by ODEX Brasil. Highlight for the ferroalloys, steel and pellets sector, which has large energy demands, being then selected the foundry sector for study. Historical data from ABIFA were analyzed, concluding that within this industry few energy efficiency projects are contemplated, even though energy is a high-cost input within this industry. It is then studied in this work how the distribution of energy in industry behaves, and after identifying the largest input consumed (in this case electricity), the various aggregate losses in the processes were investigated, for example, in the material melting stage, the losses arising from the poor quality of the scrap to be melted, in the engines, the oversizing of this equipment or the luminous inefficiency in the sectors. So, after researching through already recognized bibliographies, practices were found to mitigate losses in the melting stage, lighting, motors, pumps and exhaust fans, new technologies that could be applied in this industry were also raised. Some of these practices are: Use of pre-heaters, measures that reduce electricity demand by around 30 to 60 kWh/t, insertion of a "shunt" magnetic flux concentrator, reducing coil losses by up to 5%, reuse of residual heat, cleaning the metallic load, among others.

Keywords: Energy Efficiency. Casting. Losses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha do tempo com principais programas de eficiência energética no Brasil	20
Figura 2 – Gráfico do consumo final energético por fonte (%), por setor industrial.....	25
Figura 3 – Participação dos setores no consumo final de energia da indústria.....	26
Figura 4 – ODEX Brasil	27
Figura 5 – Ciclo PDCA	30
Figura 6 – Relação entre PDCA e a estrutura do sistema de gestão da energia	31
Figura 7 – Tipos de Fundidos.....	36
Figura 8 – Fluxograma do processo de fundição	37
Figura 9 – Etapas do processo de fundição	38
Figura 10 – Entradas e saídas na etapa de fusão.....	49
Figura 11 – Forno de indução a canal.....	51
Figura 12 – Forno de indução a cadinho	51
Figura 13 – Estágios de operação durante a fusão em um forno de indução	52
Figura 14 – Diagrama de <i>Sankey</i> Forno de indução Cadinho.....	53
Figura 15 – Sistema de pré-aquecimento	57
Figura 16 – Profundidade de penetração da corrente	59
Figura 17 – Espessura do revestimento VS. Consumo de energia	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação entre o tipo de forno, liga produzida e refratário utilizado de acordo com a região do forno.....	39
Quadro 2 – Indicadores de EE para indústria de fundição	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção Brasileira de Fundidos.....	41
Tabela 2 – Insumo para Fundidos	42
Tabela 3 – Consumo de energia na indústria de fundição	43
Tabela 4 – Identificação do potencial de economia no consumo de energia em um ano	47
Tabela 5 – Efeito da qualidade da sucata na energia consumida	55
Tabela 6 – Perdas de energia em um forno a cadinho com tampa aberta.....	56
Tabela 7 – Exemplo de recomendações para iluminação em atividades industriais	65
Tabela 8 – Principais características das lâmpadas elétricas	66
Tabela 9 – Ganhos em eficiência através de combate ao desperdício	69

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ABESCO - Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia

BEN - Balanço Energético Nacional

CONPET - Programa Nacional de Racionalização de uso dos Derivados de Petróleo e Gás Natural

EE - Eficiência Energética

ENCE - Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

ESCO- *Energy Saving Company* – Empresa de Conservação de Energia

FIEMG - Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais

FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos

GAFEA - Grupo de Estudos sobre Fontes Alternativas de Energia

IEA - Agência Internacional de Energia

HLS - *High Level Structure* (Estrutura de Alto Nível)

ISO 50.001 Norma de Gestão de Energia da *International Organization for Standardization* (ISO)

LED - *Light Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz)

MF - Ministério da Fazenda

MME - Ministério de Minas e Energia

NPSH - *Net Positive Suction Head*

P&D - Pesquisa e Desenvolvimento

PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem

PDE - Plano Decenal de Energia

PEE - Programa de Eficiência Energética das Concessionárias de Energia Elétrica

PIB - Produto Interno Bruto

PNE 2030 - Plano Nacional de Energia 2030

PNEf - Plano Nacional de Eficiência Energética

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

ROL - Receita Operacional Líquida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO	17
1.2	Objetivo Geral.....	17
1.3	Objetivos Específicos	17
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1.	Eficiência Energética	17
2.1.1	Conceito	17
2.1.2	Programas de Eficiência Energética no Brasil	20
2.1.2.1	Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE)-1984.....	21
2.1.2.2	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) – 1985	21
2.1.2.3	Programa Nacional de Racionalização de Uso de Derivados de Petróleo e Gás Natural (CONPET) – 1991.....	22
2.1.2.4	Lei 9.991/2000	22
2.2	Consumo de energia e panorama da eficiência energética.....	23
2.3	Sistema De Gestão Energética – ABNT NBR ISO 50001.....	27
2.4	Indicadores de Eficiência Energética... ..	32
2.5	A indústria de Fundição.....	34
2.5.1	Etapas do processo de Fundição... ..	37
2.5.2	Consumo de Energia na Indústria de Fundição... ..	41
2.6	Indicadores de Desempenho Energético na Industria de fundição.....	44
3	METODOLOGIA	46
4	APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DE RESULTADOS	47
4.1	Auditoria Energética- Implementação do SGen	47
4.2	Fusão.....	48

4.2.1	Forno de indução...	50
4.2.2	Preparação da carga...	54
4.2.2.1	Conservação de Energia em etapas anteriores a fusão...	54
4.2.2.2	Secadores e pré-aquecedores.....	56
4.2.3	Conservação de Energia na etapa da fusão	58
4.2.3.1	Transformador	58
4.2.3.2	Conversor	59
4.2.3.3	Bobina	60
4.2.3.4	Revestimento/Perdas térmicas (Conservação de energia durante o aquecimento do material).....	62
4.2.3.5	Recuperação de Calor.....	63
4.3	Iluminação	64
4.4	Ar comprimido	67
4.5	Motores	71
4.6	Bombas e exaustores	73
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
	REFERÊNCIAS.....	78
	APÊNDICES	84

1 INTRODUÇÃO

O uso intensivo de energia é uma característica e consequência das economias modernas, em países em desenvolvimento, a evolução do poder aquisitivo permite que a população tenha maior acesso a bens e serviço, conseqüentemente a produção de bens tende a crescer, bem como o consumo de energia, vale ainda ressaltar que esses países também têm maior dificuldade em acessar tecnologias de mitigação de emissão de poluentes, ou mais eficientes (ABREU; OLIVEIRA; GUERRA, 2010, p.13).

Além do grande problema mundial que é a emissão de CO₂ na atmosfera, a diminuição de recursos naturais, mostra que no Brasil, a sociedade não está preparada para a crescente demanda de energia. No ano de 2021, o país enfrenta as conseqüências da maior crise hídrica em 91 anos, dentre as quais está a criação de uma nova bandeira tarifária e o risco iminente de um possível apagão. Dessa forma, é desejável que um conjunto de ações seja planejado e executado de modo a reduzir as emissões de gases causadores do efeito estufa e auxiliar no cumprimento da demanda de energia, sem prejudicar o desenvolvimento econômico. Sendo uma delas a implantação de práticas de eficiência energética.

Visto isso, o presente trabalho propõe-se a estudar a eficiência energética aplicada em um ramo da atividade industrial. Entende-se como eficiência energética a racionalização de energia, compreendendo ações e/ou medidas comportamentais, tecnológicas e econômicas, as quais, ao serem realizadas sobre sistemas e processos de conversão/produção, resultem em diminuição da demanda energética, sem prejuízo da quantidade ou da qualidade dos bens e serviços produzidos (GODOI, 2011, p. 73).

Nesse contexto, no Brasil há diversos programas, que destinam esforços e recursos em prol da redução da demanda energética, tais como: Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), o PEE (Programa de Eficiência Energética), o Conpet (Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural) e o PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem). Há também a Lei de Eficiência Energética, nº 10.295/2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia.

Após análises da distribuição do consumo de energia do Brasil e dos setores que mais contribuem para o desenvolvimento da eficiência energética, foi observado

que o setor industrial- maior consumidor de energia- é o setor que menos contribuiu com a eficiência energética. Neste trabalho propôs-se estudar as possibilidades de eficiência energética na indústria fundição a qual teve, em 2019, uma produção de 2288 10³t, de metal, configurando o Brasil entre os dez maiores produtores de fundidos do mundo (BRASIL, 2020, p. 16).

Após análise detalhada do consumo de energia dentro dessa indústria, foi observado que o setor que mais consome energia é o da fusão, representando mais de 70% do consumo de energia na indústria (Arasu; Jeffrey, 2009, p. 331). Sendo assim é a área com maiores possibilidades de ganhos em eficiência, devido a isso fez-se o estudo por setor, onde boas práticas de consumo foram indicadas tanto como inovações/melhorias que poderiam ser feitas, como exemplo a análise e substituição de luminárias na indústria, adoção de sistema de recuperação de calor, pré-aquecimento da carga, entre outras.

1.1.1 OBJETIVOS

1.1.2 Objetivo Geral

Fazer uma revisão bibliográfica das possibilidades de eficiência energética em fundições, bem como oportunidades de aplicações.

1.1.3 Objetivos Específicos

- Investigar oportunidades de eficiência energética em diferentes setores da indústria de fundidos.
- Identificar novas tecnologias aplicáveis a essa indústria.
- Identificar oportunidades para o uso racional de energia.
- Entender como funciona a indústria de fundição.
- Apresentar o panorama e importância da eficiência energética.
- Revisão de indicadores já existentes utilizados por essa indústria.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção será feita uma revisão bibliográfica sobre o conceito de eficiência energética (EE) e alguns dos programas existentes no país, bem como o panorama brasileiro de EE. Após, serão apresentadas as principais etapas dentro de uma indústria de fundição e o consumo de energia nesse tipo de indústria. Indicadores energéticos serão abordados no final desta seção com intuito de apresentar maneiras de avaliação do consumo de energia.

2.1 Eficiência Energética

2.1.1 Conceito

Um processo eficiente é aquele que produz um determinado bem com a menor quantidade de matéria prima, mantendo a qualidade dessa. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), conceitua esse termo no que tange energia, como sendo a capacidade de gerar a mesma quantidade de energia com menos recursos naturais, ou obter o mesmo serviço ("realizar trabalho") com menos energia. Segundo Hordeski (2005 *apud* ACORONI; SILVA; SOUZA, 2013, p.5), eficiência é a capacidade de equipamentos que operam em ciclos ou processos, produzirem os resultados esperados.

Adota-se então uma definição geral que resume esses conceitos: eficiência energética é a relação entre e a quantidade de energia final utilizada e de um bem produzido ou serviço realizado (Gaspar, 2018, p.9). Sendo representada então pela Equação 1:

$$\text{Eficiência Energética} = \frac{\text{Energia do produto}}{\text{Energia total consumida}} \quad (1)$$

Para a engenharia essa razão é caracterizada termodinamicamente entre a energia de saída e entrada do sistema. conforme a Equação 2 (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 2007 *apud* BLOS, 2020, p. 21):

$$\text{Eficiência Energética}_{\text{fusão}} = \frac{\text{Energia saída}}{\text{Energia entrada}} \quad (2)$$

A crise/choque do petróleo que ocorreu entre 1973-74 e 1979-81 trouxeram à sociedade a preocupação com eficiência energética, e a constatação da escassez do recurso energético petróleo, bem como a necessidade de ações voltadas à conservação e maior eficiência no uso de seus derivados e a imprescindível ampliação da matriz energética (Souza *et al.*, 2021, p. 3). A previsão média no Brasil, de crescimento populacional para o período de 2021 à 2030 é de 0,6% a.a., alcançando o patamar de 225,4 milhões de habitantes em 2030 (Domingues *et al.*, 2020, p. 17), logo, a eficiência energética deve ser vista como um importante vetor para o atendimento da demanda futura de energia, devido a isso, o tema passou a ser amplamente discutido por toda a comunidade nacional e internacional. Podendo ser destacados os seguintes estudos:

- Agência Internacional de Energia (IEA): Panorama mundial de energia (*World Energy Outlook*) e o Relatório de Mercado de EE (*Energy Efficiency Market Report*).
- Administração de informações de Energia (Energy Information Administration/U.S DOE): Panorama Anual de energia (*Annual Energy Outlook*).
- ODYSSEE-MURE: Políticas de EE na União Européia (*Energy Efficiency Policies in the European Union*).
- EPE (Empresa de Pesquisa Energética): Plano Decenal de Energia (PDE), o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) e estudos do Plano Nacional de Energia 2050 (PNE).

Como discutido na seção anterior, o consumo de energia está relacionado à atividade econômica do país, é comum que com maior poder aquisitivo por parte da população implique numa cadeia de consumo maior, logo seria uma relação direta o aumento do consumo de bens e serviços e o aumento no consumo de energia, contudo em países desenvolvidos essa relação não é tão direta, Goldenberg (1997 *apud* Abreu; Oliveira; Guerra, 2010, p.13), mostra que nos países desenvolvidos, nas décadas de setenta e oitenta, foi possível prover os mesmos serviços energéticos, mas com uma menor entrada de energia, isso só foi possível devido às novas tecnologias disponíveis comercialmente, significando um desacoplamento entre o crescimento do PIB e o crescimento de energia nessas décadas.

Dados da Agência Internacional de Energia (IEA) apontam que essa relação vem caindo em diversos países, na China, a intensidade energética caiu 5,2% em 2016. Nos Estados Unidos da América (EUA), a queda foi de 2,9%; e na União Europeia, de 1,3%, enquanto no Brasil esse indicador subiu 2% em 2016. Nos cálculos da agência, os bônus de produtividades decorrentes dos ganhos de intensidade energética em 2016 foram de US\$ 1,1 trilhão na China, US\$ 532 bilhões nos EUA e US\$260 bilhões na UE. No mundo, foram US\$2 trilhões (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA, 2017).

Outro impacto significativo que há em um maior consumo de energia, quando em países sem tecnologias apropriadas, é uma maior emissão de gases do efeito estufa. A fim de reduzir essas emissões sem prejudicar o desenvolvimento econômico, a eficiência energética passa a ser uma possível solução.

Entretanto, essa prática ainda se mostra de difícil difusão, especialmente pelo setor que tem o maior consumo de energia que é o industrial, isso se deve a diversos fatores como a falta de dados, incerteza na relação custos e benefícios, visto que geralmente necessita de considerável investimento inicial, outra barreira é a limitação do número de auditores e empresas de serviços de energia (ESCOs) com experiência em processos industriais (MACHADO *et al.*, 2019, p.46).

A Empresa de Pesquisa Energética (2019), vem colaborando para a disseminação do tema com ações como:

- Construção de uma base de dados sobre eficiência energética, o que inclui a identificação dos potenciais de eficiência energética bem como os custos associados aos mesmos;
- Elaboração de estratégias e portfólio de ações para incentivo ao aumento da eficiência energética no Brasil;
- Monitoramento do progresso de indicadores de eficiência energética em diversos setores, retroalimentando a análise de impacto de políticas voltadas à eficiência energética.

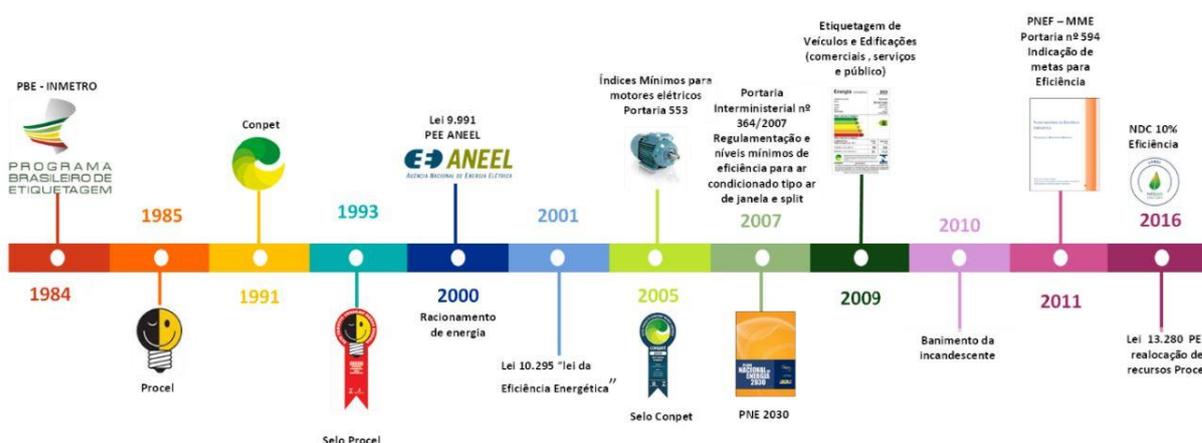
Como forma de difusão de práticas da eficiência energética, surgem na década de 80 programas governamentais com esse objetivo. Sendo alguns deles descritos na sequência.

2.1.2 Programas de Eficiência Energética no Brasil

O Brasil possui, desde a década de 80, programas de Eficiência Energética reconhecidos internacionalmente como: o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), CONPET e o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Antes mesmo, em 1975, o Grupo de Estudos sobre Fontes Alternativas de Energia (GEFAE) organizou, em parceria com o Ministério de Minas e Energia (MME), um seminário sobre conservação de energia, sendo essa a primeira iniciativa sobre discussão sobre eficiência energética no país. No mesmo ano, a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) obteve autorização da Presidência da República para alocar recursos financeiros à realização do Programa de Estudos da Conservação de Energia, passando a desenvolver e apoiar estudos visando à busca de maior eficiência na cadeia de captação, transformação e consumo de energia (SOUZA *et al.*, 2021, p. 3).

Contudo é reconhecido como início dos programas de eficiência energética no Brasil, o ano de 1984 com a criação do Programa Brasileiro de Etiquetagem, que rapidamente evoluiu para outras medidas também com esse foco, a figura 1. mostra a linha do tempo destes programas, sendo os principais posteriormente descritos:

Figura 1. Linha do tempo com principais programas de eficiência energética no Brasil



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2019)

Especificamente para o setor industrial, as principais políticas/mecanismos adotadas foram elaboração de Índices mínimos de motores e transformadores de distribuição, etiquetagem de motores, bombas e transformadores de distribuição,

Programa de Eficiência Energética da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e PROCEL Indústria (MACHADO *et al.*, 2020, p.27).

2.1.2.1 Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) – 1984

Este programa tem a finalidade de contribuir para a racionalização do uso da energia no Brasil através da prestação de informações sobre a eficiência energética dos equipamentos disponíveis no mercado nacional, fornecendo informações sobre o desempenho dos produtos, considerando atributos como a eficiência energética, o ruído e outros critérios que podem influenciar a escolha dos consumidores. Ele também estimula a competitividade da indústria, que deverá fabricar produtos cada vez mais eficientes. O PBE é coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2021).

A forma de apresentar esses índices de desempenho é através da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), que classifica os equipamentos, veículos e edifícios em faixas coloridas, onde "A" é o critério utilizado para indicar o equipamento mais eficiente e "E" o menos eficiente, também informações, como, por exemplo, o consumo de combustível dos veículos e a eficiência de centrifugação e de uso da água em lavadoras de roupa (PROCELIINFO, 2020).

2.1.2.2 Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) – 1985

O PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica é um programa de Governo Federal, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e executado pela Eletrobras (Secretaria Executiva do Programa). Tem o objetivo de promover ações de eficiência energética elétrica na geração, transmissão e distribuição de energia, bem como para o usuário final, destinadas a:

- Aumentar a competitividade do País;
- Postergar investimentos no setor elétrico; e
- Reduzir a emissão de gases de efeito estufa.

O programa atua em diversas áreas, como: iluminação pública, apoiando prefeituras no planejamento e implementação de projetos de melhorias na iluminação

pública e sinalização semafórica. Nas edificações, através da disponibilização de recomendações especializadas e simuladores de uso eficiente de energia no setor da construção civil. No setor industrial e comercial com treinamentos, manuais e ferramentas computacionais voltados para a redução do desperdício de energia nos segmentos industrial e comercial, com a otimização dos sistemas produtivos, e outras áreas (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, 2020).

2.1.2.3 Programa Nacional de Racionalização de Uso de Derivados de Petróleo e Gás Natural (CONPET) – 1991

O CONPET foi criado visando a promoção do uso mais eficiente dos derivados de petróleo e do gás natural, bem como para prover maior racionalidade para o suprimento destes combustíveis. Seu maior objetivo era desenvolver um amplo conceito de conservação de energia nos setores de petróleo e gás natural.

Foi instituído em 1991 por Decreto Presidencial, o qual afirma ser seus objetivos: “desenvolver e integrar as ações que visem à racionalização do uso dos derivados de petróleo e do gás natural” e “obter um ganho de eficiência energética de 25% no uso dos derivados de petróleo e gás natural nos próximos 20 anos, sem afetar o nível de atividade” (NETO; SANTOS, 2004, p. 5).

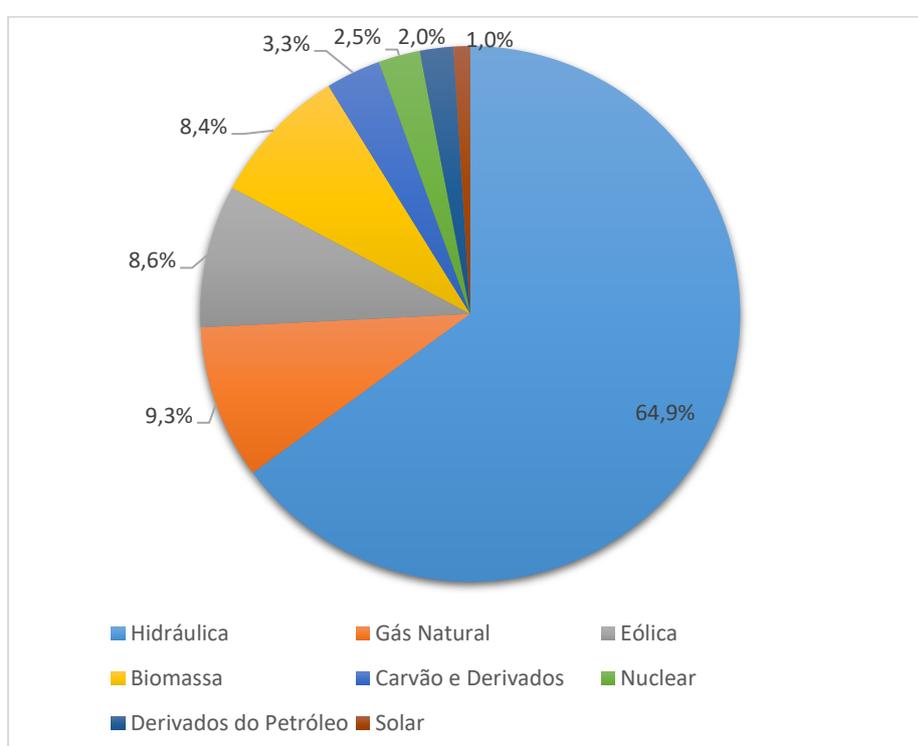
2.1.2.4 Lei 9.991/2000

Esta lei regulamenta a obrigatoriedade dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica. De acordo com esta lei, as distribuidoras devem aplicar um percentual mínimo da receita operacional líquida (ROL) em Programas de Eficiência Energética: 0,25% de sua receita operacional, e estabelece como responsabilidade da Agência Nacional de Energia Elétrica fiscalizar, monitorar e divulgar os resultados relativos à esta obrigatoriedade (CECONE *et al.*, 2016, p. 144).

2.2 Consumo de energia e panorama da eficiência energética

Como apresentado no Balanço Energético Nacional, o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que responde por 64,9% da oferta interna. O gráfico 1 apresenta a estrutura da oferta interna de eletricidade no Brasil em 2019 (Guerra *et al.*, 2020, p. 15).

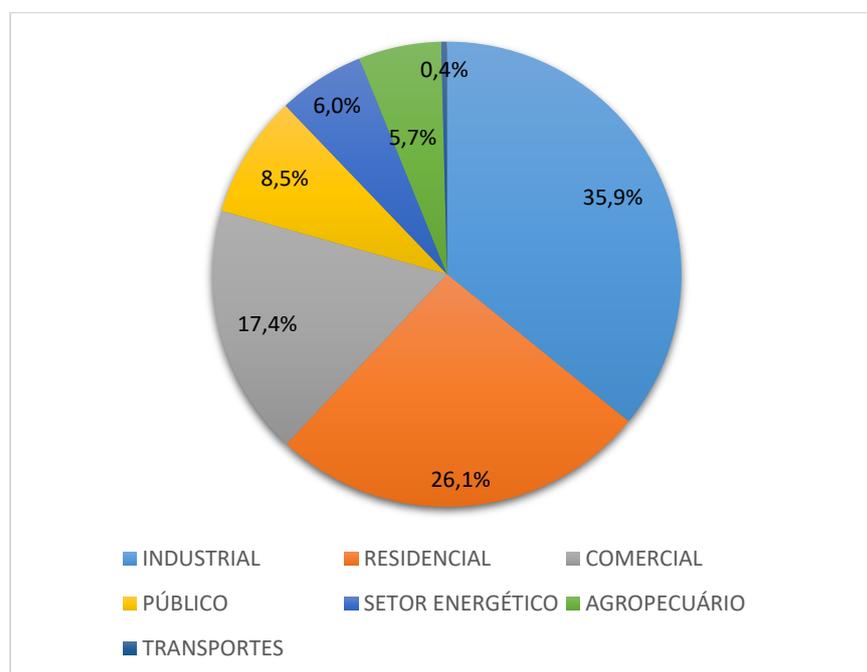
Gráfico 1. Oferta interna de energia elétrica por fonte



Fonte: Adaptado de Balanço Energético Nacional (2020)

As fontes renováveis representam 83,0% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável. Sob a ótica da utilização de fontes renováveis, o Brasil encontra-se na vanguarda se comparado com o restante do mundo. No lado do consumo, o maior consumidor de energia do país é o setor industrial, respondendo por 35,9% de todo o consumo final no ano de 2019 (Guerra *et al.*, 2020, p. 15), seguido pelo setor de residencial com 26,1%. O gráfico 2 mostra a participação de todos os setores:

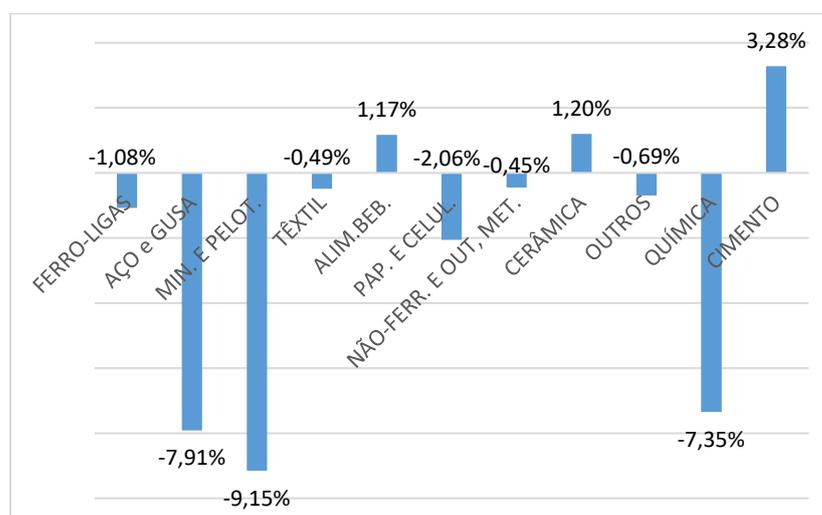
Gráfico 2. Oferta interna de energia elétrica por fonte



Fonte: Balanço Energético Nacional (2020)

É apresentado no Balanço Energético Nacional a retração no consumo de energia dos diferentes setores, tendo o setor industrial uma retração de -2,44% no consumo de energia elétrica, em relação ao ano anterior (2019), com maior destaque para os segmentos de ferro-ligas, aço e pelotas, gráfico 3. (Guerra *et al.*, 2020, p. 18).

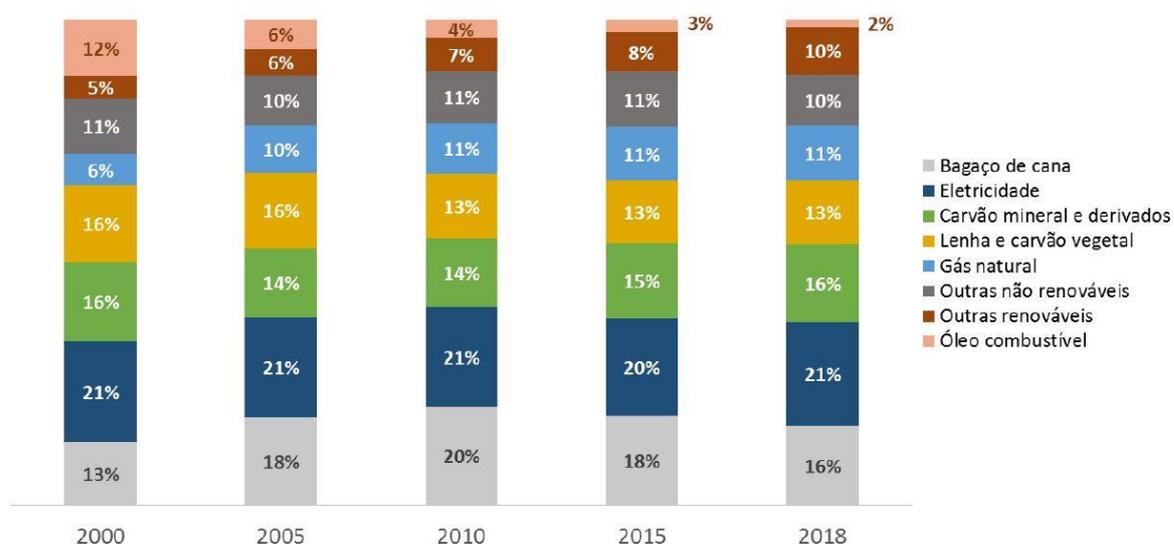
Gráfico 3. Crescimento do consumo de eletricidade no setor indústria



Fonte: Adaptado de Balanço Energético Nacional (2020)

Mesmo com essa retração ainda é o setor com maior demanda de energia elétrica no país, na figura 2 é mostrado o consumo final energético por fonte até o ano de 2018, para a indústria, onde é visto que o insumo mais consumido é a eletricidade, e o bagaço de cana que vem tendo um decréscimo desde 2010, seguido pelo carvão mineral e lenha e carvão vegetal, que vem se mantendo estáveis.

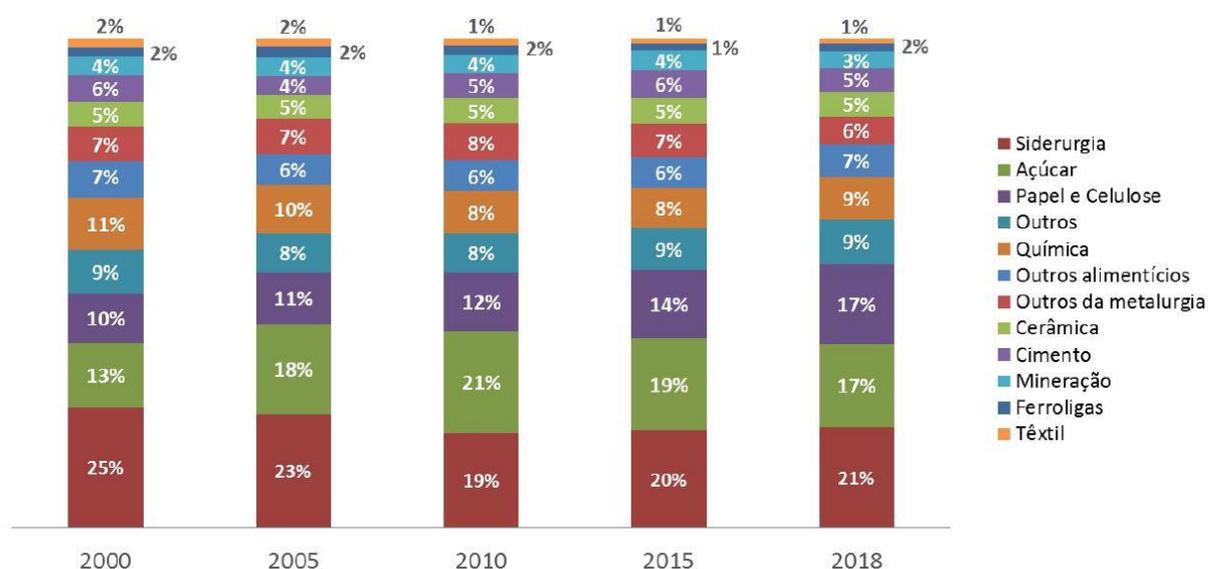
Figura 2. Consumo final energético por fonte (%), por setor industrial



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2019)

Já os maiores consumidores de energia na indústria (Figura 3) são os setores de siderurgia, açúcar, papel e celulose, que responderam a 55% do consumo total em 2018.

Figura 3. Participação dos setores no consumo final de energia da indústria

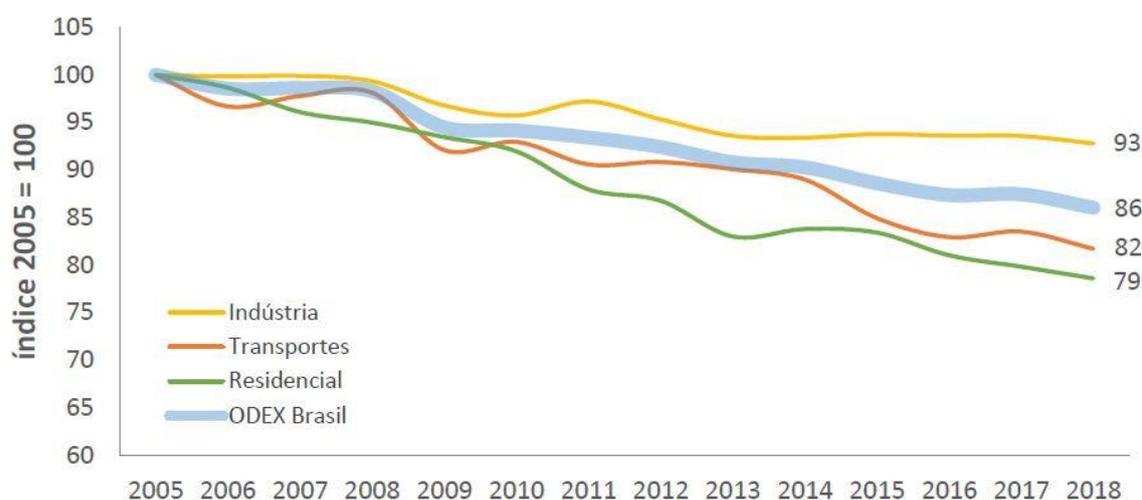


Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2019)

É observável que o setor siderúrgico, historicamente é o setor com maior consumo de energia, indicando que talvez o tema eficiência energética não tenha grande destaque nesse setor. Visto como é o consumo de energia na indústria, é imprescindível investigar o panorama da eficiência energética nos diferentes setores da economia, na figura 4, são mostrados os resultados do ODEX para a economia brasileira.

Para a análise foi fixado o ano de 2005 como base (100), onde o decréscimo no índice de consumo do valor 100 representa ganhos em eficiência energética, do contrário representa uma piora na eficiência. O período analisado (2005 a 2018) abrangeu os setores industrial, residencial, transportes, energético, serviços e agropecuária (MACHADO *et al.*, 2019, p.23).

Figura 4. ODEX Brasil



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2019)

O país ficou mais eficiente energeticamente entre 2005 e 2018, cerca de 14%, de acordo com o ODEX apurado em 2018 (Machado *et al.*, 2020, p. 24). É também possível verificar através dessa figura que o setor que tem menor contribuição é o setor industrial, mesmo sendo o setor com maior consumo de energia elétrica no país.

É importante apontar que consta no Plano Nacional de Eficiência Energética, o valor de 10%, é tido como meta de redução de energia elétrica ao final do horizonte previsto no PNE 2030 referente ao cenário B1 (Consumo Base), a estimativa é que em 2030, a economia acumulada de energia seja de 106.623 GWh. Esta economia de energia envolve ações relacionadas ao Progresso Tendencial e Induzido de Eficiência Energética (Ministério de Minas e Energia, 2011, p.10).

2.3 Sistema De Gestão Energética – ABNT NBR ISO 50001

Serão apresentados alguns conceitos essenciais para a sustentação do SGEEn.

- **Intensidade Energética:** É um indicador da eficiência da economia, que demonstra a relação entre a energia final ofertada e/ou consumida e o Produto Interno Bruto (PIB). A menor intensidade energética da economia indica uma maior eficiência da “conversão” de energia em riqueza. Este indicador é associado à “produtividade energética da economia” (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2017, p. 13).

- ODEX: É um indicador que apura o progresso da eficiência energética, pode ser por setor ou para a economia como um todo, esse indicador considera a variação de indicadores de consumo e pondera em relação ao peso no consumo (Empresa de Pesquisa Energética, 2019, p. 23). É utilizada pela União Europeia, no programa ODYSSEE, para monitoramento dos ganhos de eficiência. O uso do ODEX diminui a influência do efeito estrutura, ou seja, a maior participação de um segmento mais energointensivo não influencia no indicador (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2017, p. 16).
- Linha de base energética (LBE): A linha de base energética é definida como a (s) referência (s) quantitativa (s) contra a (s) qual (is) o desempenho energético atingido após a implementação de medidas de melhoria é comparado (FOSSA; SGARBI, 2021, p.15).
- Indicador de desempenho energético (IDE): Esse indicador refere-se ao valor ou medida quantitativa de desempenho energético definido pela organização. O IDE contribui no monitoramento da situação de desempenho energético da organização em um dado momento. Para se avaliar a situação real do desempenho energético é necessário compará-lo com a LBE correspondente, afim de avaliar se a meta energética prevista está, ou não, sendo atendida (FOSSA; SGARBI, 2021, p.16).
- Desempenho energético: A Norma o define como sendo “os resultados mensuráveis relacionados à eficiência, uso e consumo de energia”. Trata-se do núcleo principal SGE_n estruturado de acordo com a ABNT NBR ISO 50001 e consiste no elemento que o diferencia dos demais SGE_n atualmente existentes. A melhoria contínua do desempenho energético representa um requisito particularmente relevante e exclusivo da ABNT NBR ISO 50001 e agrega objetividade às conquistas das organizações que adotam esse sistema de gestão (FOSSA; SGARBI, 2021, p.16).

O sistema de gestão energética (SGE_n) tem o propósito de permitir que as organizações estabeleçam sistemas e processos necessários para melhorar continuamente o desempenho energético, incluindo a eficiência energética, o uso da energia e o consumo da energia, sendo aplicável a qualquer organização, (ISO 50001,

2018, p. 8). A ISO 50001 baseia-se em modelos de sistemas de gestão já compreendidos e utilizados por organizações em todo o mundo, como o de qualidade (ISO 9001) e o ambiental (ISO 14001). Este fato representa um diferencial para a norma, uma vez que diminui de forma significativa a implementação de SGE em organizações que já possuem outros sistemas de gestão em operação (FOSSA; SGARBI, 2021, p.6).

Fossa, Sgarbi (2021, p.7), apontam os objetivos da norma ISO 50001 que são:

- Dar suporte às organizações para que estabeleçam usos e consumos mais adequados de energia.
- Criar uma comunicação fácil e transparente a respeito da gestão sobre recursos energéticos.
- Promover as melhores práticas de gestão energética e reforçar os ganhos com a aplicação da gestão da energia.
- Suportar a avaliação e priorização de implantação de novas tecnologias mais eficientes no uso da energia.
- Estabelecer um cenário para promoção da eficiência energética através da cadeia de suprimento.
- Favorecer a melhoria da gestão da energia em conjunto a projetos de redução de gases de efeito estufa.
- Permitir a integração com outros sistemas de gestão organizacionais tais como ambiental e de saúde e segurança.

Como explicitado a gestão de energia é caracterizada por atividades de medidas, monitoramento, controle e aperfeiçoamento sistemático de modelos que visam reduzir o desperdício de energia. Tem como ferramenta de gestão o modelo PDCA (plan-do-check-act). A figura a seguir mostra as etapas do ciclo PDCA:

Figura 5. Ciclo PDCA



Fonte: Fossa; Sgarbi (2021)

Essas etapas consistem nos seguintes processos.

- **PLAN:** Etapa onde são estabelecidos os objetivos e processos necessários para fornecer resultados de acordo com os requisitos pré-determinados. Definidas as metas, deve-se definir os métodos para atingi-las, SEBRAE (2016 *apud* Nascimento, 2017, p.33). De acordo com a norma ISSO 50001, essa etapa compreende o contexto da organização, estabelecer uma política energética e uma equipe de gestão da energia, considerar as ações para enfrentar os riscos e oportunidades, conduzir uma revisão energética, identificar os usos significativos de energia (USE), os indicadores de desempenho energético (IDE), a(s) linha(s) de base energética(s) (LBE), objetivos e metas energéticas, e planos de ação necessários para obter resultados que levarão à melhoria do desempenho energético de acordo com a política energética da organização.
- **DO (Fazer):** É nessa etapa que são implementados os planos de ação, controles de operação e manutenção, e comunicação, assegurar competências e considerar o desempenho energético no projeto e aquisição (ISO 50001, 2018, p. 9).

- **CHECK:** A norma descreve a etapa de checagem como tendo o o objetivo de monitorar, medir, analisar, avaliar, auditar e realizar análise(s) crítica(s) pela direção do desempenho energético e do SGE_n (ISO 50001, 2018, p. 9).
- **ACTION:** Por fim são adotadas as ações para tratar as não conformidades e melhorar continuamente o desempenho energético e o SGE_n, (ISO 50001, 2018, p. 9).

Em 2015 a ISO 50001 foi revisada, e nela foi incorporada a estrutura padrão dos sistemas de gestão da ISO- a HLS, sendo concluída em 2018, incorporando a ISO 50001 uma nova relação estrutura do PDCA e os elementos do HLS agregados em sua estrutura, conforme exemplificado na Figura a seguir (FOSSA; SGARBI, 2021, p.10).

Figura 6. Relação entre PDCA e a estrutura do sistema de gestão da energia



Fonte: Fossa; Sgarbi (2021)

O primeiro passo “contexto”, destaca a necessidade de a organização conhecer as características e aspectos gerais que envolvem seus processos que demandam energia. Não se trata ainda de uma fase de detalhamento, mas de observação das interfaces e expectativas com outras partes interessadas, definições de escopo e limites de abordagem do SGE_n, bem como definição das lideranças e responsabilidades, (Fossa; Sgarbi, 2021, p.11). Os passos seguintes, são os já

explicitados, “Planejar”, trata do planejamento da gestão energética. O passo 3, “Gerenciar”, refere-se ao controle e gerenciamento do uso da energia dentro da organização. O passo 4, “Monitorar”, representa a etapa de verificação. Por fim, o passo 5, “Melhorar”, aborda as ações para a melhoria contínua do SGE n e, conseqüentemente, do desempenho energético da organização

2.4 Indicadores de Eficiência Energética

O conhecimento de indicadores de eficiência energética pode vir a contribuir na escolha da fonte de energia e tecnologia a ser utilizada, podendo também nortear políticas públicas de preservação ambiental, onde possam aliar questões ambientais e econômicas, promovendo assim o desenvolvimento sustentável (Abreu; Oliveira; Guerra, 2010, p.11). Cabe destacar que a aplicação da análise destes indicadores e sua relevância em descrever a interrelação existente entre eficiência energética e os recursos consumidos associam-se principalmente a fatores econômicos e político-ambientais dentro da indústria (Monteiro, 2013, p. 263). Segundo Abreu (2010, p.18), os indicadores de eficiência energética podem ser divididos em quatro grupos mais influentes. Sendo esses:

- **Termodinâmico.**

Os indicadores termodinâmicos têm sido o caminho mais natural para mensurar a eficiência energética, tanto que a termodinâmica atualmente é frequentemente definida como a ciência de processos energéticos, contudo uma abordagem apenas termodinâmica não irá definir corretamente a eficiência energética (GASPAR *et al.*, 2018, p. 20).

A eficiência energética por esse ponto de vista, tem seus indicadores baseados nos processos energéticos que envolvem conceitos como calor e trabalho, sendo medidos através de termos da termodinâmica, como Entropia, Entalpia e Exergia. Esses indicadores provêm de medidas para uma determinada função de estado de acordo com condições físicas de um processo, como temperatura e pressão. Na indústria, em processos que não envolvem apenas funções de estado relacionadas ao calor, uma abordagem apenas termodinâmica, não irá definir com corretamente a eficiência energética (BLOS, 2020, p.21).

- **Físico-termodinâmico.**

Esses indicadores consideram medidas físicas e termodinâmicas para mensurar o consumo requerido em função do seu uso final. Devido a possibilidade de contabilizar o produto final em quantidades físicas, estes indicadores podem ser comparados e analisados em séries temporais. O uso desse indicador para avaliação de desempenhos específicos para o consumo de energia pode ser útil para identificar áreas de baixo desempenho (MONTEIRO, 2013, p. 265).

A utilização desse indicador pode trazer algumas dificuldades em função da sua relação produtiva. A complexidade dos processos produtivos podem ser uma barreira em função da especificação das diferentes entradas e saídas de energia ligadas a diferentes linhas de produção. Na indústria, para reduzir falhas na medição entre o consumo de energia e a medida física (produção), este indicador deve ser gerido para medir a eficiência energética global do processo (ABREU; OLIVEIRA; GUERRA, 2010, p.26).

- **Econômico-termodinâmico.**

Monteiro (2013, p. 265) descreve esse indicador como sendo indicadores que relacionam medidas usuais na indústria (medidas termodinâmicas) e a valoração deste insumo e/ou produto final, pois a energia a ser mensurada no sistema pode ser feita em unidades termodinâmicas convencionais e sua saída em valores monetários. Na prática, no sentido de se atingir uma economia efetiva de energia na instalação, três fatores adicionais devem ser considerados (Lozano et Valero, 1993, *apud* Ribeiro; Silva, 2018, p.74): (i) nem toda irreversibilidade pode ser evitada; (ii) as reduções locais na destruição de exergia não são equivalentes; (iii) as oportunidades de economia só podem ser especificadas através de um estudo mais detalhado dos mecanismos fundamentais da geração de entropia.

- **Econômico.**

A principal característica desse indicador a mensuração da energia de entrada e saída em valor monetário. Por ser uma categoria de indicadores puramente econômicos leva-se ao questionamento de ser ou não um indicador de eficiência

energética (Monteiro, 2013, p. 266). O grande problema desse indicador é exatamente estipular o valor monetário da energia de entrada, a concepção seria em haver um “preço ideal”, porém esse no tempo se torna instável e precisa ser recalculado. Outra ideia seria a de construir uma medida para o “custo da energia conservada”, tendo como maior vantagem a de informar ao público, o valor monetário que foi poupado com a implementação de medidas de eficiência energética (ABREU; OLIVEIRA; GUERRA, 2010, p. 27).

Para estudos na engenharia, os indicadores puramente termodinâmicos e os indicadores físicos-termodinâmicos são mais aplicáveis, enquanto os outros indicadores econômicos são importantes para estudos em macroeconomia e políticas econômicas (LI, 2015 *apud* BLOS 2020, p.24).

2.5 A indústria de Fundição

De forma simples a fundição pode ser definida como o processo mais curto entre a matéria prima metálica e as peças acabadas, essa se dá por meio do vazamento de dado metal (ou liga metálica) líquida no interior de uma cavidade denominada molde cuja forma corresponde com a forma invertida de uma peça, à peça desejada (Arruda, 2018, p. 1). A característica fundamental das peças fundidas baseia-se, entretanto, no fato de que nenhum processo de deformação ou trabalho plástico é usado para alterar sua forma básica bruta-de-fusão (FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS, 2021, p.22).

O início da indústria de fundição não é consensual, contudo, acredita-se que tal processo seja conhecido desde 5000 a.C., quando já se faziam objetos em cobre fundido por meio de moldes em pedra lascada (Rossitti, 1993 *apud* Cassoti; Filho; Castro, 2011, p. 2). O primeiro metal fundido pelo homem foi o cobre, devido seu baixo ponto de fusão. Em 3300 a.C., período conhecido como Idade do Bronze, houve uma grande evolução neste processo, onde houve a adição de estanho ou arsênio ao cobre formando uma nova liga conhecida como bronze, aumentou assim a dureza do metal. No período de 4000 a.C, passou-se a utilizar o processo de fundição por cera perdida em países como Egito, China, Índia, Nigéria e América do Sul. Já a fundição utilizando os fornos de fusão industrial, para a obtenção do ferro fundido em fornos cubilô é datada de 1300 a 1400 a.C, enquanto a de aço é a mais recente (1855), surgindo com

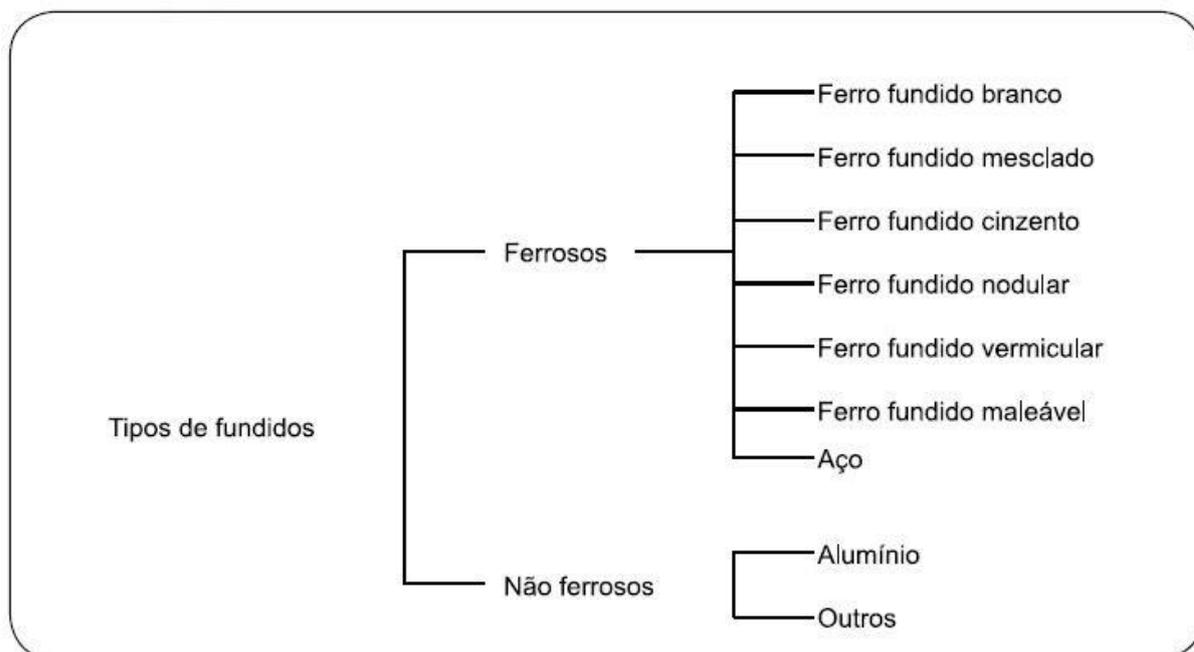
a necessidade de evolução tecnológica no período da revolução industrial (BALDAM, 2014, p. 22).

No Brasil, essa indústria surgiu por volta de 1580, na cidade de São Paulo, com o objetivo de fundir o ouro oriundo de Minas do Jaraguá e arredores. No decorrer do século XVIII, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Bahia, receberam muitas casas de fundição. Em 1936 no país já se fabricava cerca de oitenta mil toneladas de ferro-gusa. Com a instalação, em 1941, da Companhia Siderúrgica Nacional, em Volta Redonda RJ, a produção de ferro iniciou uma nova época de desenvolvimento com incentivo estatal, a estratégia foi liderada por Getúlio Vargas e teve como principal objetivo uma respeitosa base de infraestrutura industrial: indústria de base e energia (FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS, 2021, p.15).

No final do século XX, o Brasil era o terceiro país com maiores reservas de minério de ferro conhecidas em todo o mundo, passando para o segundo lugar logo após a descoberta das reservas na serra de Carajás (Pará) e no norte de Minas Gerais. Ainda de acordo com a Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (2021, p.15), Minas Gerais responde hoje por 28,5% da produção nacional de fundidos, possuindo produtividade de 49 toneladas/homem/ano. A capacidade instalada é de 2.000.000 toneladas/ano, considerando a produção de aço, ferro, alumínio, bronze e latão, hoje há cerca de 398 empresas em Minas Gerais, sendo 32% das empresas, responsáveis por empregos diretos e indiretos de 76 mil trabalhadores. Destas empresas 28% são de microempresas, 56% de pequenas empresas, 14% de empresas de médio porte e 2% de empresas de grande porte.

A importância que a indústria de fundição tem para o desenvolvimento tecnológico é imensa, visto que as peças criadas vão de pequenas a grandes dimensões, sendo utilizadas em diferentes situações, simples como o jogo de pés de um fogão a lenha ou tão críticas quanto uma palheta de turbina de motor a jato. A Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (2021, p.16), mostra que o ramo industrial que mais demanda peças fundidas, é o da indústria automotiva, para a qual a flexibilidade oferecida pelo processo de fundição é particularmente importante. Dessa forma a seguir serão apresentadas de forma breve as classificações dos metais utilizados, fornos e tecnologias empregadas. Na figura 7, são mostrados os tipos de fundidos, sendo esses classificados como ferrosos ou não ferrosos.

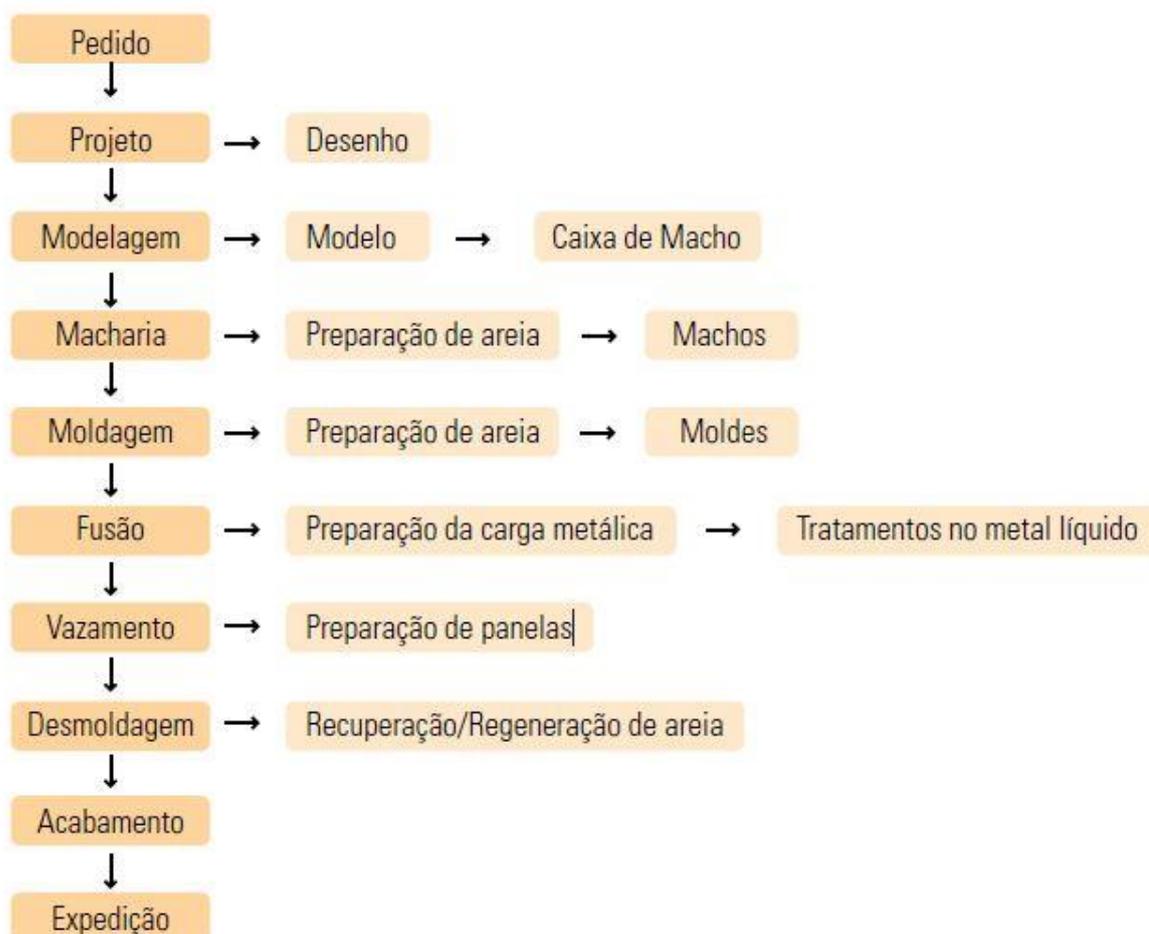
Figura 7. Tipos de Fundidos



Fonte: Andrade; Cunha; Gandra (1999)

Como observado as ligas metálicas utilizadas na produção das peças fundidas são divididas em dois grupos: Ferrosos que são ligas constituídas basicamente por ferro, carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre. E fundidos não ferrosos, onde as ligas mais utilizadas são as de Alumínio, cobre e zinco. De toda a produção, o fundido mais utilizado é o ferro (cerca de 83%), seguido pelo aço (10%) e as ligas não ferrosas (7%) (DEUS, 2004 *apud* Baldam, 2014, p. 29). A obtenção de uma peça fundida pelo método convencional segue o seguinte fluxograma:

Figura 8. Fluxograma do processo de fundição



Fonte: Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (2021)

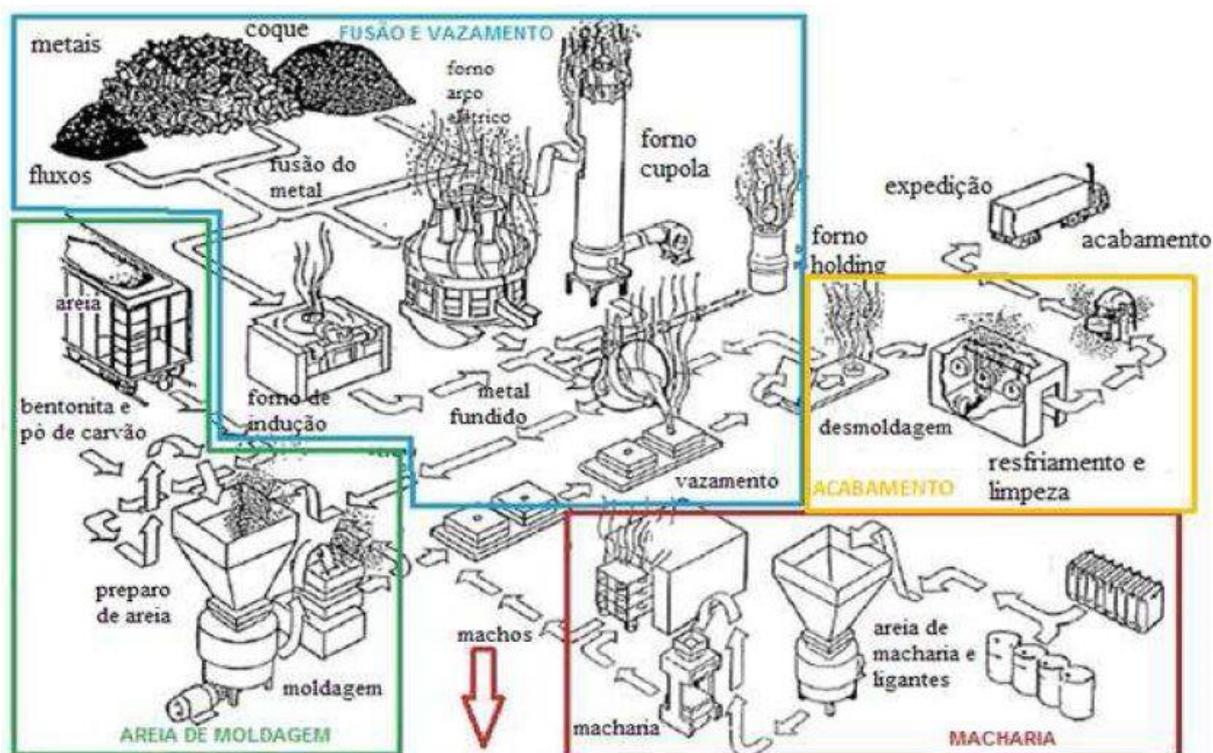
É possível dividir esse fluxograma de processo, em três setores, onde o primeiro é responsável pela parte dos projetos, o segundo setor pela confecção de modelos, caixas de macho e elementos de modelagem. E o último setor é da fundição propriamente dita.

2.5.1 Etapas do processo de Fundição

Os variados processos de fundição diferem primeiramente pelo material em que são fabricados os moldes (areia, metal e outras matérias) e pelo modo de vazamento (gravidade, vácuo e baixa ou alta pressão). Em todos os processos apresentados, o material, ao se solidificar, deve ter suas propriedades maximizadas, prevenindo eventuais defeitos (Jansen, 2013 *apud* Andrade, 2016, p.7). Na figura 9,

são mostradas as etapas do processo de fundição de ferro, as regiões internas aos contornos coloridos indicam as diferentes áreas de uma indústria de fundição.

Figura 9. Etapas do processo de fundição



Fonte: Adaptado de Jansen (2013) *apud* Andrade (2016)

De forma bastante simplificada, o processo de obtenção do material fundido começa com a obtenção do insumo, que será derretido no forno adequado para tal, passando então para a etapa de vazamento, nessa etapa o molde e caixa de macho (se necessária) já estão preparados para o recebimento do metal fundido. Após, é feita a desmoldagem e por fim será resfriada para assim poder ter os acabamentos necessários. É importante observar que em todas essas etapas há perdas seja de energia ou de material, essas etapas serão descritas na sequência.

- **Confecção do Modelo:** O material utilizado para confecção do modelo depende do processo de moldagem a ser usado. O modelo deve ter ângulos favoráveis à saída do molde, caso contrário o molde se quebra durante a confecção (ANDRADE, 2016, p.6).
- **Macharia:** O macho é um dispositivo, também feito de refratário, que tem a finalidade de formar os vazios, furos e reentrâncias da peça. São colocados nos

moldes antes que eles sejam fechados para receber o metal líquido (F Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, 2021, p. 36). Os machos podem ser feitos manual ou mecanicamente, isso irá depender do grau de mecanização e da quantidade de peças a serem produzidas. Para a fabricação dos machos empregam-se areias de base, ligantes e produtos de adição.

- **Fusão:** Como o princípio da fundição é a transformação do estado dos metais e suas ligas, de sólido para líquido, um importante processo é a da definição do tipo de forno a ser utilizado. A Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (2009, p. 38), apresenta que após definido o projeto, é realizado o cálculo de carga, onde é verificada a quantidade de cada matéria-prima que será utilizada para fabricar a liga requerida.

Os fornos de fundição são construídos de diferentes formas e desenhos, sendo, em geral, divididos de acordo com a fonte de energia utilizada (eletricidade ou combustível) e pelo modo de operação (cadinho, reverbero, de cuba, etc.). Baldam (2014), observa que uma mesma liga pode ser elaborada em mais de um tipo de forno, sendo a escolha dependente de diversos fatores como o tipo de liga utilizada, a quantidade de liga desejada, da disponibilidade de fonte de energia a custo acessível, da capacidade do investimento e retorno capital, e acesso tecnológico da fundição. No quadro 1 são mostrados os principais tipos de fornos bem como os tipos de ligas que podem ser utilizados para cada um.

Quadro 1. Relação entre o tipo de forno, liga produzida e refratário utilizado de acordo com a região do forno.

Continua

Tipo de Forno	Tipo de Liga	Refratário
Cadinho	Alumínio, Chumbo, Magnésio, Zinco.	Em contato com metal: Ferro fundido, aço, grafite, carboreto de silício
		Tampa: Silicoso ou aluminoso
		Isolamento Térmico: Silicoso
	Cobre	Em contato com metal: Grafite, carboreto de silício
		Tampa: Silicoso ou aluminoso
		Isolamento Térmico: Silicoso
	Ferro Fundido	Em contato com metal: Carboreto de silício
		Tampa: Silicoso ou aluminoso
		Isolamento Térmico: Silicoso

Quadro 1. Relação entre o tipo de forno, liga produzida e refratário utilizado de acordo com a região do forno.

Continuação		
Forno de Indução	Alumínio, Zinco, cobre, ferros fundidos	Em contato com metal: Carboreto de silício, silicosos, aluminoso
		Tampa (quando existente): Silicoso ou aluminoso
		Canal de corrida: aluminoso
	Aços	Isolamento Térmico: Silicoso ou aluminoso
		Em contato com metal: Grafite, carboreto de silício
		Tampa: Silicoso ou aluminoso
Isolamento Térmico: Silicoso		
Fornos elétricos a arco	Não ferrosos e ferros fundidos	Em contato com metal: Silicosos ou aluminoso
		Abóboda: Silicoso ou aluminoso
		Área de eletrodos: é aluminoso ou magnesiano
		Isolamento Térmico: Silicoso ou aluminoso
Forno Cubilô	Ferro Fundido	Silicoso, neutro ou básico

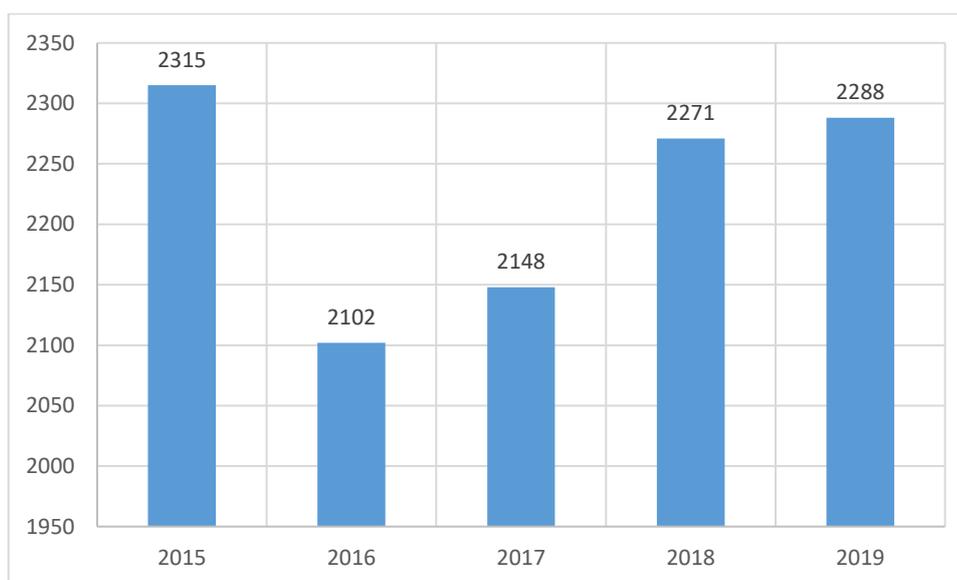
Fonte: Baldam (2014)

- **Vazamento:** Painelas de vazamento já preparadas e pré-aquecidas recebem o metal líquido em seu interior para o transporte do mesmo até a área de vazamento, onde os moldes serão vazados. O vazamento pode ser sob pressão, a vácuo, por centrifugação ou por gravidade (Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, 2021, p. 25).
- **Desmoldagem:** A etapa de desmoldagem é de grande importância, visto que com o controle correto da temperatura é possível evitar o choque térmico e consequentes trincas na peça, a desmoldagem constitui-se na operação de retirada da peça sólida de dentro do molde. Atualmente, existem processos capazes de recuperar 98% da areia, que é então utilizada em novos moldes (CASSOTI; FILHO; CASTRO, 2011, p.18).
- **Rebarbação e Limpeza:** Constitui-se da etapa final do processo de fundição, após o corte dos canais e massalotes, essas áreas precisam de acabamento superficial, sendo necessária a retirada de incrustações de areia do molde na peça fundida, rebarbas indesejáveis. Essa limpeza é feita, em geral, com jatos abrasivos (CASSOTI; FILHO; CASTRO, 2011, p.18).

2.5.2 Consumo de Energia na Indústria de Fundição

A produção brasileira de fundidos, vem sofrendo grandes oscilações na sua produção desde 2015, tendo em 2019 uma produção de 2288 10³t, de metal, como observado no gráfico 4.

Gráfico 4. Produção Brasileira de Fundidos



Fonte: Associação Brasileira de Fundição (ABIFA) *apud* Brasil (2020)

A tabela abaixo, mostra de forma mais detalhada a produção de fundidos entre esses anos.

Tabela 1. Produção Brasileira de Fundidos

PRODUTOS	2015	2016	2017	2018	2019	19/18 (%)
1. FERRO	1.890.932	1.773.578	1.778.329	1.829.123	1.837.768	0,5
2. AÇO	243.085	164.186	186.616	243.227	259.195	6,6
3.NÃO FERROSOS	181.880	165.186	183.242	199.216	191.926	-3,7
3.1 Cobre	21.749	21.936	20.812	20.938	20.993	0,3
3.2 Zinco	1.266	1.427	1.155	1.163	1.175	1,0
3.3 Alumínio	153.949	135.994	155.816	172.075	164.718	-4,3
3.4 Magnésio	4.916	5.829	5.459	5.040	5.040	0
TOTAL	2.315.897	2.102.950	2.148.187	2.271.566	2.288.889	0,8

Fonte: Associação Brasileira de Fundição (ABIFA) *apud* Brasil (2020)

A tabela demonstra que no ano de 2019, a produção de ferrosos respondeu a cerca de 80% dos fundidos, enquanto a produção do aço representou 11%, e os não ferrosos 9%. Verifica-se também um decréscimo na produção de quase todos os tipos de fundidos, indicando que houve também a diminuição na produção de outros bens de consumo ligados a essa cadeia produtiva, como a indústria automobilística, construção civil e bens de capital. Apesar do decréscimo na produção, o Brasil ainda configura entre os dez maiores produtores de fundidos do mundo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO, 2019).

Tendo em vista a grande produção de fundidos que o Brasil possui e as modificações que ocorreram nos processos e equipamentos, de acordo com Simões; Bajay (2010 *apud* Andrade, 2016, p. 7), devido ao próprio processo de expansão do setor de fundição no Brasil, têm auxiliado para um quadro de aumento no consumo de energia por parte deste segmento da indústria nacional.

A energia elétrica é o principal insumo, em estudo de Brasil (2012 *apud* Andrade, 2016, p. 8), o consumo de energia elétrica representa cerca de 52% do consumo final de energia, ainda neste estudo devido a modernização do segmento, acarretou em aumento da demanda, sendo um exemplo, o crescente processo de substituição de fornos cubilô, utilizados na fusão de ferro, aço e suas ligas, por fornos de indução. Sendo esse um processo necessário para atender o aumento de qualidade de peças e redução de emissões de gases poluidores.

No que tange os insumos energéticos utilizados por essa indústria a tabela abaixo, faz o demonstrativo desses, comprovando que o maior insumo consumido é de energia elétrica.

Tabela 2. Insumo para fundidos

ITENS	UNID.	2010	2011	2012
1. Coque	t	217.799	223.727	191.359
2. Energia elétrica	10 ³ kWh	3.178.159	3.278.833	2.804.465
3. Óleo combustível	t	104.992	105.618	103.571
4. Óleo diesel	t	16.137	16.648	16.325
5. Alumínio	t	260.877	264.800	259.667
6. Gusa	t	1.400.194	1.438.320	1.410.441
7. Sucata	t	930.042	961.699	943.059

Fonte: Associação Brasileira de Fundição (ABIFA) apud Brasil (2020)

Na tabela 3 é observada a distribuição normal dos consumos de energia elétrica numa fundição de ferrosos que utilizam fornos de indução, de acordo com um estudo realizado no Canadá. O maior consumidor é o setor da fusão com cerca de 70%.

Tabela 3. Consumo de energia na indústria de fundição

Departamento	Consumo de acordo com tamanho da fundição (%)			
	Pequenas	Médias	Grandes	Ideal
Fusão	72	78	64	59
Iluminação	7	1	3	6
Ar Comprimido	8	3	3	5
Motores	-	11	-	12
Bomba e Exaustores	-	-	-	6
Acabamentos	-	-	4	-
Diversos	13	7	8	12
Total	100	100	100	97*

Fonte: Adaptado de Patange *et al.*, (2016); Canadá (2013); ETSU (2000) apud Andrade, (2016)

A tabela acima faz o demonstrativo de utilização de energia elétrica para indústrias de diferentes portes, sendo interessante observar que independentemente do tamanho da indústria, o setor que tem maior consumo é o da fusão, logo, esse é o setor que tem maior possibilidade de efficientização.

Simões *et al.* (2010, apud Santos, 2019, p.20), afirma que o potencial brasileiro de economia de energia elétrica no setor de fundição é de 65881 TEP, sendo que 77% é proveniente apenas dos fornos.

Um importante fator a ser quantificado é o consumo específico de energia no forno, a fim de comparar o consumo de fornos que se utilizam da mesma tecnologia, verificando assim se há grandes discrepâncias entre eles, indicando perdas demasiadas e melhorias a serem feitas. De acordo com Arasu; Jeffrey (2009, p. 332), o consumo específico de um forno de indução na Índia é de cerca de 620 KWh/t, na Alemanha, Bublik, Abraham (2011, p.2), em estudo de caso encontraram um consumo de 576 KWh/t, já no Brasil, segundo NETO *et al.* (1989, p.23) o consumo era de 570-750 KWh/t, esses valores podem variar dependendo das características técnicas do forno, dos turnos diários, forma de operação, etc.

2.6 Indicadores de Desempenho Energético na Indústria de fundição

Os indicadores de eficiência energética em geral ajudam a demonstrar se uma coisa é mais eficiente a nível energético que outra, esses indicadores podem ser agregados, como um indicador de consumo total de energia de aparelhos, ou desagregados, como por exemplo, consumo médio de aquecimento por área útil de casas individuais usando gás natural para aquecimento (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 2014, p.18)

Segundo a Agência Internacional de Energia (2016 *apud* Andrade, 2016, p.10), diferentes indicadores de eficiência energética são utilizados, nos diferentes setores da economia. Alguns exemplos de indicadores são:

- Residencial: Iluminação – Energia de iluminação/m²; Água quente: Energia para aquecimento de água/habitantes;
- Transporte: Energia consumida/quilômetro percorrido;
- Manufatura: Energia consumida/produto de valor.

Caçote, José (2018) apresenta uma lista de indicadores de eficiência energética para a indústria de fundição (Quadro 2).

Quadro 2. Indicadores de EE para indústria de fundição

Continua

Tecnologia	Indicador	Unidade
Geral	Consumo energético total	kWh, MWh, \$
	Consumo Anual de eletricidade	kWh/ano
	Consumo específico de energia	kWh/ Quantidade ou unidade produzida
	Custos específicos de energia	\$/kWh
	Intensidade Energética	kWh/\$
	Percentagem da fonte de energia	%
	Percentagem de fontes renováveis	%
	Indicador de performance energética específica do setor	kWh/K\$
	Investimento	\$
	Horas de funcionamento	h/ano
Ar comprimido	Consumo Específico Produção	kWh/m ³ /min
	Pressão entrega	bar
	Caudal teórico à P trabalho	m ³ /min
Bombas	Potência Específica	kW/m ³

Quadro 2. Indicadores de EE para indústria de fundição

Continuação

Força motriz	Consumo específico do ventilador	kW/m ³ /s
	Eficiência/Rendimento do motor	KWn/KEa (%)
Iluminação	Potência específica de iluminação	W/m ² /100 lux
Produção de energia	% Produção no consumo	%
Produção e Transferência de Calor	Eficiência/Rendimento	kWt /kWe(*)
Ventiladores	Caudal vs. consumo do ventilador	(m ³ /h)/kW
	Consumo específico do ventilador	kW/m ³ /s

Fonte: Caçote,2018

Em estudo feito na Rússia pela corporação financeira internacional (IFC) (2011), foram desenvolvidos 7 IEE, sendo esses:

- Rendimento do processo: Esse indicador foi construído com bases em quatro subindicadores.
 - Perdas na etapa de fusão
 - Perdas tapa de vazamento
 - Perdas na etapa do carregamento
 - Sucata de fundição e rejeitos
- Eficiência do processo: Esse indicador também foi construído com bases em quatro subindicadores.
 - Tempo de inatividade
 - Efeitos de corrida lentos
 - Moldes ruins
 - Fundição de sucata e rejeitos
- Capacidade de utilização
- Consumo de Energia
- Consumo de areia fresca
- Consumo de água
- Produtividade do trabalho

3 METODOLOGIA

Este trabalho baseia-se em uma investigação através de diversas bibliografias, sobre o funcionamento e possíveis melhorias na indústria de fundição. Essa investigação se deu por meio das seguintes fontes de pesquisas: Artigos científicos, dados históricos da ABIFA, estudos de caso, livros, manuais de concessionárias de energia elétrica e órgãos governamentais, relatórios de Organizações Internacionais relacionados à energia, teses acadêmicas e relatório de seminários.

Os artigos científicos, foram encontrados através de busca nas seguintes bases de dados: Scielo (*Scientific Eletronic Library OnLine*) e *Science Direct*. As palavras chave utilizadas na busca dos artigos foram: *Energy Efficiency*, Eficiência Energética, *Energy Efficiency Foundry*, Eficiência Energética Fundição e *Best Practices Foundries*.

Foi atentado para a utilização de referências atualizadas, pois a evolução de tecnologias/conhecimento na área necessita ser atual, contudo algumas referências relevantes são bastante antigas, mas devido a falta de publicações recentes optou-se pela utilização dessas.

4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção será descrito o que algumas bibliografias apresentam como perdas e possibilidades de eficiência energética para diferentes setores da indústria tema do trabalho.

4.1 Auditoria Energética- Implementação do SGE

A primeira ação visando a eficiência energética na indústria, seja qual for, deve ser a implementação de um sistema de gestão de energia. Como explicitado no capítulo 2, subitem 2.3, considera-se que o SGE é uma aplicação de uma série de técnicas de gestão que permite a uma organização alcançar objetivos e metas energéticas, identificando e implementando ações (ISO 50001, 2018, p. 8).

Pesquisas mostraram que indústrias que adotam práticas de gestão de energia podem economizar até 40% do seu consumo total (BACKLUND *et al.*, 2012 *apud* ANDRADE, 2016, p.14).

A promoção da eficiência energética passa necessariamente por uma mínima estrutura gerencial, que dependerá do porte e abrangência que a empresa visa, em relação aos seus fluxos energéticos, como foi observado na figura 5, do Ciclo PDCA. Esta abordagem é válida para instalações novas, em caráter preventivo, ou instalações existentes, em caráter corretivo (ELEKTRO, 2012, p. 58)

Em estudo publicado por Eronen; Sinin *et al.*, (2012), foram auditadas nove indústrias de fundição, sendo quatro fundições de ferro, três fundições de aço e duas não ferrosas, após, foi identificado o potencial de economia de energia nessas, tabela 4.

Tabela 4. Identificação do potencial de economia no consumo de energia em um ano

Tipo de fundição	Economia Térmica (MWh/a)	Economia energia elétrica (MWh/a)	Economia total (MWh/a)
Ferro	2039	784	2823
Aço	3900	819	4719
Não-ferrosos	4009	2641	6650
Total			14192

Fonte: Eronen; Sinin *et al.*, (2012)

Em termos monetários, em fundições que utilizam ferro, ao se economizar 784 MWh/a de eletricidade e 2039 MWh/a de energia térmica, é possível obter uma economia de 176,430 €/ano (Eronen; Sini *et al.*, 2012, p.15). Esse estudo europeu, pode ser usado como espelho para práticas no Brasil, demonstrando que um sistema de gestão de energia é capaz de diminuir o desperdício de energia elétrica e perdas térmicas no processo de fundição e garantir grandes montantes de dinheiro.

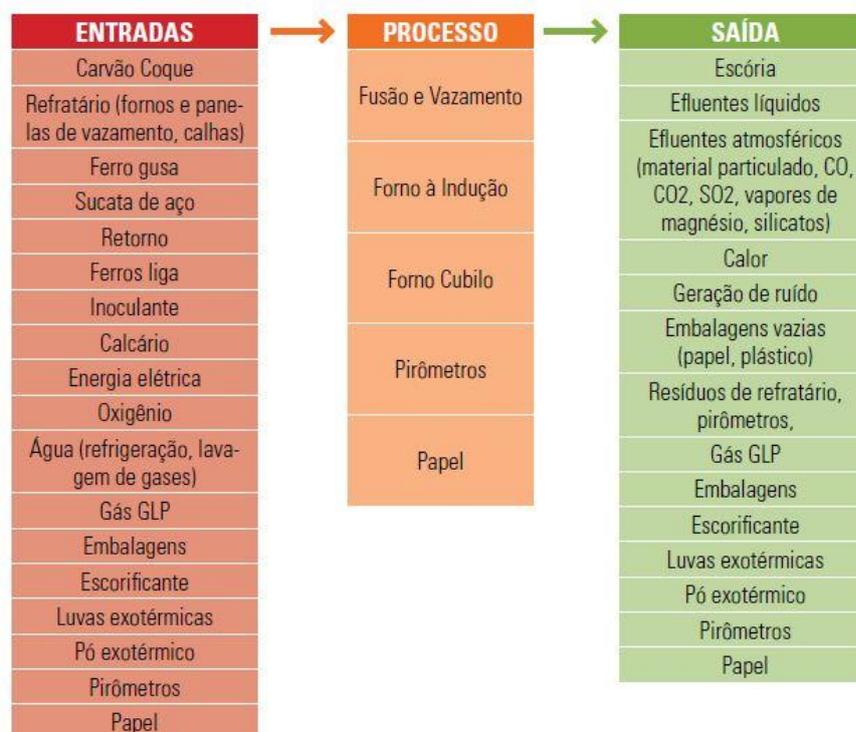
Alguns benefícios da auditoria energética de acordo com Prashanth, (2014, p. 3), são:

- Trazer à tona as possibilidades de economia no consumo de energia e gastos com energia.
- Fornecer informações reais com base em medições sobre o consumo de energia na área definida.
- Comparar as taxas de compra de energia e fornecer as informações básicas para otimizar a aquisição de eletricidade.
- Educar e orientar a equipe no que se refere a utilização de dispositivos e equipamentos

4.2 Fusão

Como visto, a etapa que tem maior consumo de energia na indústria é o da fusão, sendo um setor que deve ser estudado detalhadamente a fim de otimizar seus processos, na figura 10 é observado o diagrama de entradas e saídas, utilizando esse tipo de diagrama é possível propor métodos de gerenciamento do processo produtivo, FIEMG (2021, p. 52).

Figura 10. Entradas e saídas na etapa de fusão



Fonte: Federação das Indústrias de Minas Gerais (2021)

Entendendo as entradas e saídas do forno, é possível então buscar medidas de mitigação de desperdícios, reaproveitamento de matéria ou melhor descarte de resíduos. As perdas no processo de fundição podem ser agregadas de diversas maneiras, como perdas intrínsecas do processo (perdas nas bobinas, no material refratário, e outras), perdas oriundas da energia despendida para produção de material que foi refugado/ possui defeitos, perdas oriundas da produção de massalotes e canais, etc.

Exemplo de mitigação desse último tipo de perdas, foi explorado por Bastos (2013), onde a autora elaborou uma metodologia de cálculo para o dimensionamento do sistema de canais e massalotes, para produção de um atracador porca-borboleta a fim de se estudar um sistema de maior eficiência para fundição da peça (Esta peça é utilizada na indústria naval, como uma espécie de rosca para fechamento de escotilhão), a autora fez a comparação de um sistema pressurizado com massalote de topo e lateral e de um sistema não pressurizado com massalote de topo e lateral, através do correto dimensionamento dos canais e massalotes, chegou-se a uma eficiência pouco maior do que se utilizando o sistema convencional, cerca de 1%.

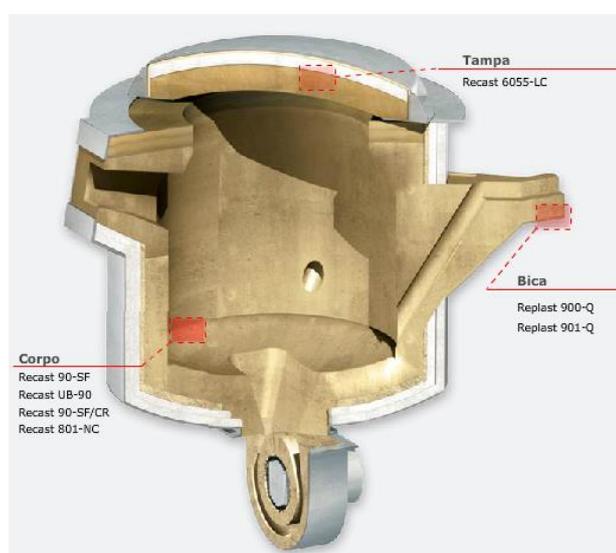
4.2.1 Forno de Indução

O princípio de funcionamento do forno de indução baseia-se na utilização das correntes de Foucault (Mamede, 2017, p. 464). De acordo com Souza; Silva; Balthazar, (2018, p.1) “As correntes de Foucault, também conhecidas como correntes parasitas, surgem em materiais metálicos que se movem em uma região em que há campo magnético”. Então o forno de indução funciona da seguinte maneira, um condutor (bobina do forno) quando percorrida por corrente elétrica irá gerar em torno de si um campo magnético cuja intensidade é proporcional à intensidade da corrente aplicada. Por outro lado, quando outro condutor (carga metálica) é imerso neste campo magnético terá sobre si a indução de correntes elétricas, fazendo com que esse condutor se aqueça por consequência do efeito Joule.

Os fornos de indução são uma boa escolha para a fundição de metais ferrosos e não ferrosos por serem mais eficientes que os fornos a combustível. Há dois principais tipos de fornos de indução utilizados na indústria: os fornos a canal (fornos com núcleo magnético) e fornos a cadinho (fornos sem núcleo magnético) (MAMEDE, 2017, p. 465).

Esse primeiro tipo opera com eficiência elétrica que varia entre 90 a 95% e eficiência global de aproximadamente 75%, o que resulta em um consumo de cerca 450 KWh/t. Já os fornos a cadinho operam com uma eficiência elétrica de aproximadamente 75% e rendimento térmico incluindo perdas em torno de 60%, resultando em um consumo de cerca de 570 KWh/t. Os fornos de indução a canal operam com rendimento superior em decorrência do melhor acoplamento magnético entre a bobina indutora e o metal líquido (NETO *et al.*, 1989, p.10). Exemplo de cada tipo de forno são vistos nas figuras 11 e 12 respectivamente.

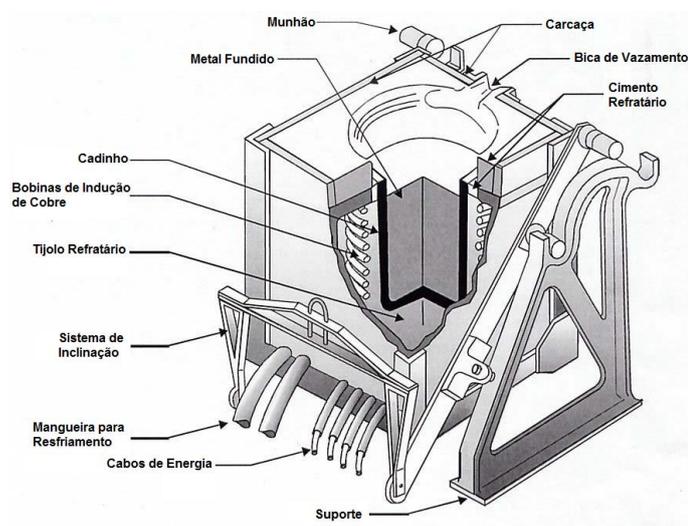
Figura 11. Forno de indução a canal



Fonte: REFRATA (2021)

Como pode ser visto na figura acima, esse tipo de forno é composto basicamente por um reservatório de metal líquido, uma bobina indutora enrolada em um núcleo magnético feito de aço silício laminado e o canal de fusão. Esse tipo de forno tem grande aplicação na manutenção da temperatura de metais já fundidos por outro forno ou por outro meio. Também são muito empregados na fusão de cobre, alumínio, zinco, bronze, etc. (MAMEDE, 2017, p. 466).

Figura 12. Forno de indução a cadinho

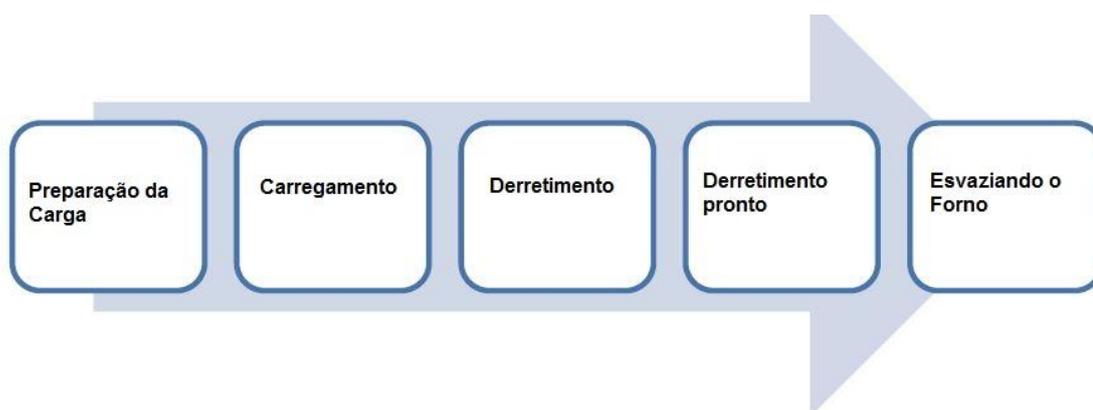


Fonte: Adaptado Schifo; Radia (2004)

O forno de indução de cadinho é composto pela tampa do forno, a plataforma do forno, conexões para a alimentação de água de refrigeração, corpo de forno com cadinho e bobina, suporte de inclinação com apoio de inclinação e dois cilindros de inclinação, bico para derramar, conexões para alimentação de energia elétrica (não visível) e conexões para a alimentação com óleo hidráulico (não visível) (LEME 2011, p.8).

Para aplicação de medidas a fim de diminuir o consumo de energia no forno, é necessário entender de antemão o fluxo de energia e as perdas no processo. As etapas que envolvem o forno de indução são mostradas na figura 13, a operação eficiente do forno deve incluir práticas/ações que contemplem cada etapa mostrada.

Figura 13. Estágios de operação durante a fusão em um forno de indução



Fonte: GEF-UNIDO-BEE Project (2017)

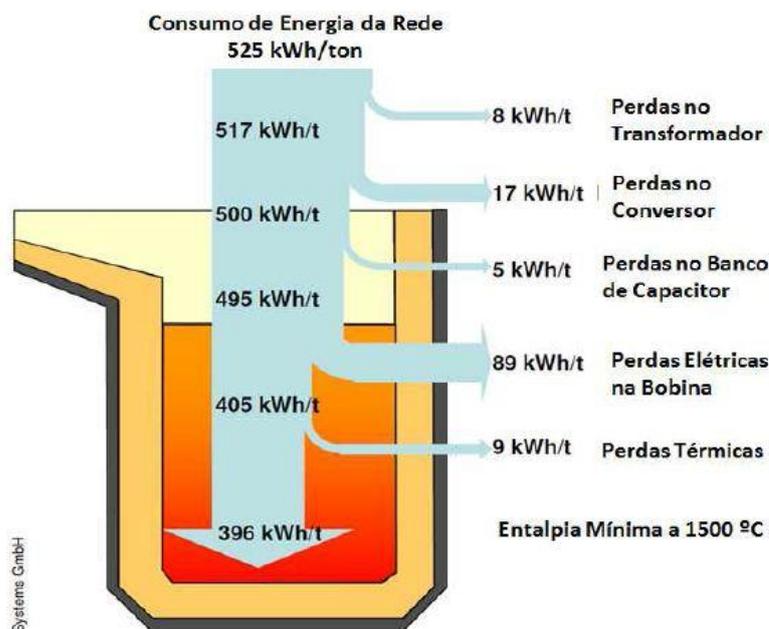
Para aplicação de medidas a fim de diminuir o consumo de energia no forno, é necessário entender de antemão o fluxo de energia e as perdas no processo. NETO *et al.*, (1989, p.27), apresenta um roteiro simplificado para o desenvolvimento de um balanço energético de um forno de indução, sendo compostos pelos seguintes passos:

- Levantamento do montante de energia consumida por toda a instalação de fusão por indução;
- Avaliação da energia absorvida pela carga, que pode ser calculada em função do tipo de carga e de suas propriedades físicas;
- Avaliação da energia consumida pelos motores de seus sistemas auxiliares;

- Avaliação das perdas de energia nos seus equipamentos e instalações auxiliares;
- Avaliação das perdas na bobina indutora;
- Avaliação das perdas pelas paredes e tampa do forno;

A Figura 14, apresenta um balanço térmico de um sistema de fundição por indução, chamado de diagrama de Sankey, esse diagrama apresenta um resumo dos tipos de perdas que ocorrem em um forno de indução.

Figura 14. Diagrama de Sankey Forno de indução Cadinho



Fonte: Adaptado de Hermann; Kroes (2010) *apud* Andrade (2016)

As maiores perdas medidas estão nas bobinas e no conversor, as demais são praticamente irrisórias. De acordo com o estudo de GEF-UNIDO-BEE Project (2017, p. 7) as perdas de energia nesse tipo de forno variam de 100 a 130 kWh por tonelada, e a eficiência do forno está em torno de 65 a 75%. Contudo, com a implementação de medidas visando a eficiência energética nas bobinas, material refratário, conversor e no transformador, as perdas de energia podem ser reduzidas para valores entre 60 a 90 kWh por tonelada, gerando uma eficiência de 81 a 87%.

Após a etapa de verificação do consumo e perdas de energia, é possível então aplicar metodologias para diminuir essas, às medidas a serem tomadas podem ser agrupadas em: Conservação de energia na etapa anterior a fusão e conservação de energia na etapa de fusão.

4.2.2 Preparação da carga

São as etapas que antecedem a introdução da carga metálica no forno, sendo essas.

4.2.2.1 Conservação de Energia em etapas anteriores a fusão

Nessa etapa algumas medidas podem diminuir o tempo de trabalho e efficientizar o processo, de acordo com CANADÁ (2013), GEF-UNIDO-BEE Project, (2017), Mathur, (20XX), Kermeli *et al.* (2016), COPEL (2005), Noro; Lazzarin (2016), são elas:

- Otimizar o carregamento do forno: isso significa encontrar dispositivos e procedimentos que permitam a rápida introdução do material no forno.
- A matéria-prima deve ser pesada e disposta no piso de fusão próximo ao forno antes de começar o derretimento.
- Prepare a mistura de carga e o material com antecedência; verificando a qualidade do metal no local, acelera-se as etapas do processo entre o derretimento e o vazamento;
- Manter o peso exato das ligas prontas, pois as ligas são muito caras, o manuseio adequado não apenas reduz o desperdício, mas também reduz o tempo perdido na formação de liga.
- A carga deve estar livre de areia, sujeira e óleo/graxa. A produção de escória é altamente desfavorável e deve ser reduzida ao mínimo. Sucata enferrujada não só leva mais tempo para derreter, mas também contém menos metal por carga. Para cada 1% de escória formada a perda de energia a 1500 °C é de 10 kWh por tonelada. É observado na tabela 5, o efeito da qualidade da sucata a ser fundida no consumo de energia, possibilitando uma maior percepção das perdas de energia ao utilizar material inadequado.

Tabela 5. Efeito da qualidade da sucata na energia consumida

Material da carga	Peso (Kg)	Tempo (min)	min/kg	Energia (Kwh/t)	Consumo (kWh/t)
Sucata de aço limpo	250	75	0,3	210	840
Sucata de aço oxidada	200	185	0,93	270	1350

Fonte: Adaptado de Schmitz; Trauzeddel (2014)

- Reduzindo as perdas de metal em 2% é possível economizar 2% em custos de material e 2% em custos de energia para fusão/retenção.
- Remoção de escória: O acúmulo de escória com mais de ½ polegada age como um isolante, forçando o forno a funcionar mais duramente.
- O tamanho máximo de uma única peça de metal/sucata não deve ser superior a ⅓ de diâmetro do cadinho do forno.
- Não deve haver nenhuma ou o menor número possível de arestas vivas, especialmente no caso de sucata pesada e volumosa, pois isso pode danificar o refratário.
- Limitar o uso de sucata de aço enfardada e com furos (cavacos de usinagem).
- Evite a introdução de metal úmido no material derretido, pois isso pode causar explosão.
- Secagem da carga metálica: a carga a ser introduzida no forno encontra-se, muitas vezes, úmida. Recomenda-se sua secagem, do contrário exigirá energia adicional para aquecê-la. Quanto menor a massa de material improdutivo introduzido na câmara de aquecimento, menor será a energia necessária para o aquecimento. Esse tópico será melhor discutido no item que descreve o sistema de pré aquecimento.
- Não descubra o forno desnecessariamente, quando uma tampa de 1,5m de diâmetro de um forno de indução de 12t está aberta, as perdas em 5 min são da ordem de 44 kWh, a tabela a seguir mostra as perdas em um forno a cadinho, oriundas da abertura da tampa do forno.

Tabela 6. Perdas de energia em um forno a cadinho com tampa aberta

Potência do forno (kW)	Consumo de energia na fusão (kWh/t)		Consumo adicional com a tampa aberta (KWh/t)	
	Aberta	Fechada		
500	655	520	135	26%
1500	640	510	130	25,50%
2500	572	495	77	15,50%

Fonte: NETO *et al.* (1989)

- A tampa do forno é essencial para diminuição das perdas, as perdas por irradiação de quando a tampa está aberta ou em sistemas que não possuem essa, é de cerca de 4 a 6% da energia de entrada. Por exemplo: Um cadinho de 500 kg derretendo a 1450 °C sem tampa leva a perdas (por irradiação) de até 25 kWh/t.
- Limpe o forno diariamente. A limpeza dos fornos diariamente reduzirá o acúmulo de óxidos na fornalha. O óxido é denso e absorve o calor do metal.
- Mude para o modo de queima baixa quando a porta do forno estiver aberta: O modo baixa queima quando a porta do forno está aberta pode resultar em economia de energia significativa.
- Não superaqueça o metal além da temperatura exigida.
- A otimização da matéria prima, diminuem o tempo de fusão (10 min de tempo a mais significa pelo menos para um forno que utilize 600 (kWh/t) $\times (10/60) = 100 \text{ kWh t}^{-1}$ a mais)

4.2.2.2 Secadores e pré-aquecedores

O sistema de pré aquecimento, utiliza os gases quentes liberados após o derretimento completo da carga, para aquecimento da sucata ou matéria-prima, retirando a umidade presente nela (GANDHEWAR; BANSOD; BORADE, 2011, p. 9).

A utilização de pré aquecedores (figura 15) tem como grande vantagem a diminuição da energia despendida para a fusão do material, pois como apresentado por Canadá (2013), o gás de escape, pré-aquece a sucata a uma temperatura na faixa

de 450 °C a 600°C, esse gás que está com alta temperatura pode ser usado para pré-aquecer sucata para a segunda carga de calor ou a primeira carga do próximo aquecimento, reduzindo assim a energia de fusão (em até 50-75 kWh por tonelada), ainda, o pré aquecimento reduz as necessidades de energia elétrica de 30 a 60 kWh/t e o tempo de inicialização de 5 a 15%. No entanto, em alguns casos, os atrasos associados ao pré-aquecimento de sucata podem reduzir a produtividade.

Figura 15. Sistema de pré-aquecimento



Fonte: Kinematics (2016)

O pré aquecimento da carga pode reduzir o tempo de derretimento e a energia necessária para derreter em cerca de 55-83 kWh/t (ECO Efficiency Group, 2012, p. 2). Nessa mesma publicação é mostrado o desenvolvimento de um estudo em uma pequena fundição situada no Canadá, após instalação de um sistema de pré-aquecimento, foi verificado que o tempo de fusão da sucata foi reduzido em 17%, aumentando a produtividade da empresa em 18%.

Sistemas de pré-aquecimento, como um segundo forno, são os mais promissores. Mas esforços de pesquisa são necessários para desenvolver um modelo abrangente de transferência de energia ligando a operação do forno com a geração

de gás e pré-aquecimento da sucata (GANDHEWAR; BANSOD; BORADE, 2011, p. 8).

4.2.3 Conservação de Energia na etapa da fusão

As perdas nesta etapa são oriundas de seu projeto de fabricação, características construtivas e operação. Nessa etapa há os maiores ganhos em eficiência. A seguir, serão discutidas formas de diminuir o consumo de energia em diferentes equipamentos do forno de indução.

4.2.3.1 Transformador

Os transformadores são utilizados para transformar tensões, correntes e impedâncias em níveis apropriados para uma utilização otimizada (Fitzgerald, 2014, p. 109). O transformador do forno de indução é destinado a abaixar a tensão do sistema de média tensão da concessionária, quando a indústria estiver ligada diretamente nele, ou no sistema de média tensão da indústria quando estiver ligada no sistema de alta tensão da concessionária, para a tensão de operação do forno, NETO *et al.* (1989, p. 28).

É um equipamento de elevada eficiência, cujas perdas são classificadas em perdas no núcleo ou perdas nos enrolamentos. Esse primeiro tipo de perdas, são devido às características magnéticas do material empregado (chapas de ferro silício), e se caracterizam por praticamente não variarem com a carga solicitada do transformador. A forma de diminuir esse tipo de perda, é desligar o transformador quando ele não estiver alimentando nenhuma carga, pois as perdas no núcleo praticamente independem do carregamento do transformador, elas ocorrem mesmo operando em vazio (Copel, 2005, p. 18), ou diminuindo a densidade de fluxo magnético no ferro da máquina, aumentando o volume do ferro, contudo embora as perdas diminuam em termos de watts por quilograma, o volume total de material (e desse modo a massa) é aumentado (FITZGERALD, 2014, p. 686).

As perdas nos enrolamentos são chamadas de perdas ômicas ou perdas joule, que se caracterizam por variar com a resistência do condutor e com o quadrado da corrente elétrica que por ele circula. Ao solicitar menos potência da rede, devido a medidas de conservação de energia, exige-se menos potência e, conseqüentemente, menor corrente de carga. Quanto menor a corrente, menor serão as perdas nos

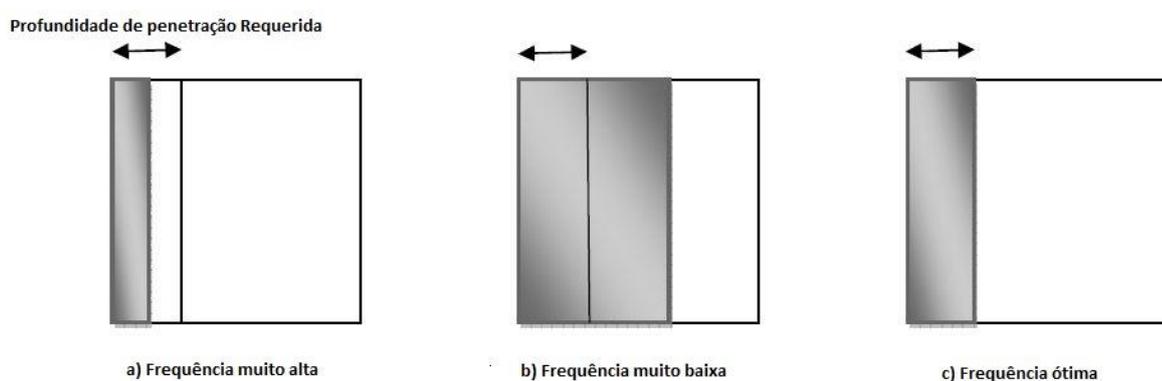
enrolamentos do equipamento. Outro fator que auxilia na diminuição das perdas é a elevação do fator de potência com o qual o conjunto das cargas alimentadas pelo transformador opera. A elevação do fator de potência reduz a componente indutiva da corrente, reduzindo o valor da corrente da carga (COPEL, 2005, p.16).

4.2.3.2 Conversor

Depois da Segunda Guerra Mundial, ocorreu a migração da alta frequência para a média frequência em fornos à indução a cadinhos. Era o início da era de frequência de linha nos fornos a indução a cadinhos. Com esse avanço foi possível que se atingisse, na década de 70, uma potência de 21 MW de operação e assim fundir aproximadamente 60 toneladas de metal num curto espaço de tempo (LEME, 2011, p.1).

A frequência está relacionada às correntes induzidas, a corrente flui em uma densidade maior perto da superfície e decresce em direção ao centro. A frequência que a corrente oscila afeta a profundidade na qual a corrente flui, a profundidade de penetração dessas correntes é inversamente proporcional à raiz quadrada da frequência, então quanto maior a frequência, mais superficial é o efeito (Omori; Ortega, 2016, p. 2), sendo possível observar esse fenômeno na figura abaixo.

Figura 16. Profundidade de penetração da corrente



Fonte: Adaptado de Bolourian (2010)

É possível visualizar que fornos que utilizam baixas frequências terão maior profundidade de penetração, ou seja, menor densidade de corrente. Logo, a primeira medida a ser tomada deve estar na utilização correta da frequência de alimentação.

Uma possibilidade para melhoria no sistema conversor é a utilização da comutação de frequência. Schmitz, Trauzeddel (2014, p.4), afirmam que a tecnologia de forno de média frequência otimizada mantém as perdas térmicas e elétricas mínimas, o uso da tecnologia de comutação de média frequência (150 Hz a 1500 Hz) ao invés da frequência da rede (50 ou 60 Hz), torna possível operar o forno sem o conhecido “pé de banho”, gerando uma economia de 8% na operação.

O uso da baixa frequência necessita do conhecido “pé de banho”, significando deixar cerca de um terço de metal líquido no fundo para iniciar a fusão, essa prática acarreta a erosão do refratário e aumenta as perdas de calor para a água de refrigeração em 20% a 30%. No balanço final, essas perdas podem chegar a 20% do consumo da planta. A densidade de potência também é limitada em 200 kW a 300 kW por tonelada. Causando diminuição nas taxas de produção e aumento do espaço requerido para a região da fusão. A vantagem dos sistemas de baixa frequência é uma maior assimilação dos aditivos (ESTU (2000); KERMELI *et al.* (2016) *apud* ANDRADE, 2016, p. 20).

É também importante destacar a presença de harmônicos, pois o forno de indução possui uma bobina alimentada por corrente alternada (CA) de média frequência, que é fornecida por um inversor, alimentado por um conversor de corrente contínua (CC) conectado à rede de distribuição CA. A magnitude da distorção por forno de indução é muito alta e afeta a tensão fornecida, a presença de harmônicos pode gerar problemas como: superaquecimento do equipamento, diminuição do fator de potência, diminuição do desempenho do equipamento, operação incorreta dos relés de proteção, etc. A solução para o problema das harmônicas, é através da instalação de filtros ativos para o forno existente, retificadores multipulso ou substituição do forno de indução por um novo forno com conversor de 24 pulsos baseado em IGBT (GEF-UNIDO-BEE Project, 2017, p.11).

4.2.3.3 Bobina

Há dois tipos de perdas nas bobinas indutoras do forno: Perdas térmicas e elétricas. Para reduzir essas perdas, a COPEL, (2005), recomenda:

- Utilizar um indutor feito de material de baixa resistividade e limitar sua temperatura com o uso de sistemas de refrigeração da bobina;
- Reduzir ao máximo a distância entre a carga metálica e a bobina, fazendo o refratário o mais fino possível;
- Manter o nível da carga ao nível da espira superior da bobina, utilizando todo o comprimento do indutor;
- Para reduzir as perdas devido à transmissão de calor da carga aquecida, deve-se melhorar o isolamento térmico entre o indutor e a carga metálica, evitando aumentar a espessura do revestimento refratário e isolante para não reduzir o rendimento do forno.
- Melhoria no isolamento térmico do cadinho;

Schmitz; Trauzeddel (2014, p.5), descrevem sobre as perdas elétricas nas bobinas, como sendo perdas que dependem principalmente da densidade da corrente, do material que é feita a bobina e a temperatura dessa. As forças eletromagnéticas fazem com que a corrente seja focada em uma pequena área da seção transversal da bobina, o que resulta em uma alta densidade de corrente e por consequência grandes perdas.

Os mesmos autores ainda, relatam o projeto de uma nova bobina que aumenta a área de superfície de transporte de corrente, reduzindo assim as perdas elétricas. Sendo, possível uma economia de até 4% de energia, na fundição de materiais ferromagnéticos. Essa bobina também pode ser adaptada em fornos sem núcleo existentes, ou seja, ideal para projetos de eficiência energética. Essa nova bobina foi implementada em fundições em Schwermetalle e Stolberg (Alemanha). Gerando uma economia de energia calculada de mais de 9%, os fornos renovados precisaram de 30 kWh/t a menos de energia para derreter os materiais de carga (SCHMITZ; TRAUZEDDEL, 2014, p.5).

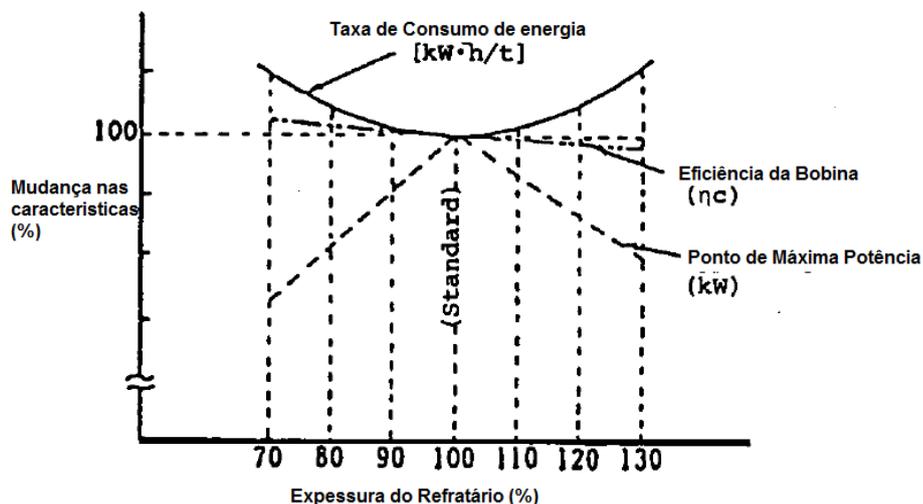
Outra ação que ocasiona potenciais ganhos é a melhoria no concentrador de fluxo magnético, conhecido como “*shunt*”, (Andrade, 2016, p. 23), o concentrador de fluxo magnético trata-se de um material com alta permeabilidade magnética que é adicionado ao indutor como forma de se controlar e se aumentar o fluxo magnético na região de interesse. O material do concentrador de fluxo magnético também deve apresentar uma boa condutividade térmica para não atrapalhar a dissipação do calor gerado no indutor (PAULA, PEDRO, 2017, p. 73).

Os atuais controles de fluxo magnético melhoram a eficiência da bobina, reduzem o fator de potência, a corrente que circula pela bobina, os aquecimentos indesejáveis, melhoram a eficiência da frequência de alimentação e o campo externo, é possível reduzir as perdas na bobina em cerca de 5%, utilizando um concentrador de fluxo, isso dependerá do tipo de forno e operação, além da redução de perdas na bobina, obtém-se aumento da potência de fusão (derretimento do material), aumento da vida útil do cadinho, redução da potência de refrigeração e ganhos com a redução do tamanho dos capacitores (GOLDSTEIN, 2014 *apud* ANDRADE, 2016, p.24).

4.2.3.4 Revestimento/Perdas térmicas (Conservação de energia durante o aquecimento do material)

A parede do revestimento do forno em sistemas de fusão de ferro fundido quase sempre é feita de quartzito, sendo que a espessura deve garantir um bom isolamento térmico, adequada proteção mecânica da bobina, e bom acoplamento eletromagnético entre a bobina e carga (Schmitz; Trauzeddel, 2014, p.4). Então é imprescindível fazer o correto dimensionamento e escolha do material refratário, na figura 17 é visto a relação entre consumo de energia e espessura deste material, onde observa-se que a capacidade do forno é dependente também do revestimento.

Figura 17. Espessura do revestimento VS. Consumo de energia



Fonte: Adaptado de GEF-UNIDO-BEE Project (2017)

A diminuição da espessura do refratário melhora a eficiência da bobina e aumenta a entrada de energia, mas acarreta em maiores perdas térmicas através da parede do cadinho, que passa a ser mais fina. Uma vez que as perdas da bobina excedem as perdas térmicas através da parede do cadinho quase 10 vezes mais, as perdas da bobina continuam a ser a influência dominante aqui. Para comprovar isso, Schmitz, Trauzeddel (2014, p.4), apresentam um estudo para avaliar o ganho em eficiência da bobina, em uma situação onde a parede do refratário foi diminuída de 30mm (espessura inicial de 125mm), essa mudança culminou em ganho de eficiência da bobina de 3%.

4.2.3.5 Recuperação de Calor

Outra forma de reaproveitamento de calor é através da cogeração, que se baseia na produção de duas formas de energia, ao mesmo tempo, no caso da indústria de fundição, utilizando o calor residual. O calor residual é parte do calor que é produzido por meio de um processo de aquecimento (por combustão, por efeito Joule, etc.) e que seguidamente é rejeitado para o ambiente, sem ter sido utilizado no processo (Vale, 2018, p.7).

A indústria de fundição, em geral, possui muito desperdício de energia térmica (temperatura de trabalho do metal, em torno de 1500 °C), fazendo com que diferentes formas de reaproveitamento do calor tenham surgido nos últimos anos (BCS, 2005 *apud* ANDRADE, 2016, p.31).

Atualmente são reconhecidas várias tecnologias de recuperação de calor, cuja aplicação depende das temperaturas de rejeição. Vale (2018, p.9) lista os sistemas de recuperação mais utilizados para indústrias para diferentes temperaturas, para temperaturas de trabalho superiores a 870 °C (que é o caso do forno de indução), têm-se as seguintes tecnologias:

- Regenerador Cerâmico
- Caldeira de condensação
- Queimador regenerativo
- Recuperador radiante
- Pré-aquecimento da carga

4.3 Iluminação

A eficiência energética aplicada em sistemas de iluminação é bastante conhecida e utilizada, exemplo disso são os diversos estudos e projetos governamentais em andamento, como o RELUZ. Vários trabalhos desenvolvidos mostram que a iluminação ineficiente é comum no Brasil. Uma combinação de lâmpadas, reatores e refletores eficientes, associados a hábitos saudáveis na sua utilização, podem ser aplicados para reduzir o consumo de energia elétrica, (ELEKTRO, 2012, p. 123).

Apesar de não ter um consumo muito expressivo de energia na indústria, a iluminação é um fator que deve demandar muita atenção visto que um projeto ineficiente, acarretará em diminuição da produtividade e bem estar dos colaboradores. Observam-se dois extremos muito encontrados nas plantas das indústrias em território nacional. O primeiro é o excesso de iluminação, que causa desconforto, ofuscamento, prejudica os aspectos de segurança e ainda nos dá evidência que existe desperdício de energia elétrica. O segundo é a insuficiência de luz, que pode provocar condições propícias a acidentes de trabalho e desgaste da saúde das pessoas. ‘

De acordo com a Eletrobrás (2016, p. 51), alguns fatores devem ser levados em consideração no momento do dimensionamento do sistema de iluminação, são eles:

- Características do ambiente (cor das paredes, do teto, pé direito, piso, disposição de objetos);
- Componentes do sistema e da instalação elétrica;
- Forma de horário de funcionamento
- Nível de iluminamento nos planos de trabalho;
- Faixa etária das pessoas que trabalham ali
- Tarifa de energia local

A norma ISO 8995-1: Iluminação de ambientes internos de trabalho, estabelece os valores de iluminâncias médias mínimas em serviço para a iluminação artificial para as diferentes áreas de trabalho em diferentes tipos industriais. Novos aspectos são agora recomendados, além da iluminância, como a reprodução de cor e o controle de ofuscamento. Assim, aspectos mais qualitativos de iluminação deverão também ser levados em consideração nos ambientes (KAWASAKI, OLIVEIRA, 2013, p. 59).

Tabela 7. Exemplo de recomendações para iluminação em atividades industriais

Tipo de Ambiente, tarefa ou atividade	$\bar{E}_m LUX$	UGR_L	R_a	Observações
Trabalho em ferro e aço				
Instalações de produção sem intervenção manual	50	28	20	As cores para segurança devem ser reconhecíveis
Instalações de produção com intervenção manual ocasional	150	28	40	
Instalações de produção com intervenção manual contínua	200	25	80	Para alturas de montagem acima de 6m
Depósito de chapas	50	28	20	As cores para segurança devem ser reconhecíveis

Fornos	200	25	20	As cores para segurança devem ser reconhecíveis
Usinagem, bobinadeira, linha de corte	300	25	40	
Plataformas de controle, painéis de controle	300	22	80	
Ensaio, medição e inspeção	500	22	80	

Fonte: Kawasaki; Oliveira (2013)

Quanto a escolha da melhor luminária/lâmpada, a Eletrobrás, apresenta algumas faixas de iluminâncias para diferentes tipos, facilitando assim a escolha da melhor lâmpada a ser usada para atender aos níveis de iluminação e eficiência:

Tabela 8. Principais características das lâmpadas elétricas

Tipo de Lâmpada	Vida Útil (h)	Eficiência Luminosa (lm/w)	Geração de Calor
Incandescentes	1000	15	Alta
Halógenas	2000	20	Alta
Fluorescentes	7500	70	Baixa
Vapor de Sódio	18000	130	Alta
Vapor metálico	15000	90	Alta
LED	25000-60000	100	Baixa

Fonte: Elektro (2012)

Os valores acima podem sofrer algumas variações dependendo do fabricante, para melhorar o desempenho energético da iluminação na indústria bem como diminuir os custos da mesma, algumas atitudes podem ser tomadas, segundo Fayomi (2021), Kermeli *et al.* (2016), como:

- Desligar as luzes em áreas desocupadas.
- Aproveitamento da iluminação natural e aumentar os níveis dessa, pode reduzir em até 100% a utilização de iluminação artificial durante o dia.

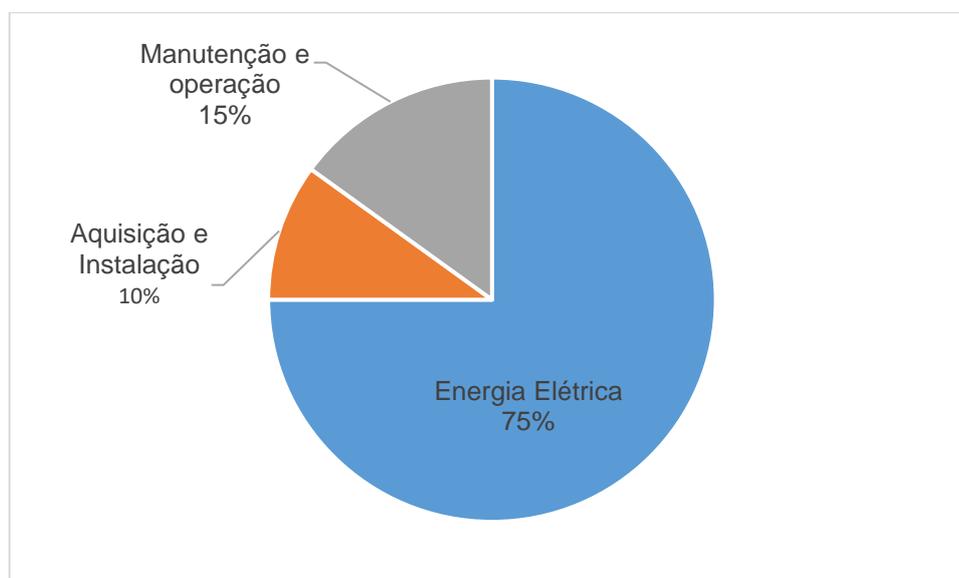
- Usar sensores de presença e outros controles de iluminação, como a dimerização. As lâmpadas podem ser desligadas durante as horas sem trabalho por controles automáticos.
- Utilização de lâmpadas novas e mais eficientes.
- Substituir reatores magnéticos por reatores eletrônicos. Reatores eletrônicos exigem 12 a 30% menos energia do que os magnéticos.
- Substituir as lâmpadas tubulares T-12 por tubos T-8, T-5 ou LED. O uso de lâmpadas T-8, por exemplo, pode ocasionar uma economia de energia de até 30%.
- Dimensionamento correto da iluminação, ou seja, ajustar os níveis de lux corretos para a atividade que está sendo realizada.
- Atualizar sinais de saída. Os custos de energia podem ser reduzidos pela troca de lâmpadas incandescentes por lâmpadas de LED (diodos emissores de luz).
- Reduzir a corrente do sistema de iluminação (*dimmers*). Os controladores de potência reduzem a corrente e economizam energia em sistemas de iluminação HID, fluorescentes ou LED através de sensores de lux, de acordo com a iluminação necessária ao ambiente (set).

4.4 Ar Comprimido

O ar comprimido é uma importante forma de energia, insubstituível em diversas aplicações e resultado da compressão do ar ambiente, cuja composição é uma mistura de oxigênio (~20,5%), nitrogênio (~79%) e alguns gases raros. Atualmente, cerca de 6 bilhões de toneladas de ar são comprimidas por ano em todo o planeta, gerando um consumo de 500 bilhões de kWh a um custo de 30 bilhões de dólares. São números que provocam um grande impacto no meio ambiente, mas que poderiam ser substancialmente reduzidos com medidas racionais (METALPLAN, 2017, p. 8).

A indústria de fundição utiliza grandes quantidades de ar comprimido, por ser uma forma segura e conveniente de energia, também é o utilitário mais caro em uma fundição (KERMELI, *et al.*, 2016, p.18). O ar comprimido é, erroneamente, frequentemente considerado "gratuito" por aqueles que o utilizam, porque ar livre está sendo usado da atmosfera. Os gastos energéticos necessários para a obtenção do ar comprimido são mostrados no gráfico 5.

Gráfico 5. Custo de um sistema de ar comprimido



Fonte: Adaptado de Metalplan (2017)

Dessa forma, fica evidente que é uma tecnologia em que as melhorias na eficiência energética estão diretamente relacionadas à economia financeira. As maiores perdas desse sistema estão relacionadas aos seguintes problemas:

- Vazamentos - 25%
- Aplicações ruins - 20%
- Perda de ar nos sistemas de drenagem - 5%
- Demanda artificial - 15%

Então, de acordo com CANADÁ (2003), cerca de 65% da utilização do sistema é convertido em perdas, logo intervenções devem ser necessárias a fim de aumentar o uso líquido útil do ar comprimido. Algumas dessas boas práticas são apresentadas por Canadá (2003), Kermeli *et al.* (2016) e Noro; Lazzarin (2016), como sendo:

- Analisar a demanda e adequar a capacidade à demanda;
- Manutenção do sistema
- Monitoramento
- Controle de eventos de pico de demanda;
- Correção de aplicações inadequadas e desperdício no uso de ar comprimido;
- Identificação e correção de vazamentos;
- Controlar e gerenciar todo o sistema;
- Otimizando o programa de manutenção;

- Sensibilizar os usuários para as práticas corretas e oportunidades de economia;
- Desligar o ar quando não for utilizado
- Acompanhamento de resultados, desempenho e custos do ar comprimido operações do sistema.
- Modificar o sistema ao invés de aumentar a pressão
- Minimizar quedas de pressão
- Maximizar ponto de orvalho de pressão permitido na entrada de ar
- Reduzir a temperatura do ar de entrada
- Use os controles do compressor
- Dimensionamento correto dos tubos
- Use compressores de ar movidos a gás natural.
- Localização correta dos compressores de ar e a qualidade do ar extraído. Quanto mais quente o ar aspirado, maior será a potência solicitada para comprimi-lo.
- Quando há vários compressores na indústria, a configuração de pressão deles deve ser ajustada de modo que apenas um, aquele com o menor tamanho, lide com a variação de carga.

Em estudo apresentado por ANDRADE (2016), o autor aponta os ganhos de eficiência obtidos através de diferentes medidas de redução do consumo, esses ganhos de eficiência também são apresentados pelo Eletrobras (2016).

Tabela 9. Ganhos em eficiência através de medidas de combate ao desperdício

Continua

Ações	Ganhos potenciais de redução de consumo (%)
Redução de perdas utilizando reservatórios e sistema de estabilização	4
Controle de compressores em cascata	15
Redução de perda de carga	3
Melhorias no sistema de secagem	5

Tabela 9. Ganhos em eficiência através de medidas de combate ao desperdício

Continuação

Alteração na concepção geral do sistema de multipressão	9
Substituição de motores convencionais por alto rendimento	5
Utilização de variadores de velocidade	15 a 30
Seleção adequada do tipo de compressor	12
Melhoria nos pontos de utilização	40
Redução de vazamentos	Variam de acordo com a pressão de trabalho, mas podem chegar a 40%
Substituição regular de filtro de ar	2
Ajuste da pressão	1 bar de aumento equivale a 6% de aumento da potência consumida
Melhoria na temperatura aspirada	
Compressor movido a gás natural	Depende do custo do insumo
Dimensionamento correto dos tubos	3
Recuperação de calor	Até 20% da energia da entrada e até 94% da energia consumida no eixo
Melhoria dos acionamentos (motores de alta eficiência)	2
Melhoria dos acionamentos (Reguladores de velocidade)	15
Troca de compressores por versões mais modernas (aperfeiçoamento)	7
Uso de sistema de controle sofisticado	12
Recuperação de calor rejeitado para uso em outras funções	20
Melhoria no resfriamento, secagem e filtragem do ar	5
Projeto global do sistema, incluindo sistema de multi pressões	9
Redução na perda por queda de pressão	3
Otimização de dispositivos (equipamentos) de uso final	40
Redução de vazamentos de ar	20
Substituição de filtros mais freqüente	2

Fonte: Procel (2016); Andrade (2016)

4.5 Motores

Motores elétricos são máquinas que transformam energia elétrica em mecânica, ou seja, ele é um elemento de transferência entre a rede elétrica e o sistema mecânico acionado. Ao se analisar a eficiência do motor de indução, percebe-se que este está inserido em um sistema onde o rendimento total do processo depende de cada uma de suas partes componentes, atualmente aproximadamente 63% das aplicações dos motores nas indústrias são destinadas à movimentação de fluidos (acionamento de bombas ou ventiladores) (ELEKTRO, 2012, p. 226).

É muito comum encontrar motores elétricos superdimensionados, o que normalmente faz com que o rendimento e o fator de potência do mesmo apresentem valores reduzidos, de modo a evitar isso, é importante conhecer as características da carga, da rede de alimentação e ambientais, conhecer métodos para dimensionamento adequado, não exagerar na aplicação de sucessivos fatores de segurança. Uma prática comum em muitas indústrias é substituir o motor que apresenta defeito por máquina de maior potência disponível no almoxarifado (ELETROBRAS 2016, p. 28).

Recomenda-se que a avaliação do carregamento do motor elétrico e consequente análise para substituição do mesmo seja feita depois de eliminados os desperdícios nos demais componentes do sistema motriz, pois após análise e diminuição das perdas, o motor dimensionado pode acabar tendo baixo rendimento (em geral, isso ocorre para carregamento abaixo de 50%), pois o motor passa a operar na região de superdimensionamento, já que a carga solicita uma potência menor. Comportamento análogo ocorre em relação ao fator de potência, seguindo essa orientação, poderá ser recomendada a substituição do motor por outro de menor potência, tornando mais atrativa economicamente a proposta comparada à substituição recomendada sem avaliação do sistema motriz como um todo (ELETROBRAS 2016, p. 28).

Alguns autores descrevem algumas outras ações de eficiência energética para motores, sendo eles, Kermeli *et al.* (2016), Elektro (2012) e ELETROBRAS (2016):

- Utilização de programas computacionais para análise dos motores.
- Crie um plano de gerenciamento do motor. Um plano de gerenciamento de motores pode ajudar as empresas a perceber economia de energia e garantir que as falhas do sistema sejam tratadas de forma rápida e econômica.

- Na aquisição de um novo motor, dar preferência ao motor com selo Procel. Especificar o motor com potência adequada, verificando se suas características são adequadas às condições do ambiente onde está instalado (temperatura, atmosfera corrosiva etc.). Instalar motor com ventilação adequada e em ambientes adequados.
- A substituição de um motor “em uso” por outro com rendimento superior tende a ser mais atrativa economicamente quando a aplicação requer um uso do motor por um maior número de horas;
- Selecione e compre motores estrategicamente. Considerando os custos, ciclo de vida e eficiência do motor, é possível aumentar a eficiência e o tempo de serviço do motor.
- Selecione motores de tamanho adequado. Substituir motores superdimensionados por motores de tamanho adequado economiza na indústria, em média, 1,2% do consumo total de eletricidade do sistema motorizado.
- Recomenda-se monitorar a tensão de alimentação dos motores elétricos, uma vez que os mesmos têm seu dimensionamento otimizado para o funcionamento sob tensão nominal;
- Verificar o balanceamento das tensões, uma vez que o desequilíbrio é um dos fatores que contribui bastante para o aumento das perdas nos motores trifásicos, gerando correntes excessivas, elevação de temperatura e conseqüentemente à redução da vida útil, além da redução do conjugado disponível para a carga;
- Os harmônicos também aumentam as perdas do motor, além de reduzirem o conjugado disponível para a carga e de poderem provocar a existência de conjugados pulsantes;
- Adotar rotina de limpeza e remoção de depósito de materiais que possam obstruir a refrigeração, secagem periódica das bobinas (quando aplicável), inspeção de mancais e rolamentos (ruído, vibrações e lubrificação);
- É importante na retirada de rolamentos utilizar ferramentas adequadas (saca-polia, extratores) e na troca, que a colocação seja feita por prensa com apoio na pista central ou através de dispositivo de aquecimento (por indução ou

banho de óleo), evitando-se o uso de martelo ou dispositivos que provoquem pancada;

- Inspeccionar periodicamente as conexões elétricas nos terminais do motor, nos contatos dos dispositivos de partida e dos elementos de comando. Conexões frouxas irão produzir perdas por efeito joule elevadas que podem acarretar, além do desperdício, sérios riscos às instalações, tais como a queima do revestimento isolante, tendo como consequência um curto-circuito ou até
- Identificação do motor. Os motores que não estiverem em uso devem ser desligados.
- Utilizar métodos de partidas e operação que acarretem em menor consumo de energia, como: inversores de frequência (reduções de até 80%) e *soft starters*. (Os *soft starters* reduzem o uso de energia durante a partida do motor).
- Evitar rebobinagens: Motores rebobinados possuem perdas típicas de quase 2% na eficiência a cada retrocesso
- Evitar o uso de acoplamentos com redutores e correias (podem introduzir perdas de até 30%);
- Atentar para o fator de potência.
- Uma solução inovadora para redução de consumo em motores elétricos em fundições e com grande potencial de aplicação é a utilização de sistemas de exaustão e filtros de mangas. A solução é baseada na substituição do sistema tradicional, com um motor de indução acionado diretamente pela rede, por um motor síncrono de ímãs permanentes acionado por inversor de frequência, e um transdutor de pressão para monitoramento do sistema de (WEG 2010 *apud* ANDRADE, 2016, p.37).

4.6 Bombas e exaustores

O projeto de um sistema de bombeamento deve levar em consideração a eficiência energética, enfocando os seguintes aspectos: NPSH, diâmetro econômico, rendimento da bomba, peso específico de líquido bombeado, vazão, perdas de carga, golpe de aríete, dentre outros. No entanto, se o sistema já está em operação, grandes potenciais de redução de consumo de energia elétrica podem ser facilmente identificados na operação, manutenção e instalações, conforme apresentado a seguir

(Eletrobras, 2016, p. 36). Os principais itens que compõem o potencial de conservação de energia no bombeamento, de acordo com Eletrobras (2016), COPEL (2005), são:

- Recomenda-se instrumentalizar o sistema de bombeamento minimamente com a instalação de medidores de pressão (vacuômetros e manômetros na sucção e no recalque respectivamente) e se viável, de vazão e potência elétrica também.
- O mal dimensionado ou com excesso de curvas é responsável por perdas de energia.
- Verificar se a bomba está operando no regime para o qual ela foi projetada (permanente/intermitente horas de operação/dia etc).
- Seguir as recomendações do fabricante quanto à manutenção preditiva e preventiva, bem como em relação ao programa de substituição e acompanhamento de itens.
- Verifique se o rotor da bomba está balanceado.
- O revestimento interno das tubulações deve ser mantido o mais liso possível.
- Em paradas programadas de manutenção da planta, agendar hidrojateamento para limpeza interna das tubulações, de modo eliminar depósitos, os mais variados possíveis, que podem restringir a vazão e aumentar a altura manométrica do sistema (head – pressão de descarga).
- Limpar periodicamente os reservatórios e tanques de sucção, reduzindo a quantidade de sólidos suspensos. Estes sólidos causam desgastes excessivos nos componentes internos das bombas. Em algumas situações, podem ser instalados filtros.
- Verificar se as válvulas instaladas são de modelo antigo, que apresentam uma grande perda de carga interna. Nestes casos, mais cuidados operacionais devem ser aplicados ao serem efetuados ajustes nas mesmas.
- Entrada de ar na tubulação de sucção, devido ao estado precário da tubulação ou intencionalmente como ajuste da vazão e, conseqüentemente, da carga do motor. Apesar de ser uma maneira de redução da carga solicitada, esta atitude é condenável pela redução da eficiência e vida útil da bomba.
- Redução concêntrica na tubulação de sucção. Este tipo de acoplamento, quando na posição horizontal ou levemente inclinada, permite a formação de

“bolsões de ar” e, com isso, provoca o turbilhonamento do fluxo d’água na entrada da bomba diminuindo o rendimento.

- A existência de vazamentos na tubulação de recalque consiste numa situação de flagrante desperdício de energia.

Já sobre o sistema de exaustão a Eletrobrás, recomenda:

- Selecionar o sistema de exaustão de melhor rendimento.
- Não exagerar na definição da margem de segurança dos exaustores, uma vez que o sobredimensionamento é uma das maiores causas de consumo de energia em excesso nessas máquinas.
- Rotores fechados proporcionam melhores rendimentos se comparados com os abertos que possuem muitas perdas por fugas.
- Verificar a viabilidade econômica de se substituir sistema com velocidade constante e controle de vazão via estrangulamento de válvula por sistemas com inversor de frequência.
- Utilização de dois ou três ventiladores operando em paralelo, para atender às variações da instalação.
- Verificar se o ângulo das pás do ventilador é o correto, caso negativo, acionar a manutenção.
- Verificar o ponto de operação do ventilador, comparando-o com o ponto de máxima eficiência fornecido pelo fabricante.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A inobservância de fatores técnicos, econômicos e até comportamentais, que contribuam para a eficiência energética de um processo, geram um círculo vicioso de perdas e ineficiência. A indústria brasileira, embora seja a maior consumidora de energia no país, é também a que menos contribui ao longo dos anos para práticas eficientes. Conforme as investigações realizadas neste trabalho, acerca das possíveis ações de EE, foi verificado que alguns destes processos facilmente podem ser eficientizados, pois muitas das práticas estão vinculadas a operação de equipamentos, a escolha mais adequada de equipamentos e ao controle e dimensionamentos corretos desses.

O desenvolvimento econômico tem um vínculo quase direto com o aumento de energia, com exceção em países desenvolvidos tecnologicamente o suficiente para aplicar medidas de gestão de energia, utilizando-se de tecnologias avançadas e preparando não apenas a indústria e máquinas para o melhor desempenho de suas funções, mas também toda a equipe que trabalhará no segmento. Esse desacoplamento só é possível quando há um amplo entendimento de medidas de eficiência energética, dessa forma esse trabalho teve o intuito de contribuir com apontamento de boas práticas de eficiência na indústria de fundidos.

A análise de boas práticas realizada neste trabalho, se deu através de uma investigação ampla de conceitos relacionados ao gerenciamento de energia, equipamentos, inovações tecnológicas e outros. Após visualizar quais os insumos utilizados nessa indústria, buscou-se entender como era a distribuição deste e das perdas agregadas nos diferentes processos, a fim de compreender quais os setores onde há maiores possibilidades de efficientização. Comparativamente, ficou claro que a maior concentração de energia consumida ocorre durante a etapa da fusão. As perdas e o consumo de energia nos equipamentos destes setores, apresentam potencial de redução, desde que sejam implementadas medidas e outras ações com este objetivo, tais como a aplicação de novas tecnologias, mudanças de cunho operacional e intervenções inerentes ao pessoal, como treinamentos, entre outros.

A bibliografia aponta que a partir da implantação de um sistema de auditoria energética seria possível uma redução do consumo de energia, na indústria com um todo, de até 40%. Mais detalhadamente nos setores, foi observado que na etapa da fusão, dado que corresponde a cerca de 70% do consumo de energia, com

implementação de medidas e EE poderia chegar a 56% desse consumo, os ganhos estão vinculados diretamente com a diminuição das perdas energéticas nas bobinas do forno, sendo possível mitigá-las com ações como a introdução de concentrador de fluxo, aumento da área de superfície de transporte da corrente, utilização de material adequado (sem arestas, sem presença de umidade, etc.), entre outras medidas.

Já nas outras etapas, como iluminação, a bibliografia é mais ampla e reconhecida, nesse setor apesar do baixo consumo, há influência direta no bem estar e produtividade dos colaboradores, devendo atentar-se para o correto dimensionamento e escolha das luminárias. Nos sistemas de Ar-comprimido foi visualizado que há grandes perdas na utilização do sistema, cerca de 65%, então medidas como adequação da capacidade à demanda, controle de eventos, correção de aplicações inadequadas visando a diminuição do desperdício, foram vistas como medidas a serem tomadas a fim de aumentar a eficiência nesse processo.

Quanto aos motores, a principal medida a ser tomada está vinculada ao dimensionamento desses, pois os autores apontam ser uma prática normal o superdimensionamento de motores na indústria. Por fim, boas práticas na utilização de bombas e exaustores, requerem não somente o correto dimensionamento como nos casos dos motores, mas também constantes acompanhamento das condições dos equipamentos, manutenções preventivas e preditivas, sendo essas aplicações de gestão de energia, bastante simples, mas com resultados significativos ao longo do tempo.

Ao final do estudo, foi identificada a falta de bibliografias nacionais específicas para essa indústria. O estudo de indicadores de eficiência energética, por exemplo, seria interessante para uma comparação com o mercado internacional, a fim de verificar se o consumo e perdas na indústria nacional estão próximas às esperadas em outros países, pois assim seria possível desenvolver estudos de aplicações de medidas e tecnologias mais específicas, para mitigação dessas perdas nas indústrias nacionais. Como recomendação para trabalhos futuros, frisa-se a importância de elaborar investigação dos projetos de eficiência energética desenvolvidos nessas indústrias atualizados, eventuais barreiras de consolidação desses projetos, e uma perspectiva acerca dos resultados obtidos com projetos de eficiência que já tenham sido implementados.

REFERÊNCIAS

ABREU, Y. V.; OLIVEIRA, M. A. G.; GUERRA, S. M. G. **Energia Sociedade e Meio Ambiente**. Eumed.net, p. 175, Universidade de Málaga, Málaga, 2010.

ACORONI, J.C.P; SILVA, A. V; SOUZA, E. D., **Eficiência Energética: Melhores Práticas em Economia de Energia em um Setor Industrial**. Belo Horizonte: Centro Universitário de Belo Horizonte. Disponível em: https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_junio.pdf. Acesso em: 05 de set. 2021

ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M. S; GANDRA, G. T. **Panorama da indústria mundial de ferroligas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v. 10, p.57-114, set. 1999.

ANDRADE, Márcio Galon de; **eficiência energética em fundições: uma revisão Bibliográfica e um estudo de caso para uma fundição Brasileira**. Orientador: Luciano Lopes Pfischer. 2016. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Energia, Universidade Federal De Santa Catarina (UFSC), Araranguá, 2016.

ARASU, M; JEFFREY, L Rogers. **Energy Consumption Studies in Cast Iron Foundries. Indian Foundry Congress= Estudos do Consumo de Energia em Fundições de Ferro**. Fundição indiana. Índia, p. 331-336, fev. 2009.

ARRUDA, Carla Souza. **Análise do processo de fundição e ficha de alerta de Qualidade**. Orientador: Ailton Leonel Balduino. 2018. 53 f. Monografia (Especialização) - Centro Universitário UNIFACVEST, Lajes, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO (ABIFA). **Produção de fundidos tem novo incremento em 2019**. [s/l], 30 de jan. 2020. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/producao-de-fundidos-tem-novo-incremento-em-2019/> Acesso em: 01 de ago. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA (ABESCO). **Brasil usa mais energia para produzir US\$ 1 no PIB**. São Paulo, 12 de dez. 2017. Disponível em: <http://www.abesco.com.br/novidade/brasil-usa-mais-energia-para-produzir-us-1-no-pib/>. Acesso em: 04 de jul. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 50001: Sistemas de gestão da energia** — Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro. 2018.

BALDAM, Roquemar de, L. e Estéfano Aparecido Vieira. **Fundição - Processos e Tecnologias Correlatas**. Disponível em: Minha Biblioteca, (2nd edição). Editora Saraiva, 2014.

BASTOS, Dayane da Silva. **Projeto de um sistema de canais e massalotes eficiente para a fundição da peça atracador – porca borboleta**. Orientador: Ana Maria Pérez Ceballos. 2013. 44 f. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) –

Tecnologia em Processos Metalúrgicos, Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2013.

BOLOURIAN, A. **Evaluations of Energy Efficiency Improvement** = Avaliações de melhoria da eficiência energética. 2010. 71 f. Dissertação – Engenharia Elétrica, Chalmers University Of Technology, Gotemburgo, Suécia, 2010.

BRASIL. Alexandre Vidigal De Oliveira. Ministério de Minas e Energia. **Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico - 2020**: Siderurgia, Ferro-gusa, Ferroligas, Metais não ferrosos, Fundição. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2020, p. 74.

BLOS, Tiago Miguel. **Estudo de indicadores de eficiência energética na usinagem integrando monitoramento de energia com sistema de execução de manufatura**. Orientador: Carlos Alberto Mendes Moraes. 2020. 106 f. Dissertação – Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2020.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Brasília: MME, 2020.

BUBLIK, Jaroslav; ABRAHAM, Matej. Specific Energy Consumption of Induction Crucible Furnace. University of West Bohemia in Pilsen, República Tcheca. 2011.

CAÇOTE, José. **Indicadores de performance energética para o sector da Fundição**, XVIII Congresso Nacional de Fundição. Department for International Development. [s.l.].2018.

CANADÁ. Cipec. Canadian Foundry Association (Org.)= Associação Canadense de fundição. **Guide to Energy Efficiency Opportunities in Canadian Foundries** = Guia de oportunidades de eficiência energética em fundições canadenses. Ottawa: Canadian Foundry Association, 2003. 143 p.

CASOTTI, Bruna Pretti; FILHO, Egmar Del; CASTRO, Paulo Castor de. **Indústria de fundição: situação atual e perspectivas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.33, p. 121-162, mar. 2011. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>. Acesso em: 20 de jun. 2021.

CECONE, Eduardo Christiano, *et al.* **Incentivo à inovação, pesquisa e desenvolvimento no setor Energético brasileiro: efeitos da lei 9.991/00**. – Revista Eletronica do UNIVAG, ed. 17(2017), p. 143-153, 2016. Disponível em: <https://periodicos.univag.com.br/index.php/CONNECTIONLINE/article/view/385/597>. Acesso em: 02 de out. de 2021.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA – COPEL. **Manual de eficiência energética na indústria**. Curitiba, 2005.

DOMINGUES, Paulo Cesar Magalhães, *et al.* **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. 2020. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Departamento de Desenvolvimento Energético.

ECO EFFICIENCY GROUP, **Energy eco-efficiency opportunities in Queensland Foundries**=Oportunidades de ecoeficiência energética em fundições em Queensland.2012. Disponível em: < <https://www.ecoefficiencygroup.com.au/wp-content/uploads/2017/11/00976-F2A-Melting-efficiency.pdf>> . Acesso em: 02 de Mai. de 2021.

ELEKTRO (São Paulo). Excen (Org.). **Eficiência energética: fundamentos e aplicações**. Campinas: Fupai, Universidade Federal de Itajubá, 2012. 314 p.

ELETROBRAS. **Dicas de Economia de Energia por Setor de Consumo**, Superintendência de Eficiência Energética – PF, 2016.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Monitorando o Progresso da Eficiência Energética no Brasil**- Indicadores e Análises Setoriais. Nota técnica DEA - 025/2017. Rio de Janeiro: EPE, 2017.

ERONEN, Sini, *et al.*, **Improving the energy efficiency of foundries in Europe =** Melhoria na eficiência energética em fundições Europeias. FOUNDRYBENCH, [s/l], 2012.

FAYOMI, O. S. I., *et al.*, **A Review of Energy Consumption in Foundry Industry=** Uma revisão do consumo de energia na indústria de fundição, 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 665 012024. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/665/1/012024>. Acesso em: 13 de mai. de 2021.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS (FIEMG). **Guia de boas práticas do setor de fundição**, 2018. Disponível em: <http://www.sifumg.com.br/wp-content/uploads/2016/02/cartilha-de-undicao.pdf>;. Acesso em: 03 de mai. de 2021.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., Charles; UMANS, Stephen D. Maquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

FOSSA, Alberto José; SGARBI, Felipe de Albuquerque. **Guia para aplicação da Norma ABNT NBR ISO 50001**. São Paulo: International Copper Association Brazil, 2017 (Guia). Disponível em: http://www.abrinstal.org.br/docs/guia_gestao_de_energia.pdf. Acesso em: 07 de ago. de 2021.

GANDHEWAR, Vivek R.; BANSOD, Satish V., BORADE , Atul B.. **Induction Furnace - A Review =** Forno de indução - Uma revisão. International Journal of Engineering and Technology=Jornal Internacional de Engenharia e Tecnologia. Vol.3 (4), 2011, Disponível em: <https://www.enggjournals.com/ijet/docs/IJET11-03-04-06.pdf>. Acesso em: 27 de jun. de 2021.

GASPAR, *et al.*, **Caracterização e Análise Energética de Empresas Agroalimentares**. +AGRO–Qualificação organizacional, energética e de segurança

e saúde no trabalho da indústria agroalimentar, Universidade da Beira Interior, p.102, 2018.

GODOI, José Maria Alves. **Eficiência energética industrial: um modelo de governança de energia para a indústria sob requisitos de sustentabilidade**. Orientador: Silvio de Oliveira Junior. 2011. 127 f. Dissertação de mestrado - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

Government of India, Bureau of Energy Efficiency, **GEF-UNIDO-BEE Project, Promoting Energy Efficiency and Renewable Energy in Selected MSME Clusters in India** = Promoção da eficiência energética e das energias renováveis em grupos selecionados de MPME na Índia. Nova Delhi, Índia, 2017.

GUERRA, Helvio Neves, *et al.* **Balanco Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. 2020. Empresa de Pesquisa Energética. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Departamento de Desenvolvimento Energético. Rio de Janeiro, 2020.

KAWASAKI, Juliana Iwashita; OLIVEIRA, Vanderson. **Aspectos para eficiência energética em sistemas de iluminação em indústrias**. In: O setor Elétrico. 87. ed. [s/l], 2013. p. 58-65. Disponível em: http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/05/Ed87_fasc_eficiencia_industria_cap4.pdf. Acesso em: 21 jun. 2021.

KERMELI, Katerina *et al.*, **Energy Efficiency and Cost Saving Opportunities for Metal Casting: An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers**. United States: U.s. Environmental Protection Agency= Estados Unidos: E.U. Agência de proteção ambiental. 2016. 128 p.

KINEMATICS, General. **Charge Pre-Heat Systems**=Sistema de pré aquecimento da carga. 2021. Disponível em: <https://www.generalkinematics.com/product/charge-pre-heat-systems/>. Acesso em: 25 set. 2021.

LEME, Rodrigo Moraes; **CARACTERÍSTICAS DOS FORNOS A INDUÇÃO COM CONVERSORES IGBTs**. Orientador: Geraldo Peres Caixeta. 2011. 59 f. Monografia – Engenharia Elétrica, Universidade São Francisco, Itatiba, 2011.

MAMEDE, João Filho, **Instalações elétricas industriais**: de acordo com a norma brasileira NBR 5419:2015. 9 ed. Rio de Janeiro : LTC, 2017.

MACHADO, Giovani Vitória, *et al.* **Atlas da Eficiência Energética: Relatório de Indicadores, 2019**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Estudos Econômicos - Energéticos e Ambientais. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil-2019>. Acesso em: 10 de jun. de 2021.

MATHUR, Ajay. **Energy Conservation Measures in the foundry sector** = Medidas de conservação de energia no setor de fundição. Hariana, [s/d].

METALPLAN. **Manual do Ar Comprimido**. 6 ed. [s/l], 2018.

MONTEIRO, Luciane P. C. **Uso de Indicadores de Eficiência Energética em plantas de produção de amônia**. ENGEVISTA, v. 15, p. 261-269, 2013.

NASCIMENTO, Paola Gabriela. **Eficiência energética na indústria: estudo de caso em uma Empresa metalúrgica**. Orientador: Martin Cruz Rodriguez Paz. 2017. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Energia, Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Bagé, 2017.

NETO, Antonio Klein, *et al.*, **Manual de conservação de energia elétrica, fornos elétricos a indução**. Procel, Rio de Janeiro, p. 59, 1989.

NETO, Carlos A. R.; SANTOS, E. M. **O programa Nacional de Conservação dos Derivados de Petróleo**. In: IV Congresso Brasileiro Energético, 2004, Itajubá. IV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 1989.

Noro, M., Lazzarin, R.M. **Energy audit experiences in foundries = Experiências de auditoria energética em fundições**. Int J Energy Environ Eng 7, 409–423 (2016). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0152-y>. Acesso em: Mai. De 2021.

OMORI, Julio S.; ORTEGA, Mauricio R. **Estudo dos Impactos da Conexão de um Forno de Indução no Sistema de Distribuição**. XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI. Belo Horizonte – MG, 2006. Disponível em: < <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/SENDI/pdf/QEE08-1088.pdf>>. Acesso em: Jun. de 2021.

PAULA, Pedro Augusto Lanza de; **Simulação Multifísica do Processo de Têmpera Acoplando as Análises Térmica, Microestrutural e Eletromagnética**. Orientador: Renato Pavanello. 2017. 104 f. Dissertação – Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2017.

PRASHANTH, M. S.; **A Multi Faceted Approach To Energy Conservation In Foundries = Uma abordagem multifacetada para a conservação de energia em fundições**. 12th Global Congress On Manufacturing And Management, GCMM 2014 = 12º Congresso Global De Manufatura E Gestão, CGMG 2014. Vellore - India, 2014.

Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (ProcelInfo). O programa. [s/l], [s/d]. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?Team=%7B505FF883%2DA273%2D4C47%2DA14E%2D0055586F97FC%7D>. Acesso em: 05 de Ago. 2021.

Programa Brasileiro de Etiquetagem. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). [s/l], 12 de abr. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/conheca-o-programa>. Acesso em: 07 de jul. 2021.

RIBEIRO, Bruno De Oliveira Gomes; SILVA, Kiane Alves E. **Indicador de Eficiência Energética para Auxiliar a Tomada de Decisão de Investimento em Projetos de**

Eficiência Energética em Instituições de Ensino. Orientador: Luiz Amilton Peplow. 2018. 75 f. Trabalho de conclusão de curso (TCC) – Engenharia Elétrica, departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Curitiba, 2018.

SANTOS, Jean Carlos dos; **Ação de eficiência energética em fornos de fusão: Um estudo de caso.** Orientador: Jean-Marc Stephane Lafay. 2019. 92 f. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) – Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Pato Branco, 2019.

SCHMITZ, W; TRAUZEDDEL, D. **The Melting, Holding and Pouring Process - Energy and Process - Related Aspects** = O Processo de Derretimento, Retenção e Derramamento - Energia e Processo - Aspectos Relacionados. In: World Foundry Congress, 71, 2014, Bilbao. Proceedings. United Kingdom: World Foundry Organization Ltd, 2014. v. 2, p. 642- 653.

SCHIFO, Jd. Fs.; RADIA, Js.ts. **Theoretical/Best Practice Energy Use In Metalcasting Operations.** Washington, Dc: U.s. Department Of Energy, 2004. 114 p.

SOUZA, Hamilton Moss de, *et al.* **Plano Nacional de Eficiência Energética - Premissas e Diretrizes Básicas.** 2011. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Departamento de Desenvolvimento Energético.

SOUZA, P V S ; SILVA, C. J. V. ; BALTHAZAR, W. F. O arrasto magnético e as correntes de Foucault: um experimento de baixo custo com vídeo-análise. REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA (ONLINE), v. 41, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0257>. Acesso em 17 de jun. de 2021.

VALE, André Alexandre Amorim Coimbra; **Estudo da Recuperação de Calor Residual e sua Aplicação à Indústria Cerâmica.** Orientador: Armando Oliveira. 2018. 101 f. Dissertação de Mestrado – Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2018.

APÊNDICE

INVESTIGAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO

Cintia Lemes
Sabrina Neves da Silva

RESUMO

Desde a crise do petróleo ocorrida em 1973, e os apagões em 2001 no Brasil, diversos países vêm estudando maneiras de diminuir a dependência de combustíveis fósseis, sem prejudicar a evolução de sua economia, sendo a eficiência energética uma das possíveis soluções para isso. Neste contexto, após análise setorial do consumo de energia no Brasil, observou-se que o setor industrial é historicamente o maior consumidor, contudo, é também o setor que menos desenvolve práticas de eficiência energética. Sendo então, escolhida a indústria de fundição, como tema para o estudo de práticas de eficiência energética. É estudado neste trabalho como se comporta a distribuição de energia na indústria, e após identificado o maior insumo consumido (no caso energia elétrica), foram investigadas as diversas perdas agregadas nos processos, como exemplo, na etapa de fusão do material as perdas oriundas da má qualidade da sucata a ser fundida, nos motores o superdimensionamento deste equipamento ou a ineficiência luminosa nos setores. Então, após pesquisa por meio de bibliografias já reconhecidas, foram levantadas práticas para mitigação das perdas na etapa de fusão, iluminação, motores, bombas e exaustores, também foram levantadas novas tecnologias possíveis de se aplicar nessa indústria. Algumas dessas práticas são: Utilização de pré-aquecedores, medidas que reduzem a demanda de energia elétrica em cerca de 30 a 60 kWh/t, inserção de concentrador de fluxo magnético “shunt”, diminuindo as perdas nas bobinas em até 5%, reaproveitamento do calor residual, limpeza da carga metálica, entre outras.

Palavras-chaves: Eficiência Energética, fundição, perdas.

1. INTRODUÇÃO

O uso intensivo de energia é uma característica e consequência das economias modernas, em países em desenvolvimento a evolução do poder aquisitivo permite que a população tenha maior acesso a bens e serviço, conseqüentemente a produção de bens tende a crescer bem como o consumo de energia, vale ainda ressaltar que esses países também têm maior dificuldade em acessar tecnologias de mitigação de emissão de poluentes ou mais eficientes (ABREU; OLIVEIRA; GUERRA, 2010).

Visto isso, o presente trabalho propõe-se a estudar a eficiência energética aplicada em um ramo da atividade industrial, a indústria de fundição, a qual teve, em 2019, uma produção de 2288 10³t de metal, configurando o Brasil entre os dez maiores produtores de fundidos do mundo (BRASIL, 2020). Entende-se como eficiência energética a racionalização de energia, compreendendo ações e/ou medidas comportamentais, tecnológicas e econômicas, as quais, ao serem realizadas sobre sistemas e processos de conversão/produção, resultem em diminuição da demanda energética, sem prejuízo da quantidade ou da qualidade dos bens e serviços produzidos (GODOI, 2011).

Nesse contexto, no Brasil há diversos programas, que destinam esforços e recursos em prol da redução da demanda energética, tais como: Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), o PEE (Programa de Eficiência Energética), o Conpet (Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural) e o PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem). Há também a Lei de Eficiência Energética, nº 10.295/2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia.

Após análise detalhada do consumo de energia dentro da indústria de fundidos, fez-se o estudo por setor (iluminação, fusão, motores, bombas e exaustores), onde boas práticas de consumo foram indicadas tanto como inovações/melhorias que poderiam ser feitas, como exemplo a análise e substituição de luminárias na indústria, adoção de sistema de recuperação de calor, pré-aquecimento da carga, entre outras.

2. DESENVOLVIMENTO

O consumo de energia está relacionado à atividade econômica do país. É comum que o aumento do poder aquisitivo por parte da população implique numa

cadeia de consumo maior, logo seria uma relação direta o aumento do consumo de bens e serviços e o aumento no consumo de energia. Contudo em países desenvolvidos essa relação não é tão direta, Goldenberg (1997 *apud* Abreu; Oliveira; Guerra, 2010, p.13), mostra que nos países desenvolvidos, nas décadas de setenta e oitenta, foi possível prover os mesmos serviços energéticos, mas com uma menor entrada de energia, isso só foi possível devido às novas tecnologias disponíveis comercialmente, significando um desacoplamento entre o crescimento do PIB e o crescimento de energia nessas décadas.

Outro impacto significativo que há em um maior consumo de energia, quando em países sem tecnologias apropriadas, é uma maior emissão de gases do efeito estufa. A fim de reduzir essas emissões sem prejudicar o desenvolvimento econômico, a eficiência energética passa a ser uma possível solução. Um processo eficiente é aquele que produz um determinado bem com a menor quantidade de matéria prima, mantendo a qualidade dessa. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vem colaborando para a disseminação do tema com ações como:

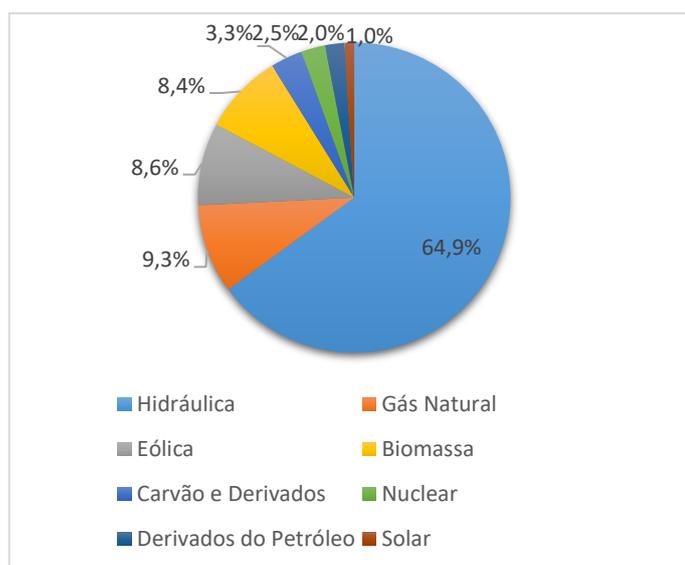
- Construção de uma base de dados sobre eficiência energética, o que inclui a identificação dos potenciais de eficiência energética bem como os custos associados aos mesmos;
- Elaboração de estratégias e portfólio de ações para incentivo ao aumento da eficiência energética no Brasil;
- Monitoramento do progresso de indicadores de eficiência energética em diversos setores, retroalimentando a análise de impacto de políticas voltadas à eficiência energética.

Como forma de difusão de práticas da eficiência energética, surgem na década de 80 programas de incentivo à eficiência energética.

2.1. Consumo de energia e panorama da eficiência energética

Como apresentado no Balanço Energético Nacional (Empresa de Pesquisa Energética, 2020), o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que responde por 64,9% da oferta interna.

Gráfico 1. Oferta interna de energia elétrica por fonte

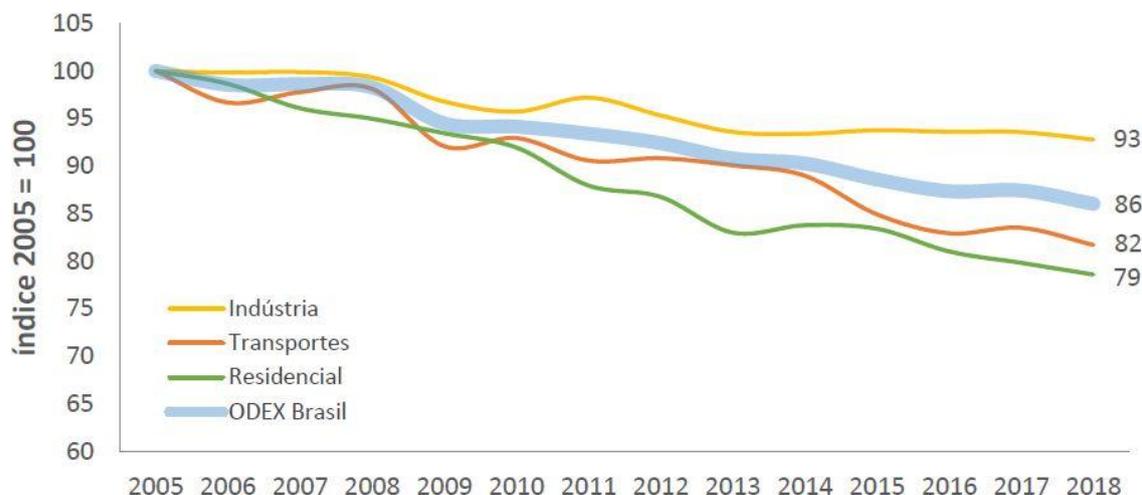


Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2020)

As fontes renováveis representam 83,0% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável. No lado do consumo, o maior consumidor de energia do país é o setor industrial, respondendo por 35,9% de todo o consumo final no ano de 2019 (Guerra *et al.*, 2020, p. 15), seguido pelo setor residencial com 26,1%. O setor industrial teve uma retração de -2,44% no consumo de energia elétrica em relação ao ano anterior, com maior destaque para os segmentos de ferro-ligas, aço e pelotas. Mesmo com essa retração ainda é o setor com maior demanda de energia elétrica no país (Empresa de Pesquisa Energética, 2020).

Visto como é o consumo de energia, é imprescindível investigar o panorama da eficiência energética nos diferentes setores da economia, na figura 1, é apresentado os resultados da ODEX para a economia brasileira. Para a análise foi fixado o ano de 2005 como base (100), onde o decréscimo no índice de consumo do valor 100 representa ganhos em eficiência energética, do contrário representa uma piora na eficiência. O período analisado (2005 a 2018) abrangeu os setores industrial, residencial, transportes, energético, serviços e agropecuária.

Figura 1. ODEX Brasil



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2020)

O país ficou mais eficiente energeticamente entre 2005 e 2018, cerca de 14%, de acordo com o ODEX apurado em 2018 (Empresa de Pesquisa Energética, 2020).

2.2. Sistema de Gestão de Energia (SGEn)

O sistema de gestão energética tem o propósito de permitir que as organizações estabeleçam sistemas e processos necessários para melhorar continuamente o desempenho energético, incluindo a eficiência energética, o uso da energia e o consumo da energia, sendo aplicável a qualquer organização (ABNT NBR ISO 50001). O guia de gestão de energia aponta os objetivos da norma ISO 50001, alguns desses objetivos são:

- Dar suporte às organizações para que estabeleçam usos e consumos mais adequados de energia.
- Criar uma comunicação fácil e transparente a respeito da gestão sobre recursos energéticos.
- Promover as melhores práticas de gestão energética e reforçar os ganhos com a aplicação da gestão da energia.
- Suportar a avaliação e priorização de implantação de novas tecnologias mais eficientes no uso da energia.
- Favorecer a melhoria da gestão da energia em conjunto a projetos de redução de gases de efeito estufa.

Uma das ferramentas de gestão, da ISO 50001 é o modelo PDCA (*plan-do-check-act*). A figura a seguir mostra as etapas do ciclo PDCA:

Figura 2. Ciclo PDCA



Fonte: FOSSA; SGARBI (2021)

Essas etapas consistem nos seguintes processos.

- **PLAN:** Etapa onde são estabelecidos os objetivos e processos necessários para fornecer resultados de acordo com os requisitos pré-determinados. Definidas as metas, deve-se definir os métodos para atingi-las (SEBRAE 2016 *apud* Nascimento, 2017).
- **DO (Fazer):** É nessa etapa que são implementados os planos de ação, controles de operação e manutenção, e comunicação, assegurar competências e considerar o desempenho energético no projeto e aquisição.
- **CHECK:** A norma descreve a etapa de checagem como tendo o objetivo de monitorar, medir, analisar, avaliar, auditar e realizar análise(s) crítica(s) pela direção do desempenho energético e do SGE
- **ACTION:** Por fim são adotadas as ações para tratar as não conformidades e melhorar continuamente o desempenho energético e o SGE.

2.3. Indicadores de Eficiência Energética

O conhecimento de indicadores de eficiência energética pode vir a contribuir na escolha da fonte de energia e tecnologia a ser utilizada, podendo também nortear políticas públicas de preservação ambiental, onde possam aliar questões ambientais e econômicas, promovendo assim o desenvolvimento sustentável (ABREU; OLIVEIRA; GUERRA, 2010). Segundo Abreu, 2010, os indicadores de eficiência energética podem ser divididos em quatro grupos mais influentes. Sendo esses:

- **Termodinâmico:** A eficiência energética por esse ponto de vista, tem seus indicadores baseados nos processos energéticos que envolvem conceitos como calor e trabalho, sendo medidos através de termos da termodinâmica, como Entropia, Entalpia e Exergia. Esses indicadores provêm de medidas para uma determinada função de estado de acordo com condições físicas de um processo, como temperatura e pressão.
- **Físico-termodinâmico:** Esses indicadores são chamados de híbridos, por considerarem medidas físicas e termodinâmicas para mensurar o consumo requerido em função do seu uso final. Podendo ser aplicados em diversos níveis de agregação das atividades econômicas: setorial, industrial ou a nível nacional. Devido a possibilidade de contabilizar o produto final em quantidades físicas, estes indicadores podem ser comparados e analisados em séries temporais
- **Econômico-termodinâmico:** Descrevem esse indicador como sendo indicadores que relacionam medidas usuais na indústria (medidas termodinâmicas) e a valoração deste insumo e/ou produto final, pois a energia a ser mensurada no sistema pode ser feita em unidades termodinâmicas convencionais e sua saída em valores monetários (Monteiro, 2013).
- **Econômico:** Esse indicador tem como característica principal a mensuração da energia de entrada e saída em valor monetário. Por ser uma categoria de indicadores puramente econômicos leva-se ao questionamento de ser ou não um indicador de eficiência energética (Monteiro, 2013).

2.4. A indústria de Fundição

De forma simples a fundição pode ser definida como o processo mais curto entre a matéria prima metálica e as peças acabadas, essa se dá por meio do derramamento de dado metal (ou liga metálica) líquida no interior de uma cavidade denominada molde cuja forma corresponde em negativa, à peça desejada (Arruda, 2018). As etapas que compõem os processos de fundição são as seguintes:

- **Confecção do Modelo:** O material utilizado para confecção do modelo depende do processo de moldagem a ser usado. O modelo deve ter ângulos favoráveis à saída do molde, caso contrário o molde se quebra durante a confecção. (ANDRADE, 2016).
- **Macharia:** O macho é um dispositivo, também feito de refratário, que tem a finalidade de formar os vazios, furos e reentrâncias da peça. São colocados nos moldes antes que eles sejam fechados para receber o metal líquido (FIEMG, 2009).
- **Fusão:** Como o princípio da fundição é a transformação do estado dos metais e suas ligas, de sólido para líquido, um importante processo é a da definição do tipo de forno a ser utilizado, os fornos de fundição são construídos de diferentes formas e desenhos, sendo, em geral, divididos de acordo com a fonte de energia utilizada (eletricidade ou combustível) e pelo modo de operação (cadinho, reverbero, de cuba, etc.).]
- **Vazamento:** Painéis de vazamento já preparadas e pré-aquecidas recebem o metal líquido em seu interior para o transporte do mesmo até a área de vazamento, onde os moldes serão vazados. O vazamento pode ser sob pressão, a vácuo, por centrifugação ou por gravidade (FIEMG, 2009).
- **Desmoldagem:** A etapa de desmoldagem é de grande importância, visto que com o controle correto da temperatura é possível evitar o choque térmico e consequentes trincas na peça, a desmoldagem constitui-se na operação de retirada da peça sólida de dentro do molde. Atualmente, existem processos capazes de recuperar 98% da areia, que é então utilizada em novos moldes. (CASSOTI; FILHO; CASTRO, 2011)
- **Rebarbação e Limpeza:** Constitui-se da etapa final do processo de fundição, após o corte dos canais e massalotes, essas áreas precisam de acabamento

superficial, sendo necessária a retirada de incrustações de areia do molde na peça fundida, rebarbas indesejáveis. Essa limpeza é feita, em geral, com jatos abrasivos (CASSOTI; FILHO; CASTRO, 2011).

3. METODOLOGIA

Este trabalho baseia-se em uma investigação através de diversas bibliografias, sobre o funcionamento e possíveis melhorias na indústria de fundição.

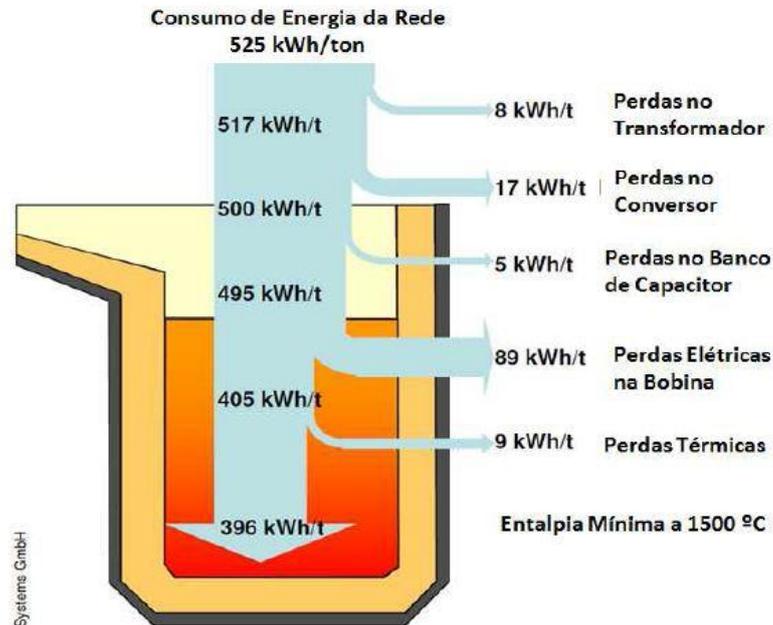
3.1. Auditoria Energética- Implementação do SGen

A promoção da eficiência energética passa necessariamente por uma mínima estrutura gerencial, que dependerá do porte e abrangência que a empresa visa em relação aos seus fluxos energéticos, como foi observado na figura 5, do Ciclo PDCA. Esta abordagem é válida para instalações novas, em caráter preventivo, ou instalações existentes, em caráter corretivo (ELEKTRO,2012, p. 58). Pesquisas mostraram que indústrias que adotam práticas de gestão de energia podem economizar até 40% do seu consumo total (BACKLUND *et al.*, 2012, *apud* ANDRADE, 2016).

3.2. Fusão

A etapa que tem maior consumo de energia na indústria é o da fusão, sendo um setor que deve ser estudado detalhadamente a fim de otimizar seus processos. Nessa etapa, é estudado as perdas oriundas do forno de fundição, no caso deste estudo o forno de indução a cadinho. O diagrama de Sankey, apresenta um resumo dos tipos de perdas que ocorrem em um forno de indução a cadinho.

Figura 3. Diagrama de Sankey Forno de indução Cadinho



Fonte: Adaptado de Hermann e Kroes (2010) *apud* Andrade (2016)

3.2.1. Transformador:

As perdas nesse equipamento são classificadas em perdas no núcleo ou perdas nos enrolamentos. Esse primeiro tipo de perdas, são devido às características magnéticas do material empregado (chapas de ferro silício), e se caracterizam por praticamente não variarem com a carga solicitada do transformador. A forma de diminuir esse tipo de perda, é desligando o transformador quando ele não estiver alimentando nenhuma carga (Copel, 2005), ou diminuindo a densidade de fluxo magnético no ferro da máquina, aumentando o volume do ferro. As perdas nos enrolamentos são chamadas de perdas ôhmicas ou perdas joule, que se caracterizam por variar com a resistência do condutor e com o quadrado da corrente elétrica que por ele circula. Ao solicitar menos potência da rede, devido a medidas de conservação de energia, exige-se menos potência e por conseqüentemente, menor corrente de carga a ser suprida pelo transformador. Outro fator que auxilia na diminuição das perdas é a elevação do fator de potência com o qual o conjunto das cargas alimentadas pelo transformador opera (PROCEL, 2014).

3.2.2. Conversor

Uma possibilidade para melhoria no sistema conversor é a utilização da comutação de frequência. Schmitz; Trauzeddel, 2014, afirmam que a tecnologia de forno de média frequência otimizada mantém as perdas térmicas e elétricas mínimas, o uso da tecnologia de comutação de média frequência (150 Hz a 1500 Hz) ao invés da frequência da rede (50 ou 60 Hz), torna possível operar o forno sem o conhecido “pé de banho”, gerando uma economia de 8% na operação (SCHMITZ; TRAUZEDDEL, 2014).

3.2.3. Bobina

Há dois tipos de perdas nas bobinas indutoras do forno: Perdas térmicas e elétricas. Para reduzir essas perdas, são feitas algumas recomendações:

- Utilizar um indutor feito de material de baixa resistividade e limitar sua temperatura com o uso de sistemas de refrigeração da bobina;
- Reduzir ao máximo a distância entre a carga metálica e a bobina, fazendo o refratário o mais fino possível;
- Manter o nível da carga ao nível da espira superior da bobina, utilizando todo o comprimento do indutor;
- Para reduzir as perdas devido à transmissão de calor da carga aquecida, deve-se melhorar o isolamento térmico entre o indutor e a carga metálica, evitando aumentar a espessura do revestimento refratário e isolante para não reduzir o rendimento do forno.
- Melhoria no isolamento térmico do cadinho

3.2.4. Perdas Térmicas

A diminuição da espessura do refratário melhora a eficiência da bobina e aumenta a entrada de energia, mas acarreta em maiores perdas térmicas através da parede do cadinho, que passa a ser mais fina. Uma vez que as perdas da bobina excedem as perdas térmicas através da parede do cadinho quase 10 vezes mais, as perdas da bobina continuam a ser a influência dominante aqui. Para comprovar isso, Schmitz; Trauzeddel, 2014, apresentam um estudo para avaliar o ganho em eficiência da bobina, em uma situação onde a parede do refratário foi diminuída de 30mm

(espessura inicial de 125mm), essa mudança culminou em ganho de eficiência da bobina de 3%.

Algumas tecnologias a serem empregadas que auxiliam na eficiência energética da indústria são:

- **Sistema de aquecedores e pré-aquecedores:** O sistema de pré-aquecimento, utiliza os gases quentes liberados após o derretimento completo da carga, para aquecimento da sucata ou matéria-prima, retirando a umidade presente nela (Gandhewar; Bansod; Borade, 2011, p.9). A utilização de pré-aquecedores tem como grande vantagem a diminuição da energia despendida para a fusão do material. Como apresentado por Canadá 2013, o gás de escape pré-aquece a sucata a uma temperatura na faixa de 450 °C a 600°C, esse gás que está com alta temperatura pode ser usado para pré-aquecer sucata para a segunda carga de calor ou a primeira carga do próximo aquecimento, reduzindo assim a energia de fusão (em até 50-75 kWh por tonelada), ainda, o pré-aquecimento reduz as necessidades de energia elétrica de 30 a 60 kWh/t e o tempo de inicialização de 5 a 15%.
- **Sistema de Recuperação de calor:** Este sistema baseia-se na produção de duas formas de energia, ao mesmo tempo, no caso da indústria de fundição, utilizando o calor residual. A indústria de fundição, em geral, possui muito desperdício de energia térmica (temperatura de trabalho do metal, em torno de 1500 °C), fazendo com que diferentes formas de reaproveitamento do calor tenham surgido nos últimos anos (BCS, 2005 *apud* Andrade, 2016). Vale, 2018, lista os sistemas de recuperação mais utilizados para indústrias para diferentes temperaturas, para temperaturas de trabalho superiores a 870 °C (que é o caso do forno de indução), têm-se as seguintes tecnologias:
 - Regenerador Cerâmico
 - Caldeira de condensação
 - Queimador regenerativo
 - Recuperador radiante
 - Pré-aquecimento da carga

3.3. Iluminação

Para melhorar o desempenho energético da iluminação na indústria bem como diminuir os custos da mesma, algumas atitudes podem ser tomadas, segundo Fayomi (2021), Kermeli (2016) como:

- Desligar as luzes em áreas desocupadas.
- Aproveitamento da iluminação natural e aumentar os níveis dessa, pode reduzir em até 100% a utilização de iluminação artificial durante o dia.
- Usar sensores de presença e outros controles de iluminação, como a dimerização. As lâmpadas podem ser desligadas durante as horas sem trabalho por controles automáticos.
- Utilização de lâmpadas novas e mais eficientes.
- Substituir reatores magnéticos por reatores eletrônicos. Reatores eletrônicos exigem 12 a 30% menos energia do que os magnéticos.

3.4. Ar Comprimido

Algumas dessas boas práticas são apresentadas por CANADÁ (2003), KERMELI (2016) e Noro, Lazzarin (2016), para melhoria nos processos de ar comprimido, sendo:

- Analisar a demanda e adequar a capacidade à demanda;
- Manutenção do sistema
- Monitoramento
- Controle de eventos de pico de demanda;
- Correção de aplicações inadequadas e desperdício no uso de ar comprimido;
- Identificação e correção de vazamentos;
- Controlar e gerenciar todo o sistema;
- Otimizando o programa de manutenção;
- Sensibilizar os usuários para as práticas corretas e oportunidades de economia;

3.5. Motores

Alguns autores descrevem algumas outras ações de eficiência energética para motores, sendo eles, Kermerli (2016), Elektro (2012) e ELETROBRAS, (2016):

- Utilização de programas computacionais para análise dos motores.
- Na aquisição de um novo motor, dar preferência ao motor com selo Procel. Especificar o motor com potência adequada, verificando se suas características são adequadas às condições do ambiente onde está instalado (temperatura, atmosfera corrosiva etc.). Instalar motor com ventilação adequada e em ambientes adequados.
- Selecione motores de tamanho adequado. Substituir motores superdimensionados por motores de tamanho adequado economiza na indústria, em média, 1,2% do consumo total de eletricidade do sistema motorizado.
- Evitar rebobinagens: Motores rebobinados possuem perdas típicas de quase 2% na eficiência a cada retrocesso
- Evitar o uso de acoplamentos com redutores e correias (podem introduzir perdas de até 30%);
- Atentar para o fator de potência.

3.6. Bombas e exaustores

Alguns dos principais itens que compõem o potencial de conservação de energia no bombeamento e na exaustão, de acordo com Eletrobrás (2016), COPEL (2005), são:

- O mau dimensionado ou com excesso de curvas é responsável por perdas de energia.
- Verificar se a bomba está operando no regime para o qual ela foi projetada (permanente/intermitente horas de operação/dia etc.).
- Seguir as recomendações do fabricante quanto à manutenção preditiva e preventiva, bem como em relação ao programa de substituição e acompanhamento de itens.
- Verifique se o rotor da bomba está balanceado.
- Selecionar o sistema de exaustão de melhor rendimento.

- Não exagerar na definição da margem de segurança dos exaustores, uma vez que o sobredimensionamento é uma das maiores causas de consumo de energia em excesso nessas máquinas.
- Utilização de dois ou três ventiladores operando em paralelo, para atender às variações da instalação.
- Verificar se o ângulo das pás do ventilador é o correto, caso negativo, acionar a manutenção.
- Verificar o ponto de operação do ventilador, comparando-o com o ponto de máxima eficiência fornecido pelo fabricante.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A inobservância de fatores técnicos, econômicos e até comportamentais, que contribuam para a eficiência energética de um processo, geram um ciclo vicioso de perdas e ineficiência. A indústria brasileira, embora seja a maior consumidora de energia no país, é também a que menos contribui ao longo dos anos para práticas eficientes. Conforme as investigações realizadas neste trabalho, acerca das possíveis ações de EE, foi verificado que alguns destes processos facilmente podem ser eficientizados, pois muitas das práticas estão vinculadas a operação de equipamentos, a escolhas mais adequada de equipamentos e ao controle e dimensionamentos corretos desses.

A bibliografia aponta que a partir da implantação de um sistema de auditoria energética seria possível uma redução do consumo de energia, na indústria com um todo, de até 40%. Na etapa de fusão a diminuição do consumo de energia poderia chegar a 56% de consumo total, os ganhos estão vinculados diretamente com a diminuição das perdas energéticas nas bobinas do forno no material refratário e no conversor.

Já nas outras etapas, como iluminação, deve-se atentar para o correto dimensionamento e escolha das luminárias. Nos sistemas de Ar-comprimido foi visualizado que há grandes perdas na utilização do sistema, cerca de 65%, então medidas como adequação da capacidade à demanda, controle de eventos, correção de aplicações inadequadas visando a diminuição do desperdício, foram vistas como medidas a serem tomadas a fim de aumentar a eficiência nesse processo.

Quanto aos motores, a principal medida a ser tomada está vinculada ao dimensionamento desses, pois os autores apontam ser uma prática normal seu superdimensionamento. Por fim, boas práticas na utilização de bombas e exaustores, requerem não somente o correto dimensionamento como nos casos dos motores, mas também constantes acompanhamento das condições dos equipamentos, manutenções preventivas e preditivas, sendo essas aplicações de gestão de energia, bastante simples, mas com resultados significativos ao longo do tempo.

Referências

- ABREU, Y. V.; OLIVEIRA, M. A. G.; GUERRA, S. M. G. **Energia Sociedade e Meio Ambiente**. Eumed.net, p. 175, Universidade de Málaga, Málaga, 2010.
- ANDRADE, Márcio Galon de; **eficiência energética em fundições: uma revisão Bibliográfica e um estudo de caso para uma fundição Brasileira**. Orientador: Luciano Lopes Pfischer. 2016. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Energia, Universidade Federal De Santa Catarina (UFSC), Araranguá, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 50001: Sistemas de gestão da energia** — Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro. 2018.
- BRASIL. Alexandre Vidigal De Oliveira. Ministério de Minas e Energia. **Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico - 2020: Siderurgia, Ferro-gusa, Ferroligas, Metais não ferrosos, Fundição**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2020, p. 74.
- CANADÁ. Cipec. Canadian Foundry Association (Org.)= Associação Canadense de fundição. **Guide to Energy Efficiency Opportunities in Canadian Foundries** = Guia de oportunidades de eficiência energética em fundições canadenses. Ottawa: Canadian Foundry Association, 2003. 143 p.
- CASOTTI, Bruna Pretti; FILHO, Egmar Del; CASTRO, Paulo Castor de. **Indústria de fundição: situação atual e perspectivas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.33, p. 121-162, mar. 2011. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>. Acesso em: 20 de jun. 2021.
- COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA – COPEL. **Manual de eficiência energética na indústria**. Curitiba, 2005.
- ELEKTRO (São Paulo). Excen (Org.). **Eficiência energética: fundamentos e aplicações**. Campinas: Fupai, Universidade Federal de Itajubá, 2012. 314 p.
- ELETROBRAS. **Dicas de Economia de Energia por Setor de Consumo**, Superintendência de Eficiência Energética – PF, 2016.
- FAYOMI, O. S. I., *et al.*, **A Review of Energy Consumption in Foundry Industry**= Uma revisão do consumo de energia na indústria de fundição, 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 665 012024. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/665/1/012024>. Acesso em: 13 de mai. de 2021.
- FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS (FIEMG). **Guia de boas práticas do setor de fundição**, 2018. Disponível em: <http://www.sifumg.com.br/wp-content/uploads/2016/02/cartilha-de-undicao.pdf>;. Acesso em: 03 de mai. de 2021.
- GODOI, José Maria Alves. **Eficiência energética industrial: um modelo de governança de energia para a indústria sob requisitos de sustentabilidade**.

Orientador: Silvio de Oliveira Junior. 2011. 127 f. Dissertação de mestrado - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

GANDHEWAR, Vivek R.; BANSOD, Satish V., BORADE , Atul B.. **Induction Furnace - A Review** = Forno de indução - Uma revisão. International Journal of Engineering and Technology=Jornal Internacional de Engenharia e Tecnologia. Vol.3 (4), 2011, Disponível em: < <https://www.enggjournals.com/ijet/docs/IJET11-03-04-06.pdf>> Acesso em: 27 de jun. de 2021.

KERMELI, Katerina *et al.*, **Energy Efficiency and Cost Saving Opportunities for Metal Casting: An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers**. United States: U.s. Environmental Protection Agency= Estados Unidos: E.U. Agência de proteção ambiental. 2016. 128 p.

MACHADO, Giovani Vitória, *et al.* **Atlas da Eficiência Energética: Relatório de Indicadores, 2019**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Estudos Econômicos - Energéticos e Ambientais. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil-2019>. Acesso em: 10 de jun. de 2021.

MONTEIRO, Luciane P. C. **Uso de Indicadores de Eficiência Energética em plantas de produção de amônia**. ENGEVISTA, v. 15, p. 261-269, 2013.

NASCIMENTO, Paola Gabriela. **Eficiência energética na indústria: estudo de caso em uma Empresa metalúrgica**. Orientador: Martin Cruz Rodriguez Paz. 2017. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Energia, Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Bagé, 2017.

SCHMITZ, W; TRAUZEDDEL, D. **The Melting, Holding and Pouring Process - Energy and Process - Related Aspects** = O Processo de Derretimento, Retenção e Derramamento - Energia e Processo - Aspectos Relacionados. In: World Foundry Congress, 71, 2014, Bilbao. Proceedings. United Kingdom: World Foundry Organization Ltd, 2014. v. 2, p. 642- 653.