

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - CAMPUS  
ARARANGUÁ**

**MÁRCIO GALON DE ANDRADE**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA**

**ARARANGUÁ**

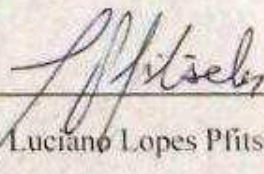
**2016**

MÁRCIO GALON DE ANDRADE

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA

Trabalho de conclusão de curso na modalidade de artigo científico para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Araranguá

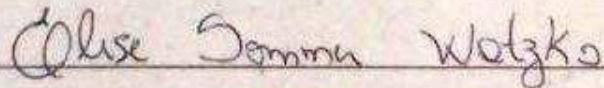
Aprovado em: 02/12/2016



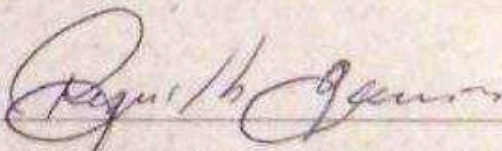
Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher (Orientador)



Prof. Dr. César Cataldo Scharlau (Examinador)



Prof. Profa. Dra. Elise Sommer (Examinador)



Prof. Dr. Reginaldo Geremias (Supervisor)

# **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FUNDIÇÕES: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E UM ESTUDO DE CASO PARA UMA FUNDIÇÃO BRASILEIRA**

**Márcio Galon De Andrade\***

## **RESUMO**

A eficiência energética vem assumindo cada vez mais importância no setor comercial e industrial, motivada pela redução de custos decorrentes do mercado competitivo, pela incerteza da disponibilidade de energia ou por restrições ambientais. O presente trabalho, através de uma revisão bibliográfica, tem por objetivo principal indicar ações de eficiência energética para um setor que possui elevados custos e demandas por energia: as fundições; em especial aquelas que utilizam fornos a indução. Como o tema possui poucos estudos no Brasil, foi feita uma análise do consumo de energia em cada setor de uma fundição, indicando a fusão como principal área consumidora de energia. As ações propostas foram principalmente focadas neste setor, posteriormente apresentando ações para as demais áreas. As possibilidades de eficiência energética encontradas podem impactar significativamente no consumo de energia em uma fundição. Para demonstrar este impacto, um estudo de caso é apresentado. Pode-se concluir que muitas ações no setor de fundição apresentam tempo de retorno de investimento curto (menos de dois anos) quando comparados a outros setores da indústria. Além disso, algumas ações necessitam de baixo ou nenhum investimento, apenas de ações de conscientização.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Fundições. Economia.

## **1 INTRODUÇÃO**

Energia é um fator de custo muito significativo na indústria de ferro e aço. Porém, muitas indústrias não fazem sequer um gerenciamento deste insumo. O uso da

---

\* Graduando do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas, Araranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP 88900-000. E-mail: marciogla@hotmail.com

eficiência energética é uma forma importante de reduzir esses custos e aumentar ganhos previsíveis, especialmente em períodos de alta volatilidade dos preços de energia. Segundo Kermeli (2016), existe uma gama diversificada de oportunidades disponíveis em plantas individuais de ferro e aço, para reduzir o consumo e energia.

O presente trabalho irá apresentar uma revisão bibliográfica sobre eficiência energética em fundições, com foco principal naquelas que produzem ferro fundido a partir de fornos a indução eletromagnética.

Serão apresentadas algumas ações para a redução do consumo de energia na indústria metalúrgica. Para demonstrar os possíveis impactos da eficiência energética destas ações, um estudo de caso será elaborado baseando-se em pesquisas, simulações e projetos implantados pelo autor.

O objetivo é agregar as informações disponíveis na literatura internacional e nos *cases* de sucesso nacional à indústria fundidora brasileira.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Nesta seção será feita uma revisão bibliográfica sobre o tema eficiência energética em fundições. Inicialmente será apresentado o panorama atual da eficiência energética no Brasil e no Mundo. Após, será apresentado um panorama da indústria de fundição e os principais processos de fundição. Indicadores energéticos serão abordados no final desta seção com intuito de apresentar maneiras de avaliação do consumo de energia em fundições.

### **2.1 Panorama mundial e brasileiro de eficiência energética**

Segundo recente relatório da Agência Internacional de Energia - IEA (2016), os progressos realizados por políticas de eficiência energética no mundo durante o ano de 2015 conduziram a resultados expressivos, principalmente em países emergentes e na China. Tais resultados ocorreram devido à eficiência energética ser grande responsável pela transição energética sustentável e pela política de mudança climática (IEA, 2016).

Os níveis de eficiência energética nos países membros do IEA (mesmos membros da OCDE- Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) melhoraram, em média, 14% entre 2000 e 2015. Essa melhora gerou uma economia de energia de 450 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) em 2015, o

suficiente para abastecer o Japão durante um ano inteiro. A economia ocorreu principalmente devido a melhoria em edifícios e na indústria. Enquanto o PIB cresceu 2% nos países da IEA, as melhorias em eficiência energética levaram à estabilização do crescimento da demanda e do consumo de energia primária (IEA, 2016).

A intensidade energética (quantidade de energia utilizada por unidade de PIB) melhorou em 1,8% no ano de 2015, demonstrando que a economia global precisa de menos energia para crescer. É possível visualizar na Figura 1 que este valor superou o registro de 2014 de 1,5% registrado em 2014, e foi o triplo da taxa média de melhoria observada entre 2003 e 2013 de 0,6% (IEA, 2016).

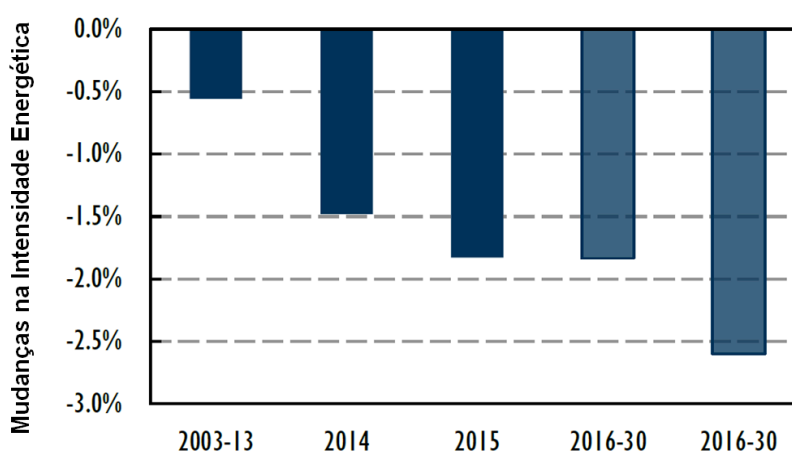


Figura 1 - Alterações na intensidade energética mundial de 2003 até 2030 (Fonte: adaptado de IEA, 2016)

A intensidade energética é calculada como milhões de TPES (Oferta Total de Energia Primária, do inglês *Total Primary Energy Supply*) por 2.010 bilhões de dólares do PIB, a taxas de câmbio de mercado (IEA, 2016).

Ainda segundo IEA (2016), essas melhorias na intensidade energética foram alcançadas mesmo com os preços do petróleo bruto diminuindo significativamente em 2015. Este é um indicador precoce, mas positivo, de que os ganhos em intensidade energética não são movidos apenas pelos preços de energia.

Na China, a intensidade energética melhorou 5,6%, ultrapassando a taxa anual de 3,1% da década anterior, mesmo que sua economia tenha crescido apenas 6,9% (Figura 2). Estes valores, foram consequências de políticas públicas do governo na condução da eficiência energética (IEA, 2016).



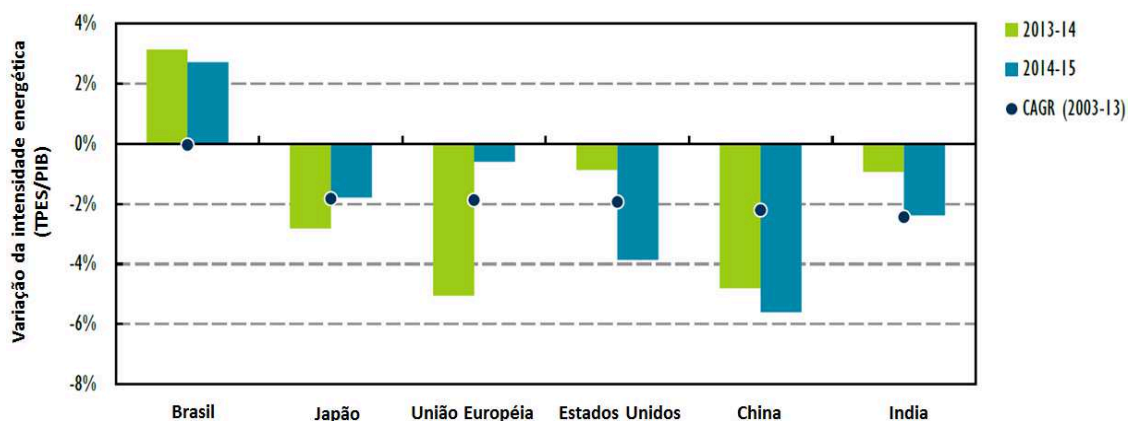


Figura 2 - Alterações na intensidade da energia primária para países selecionados. CAGR é a taxa composta da variação anual entre 2003 e 2013 (Fonte: adaptado de IEA, 2016)

Como resultado da contração econômica no Brasil, o TPES caiu 1,2% em 2015, mas o PIB caiu 3,8%, levando a um agravamento da intensidade energética. Da mesma forma, o TPES brasileiro cresceu 3,2% em 2014, enquanto o PIB cresceu 0,1%. Esses valores são consequência da indústria brasileira possuir uma parcela de consumo fixo de energia muito grande, ou seja, o consumo de energia é similar produzindo em pequena ou grande quantidade. Um fator preponderante são as políticas públicas de eficiência energética e de conscientização (IEA, 2016).

O Brasil não é membro da OCDE, consequentemente também não é membro da IEA, porém participa do Programa de *Enhanced Engagement* (engajamento ampliado) que lhe permite participar de Comitês da Organização (BRASIL, 2016<sup>b</sup>).

## 2.2 A indústria de fundição brasileira

A indústria de fundição é um segmento da economia caracterizado pela produção de bens intermediários (produzidos e utilizados na produção de outros bens, não disponíveis para consumo final), que são fornecidos para empresas de diversos segmentos. Destacam-se entre eles as indústrias: automobilística, de construção ferroviária e naval, de bens de capital (exemplo: implementos agrícolas) e de base, como a siderúrgica (lingotes e cilindros). Outros demandantes importantes de materiais fundidos são o setor de mineração, fabricação de cimento e extração/refino de petróleo (SIMÕES; BAJAY, 2010).

A indústria brasileira de fundição, 7º parque produtor no mundo, produziu em 2015 cerca de 2,73 milhões de toneladas de peças. Na Figura 3 é possível visualizar o percentual das toneladas produzidas para o mercado interno e externo (ABIFA, 2016).

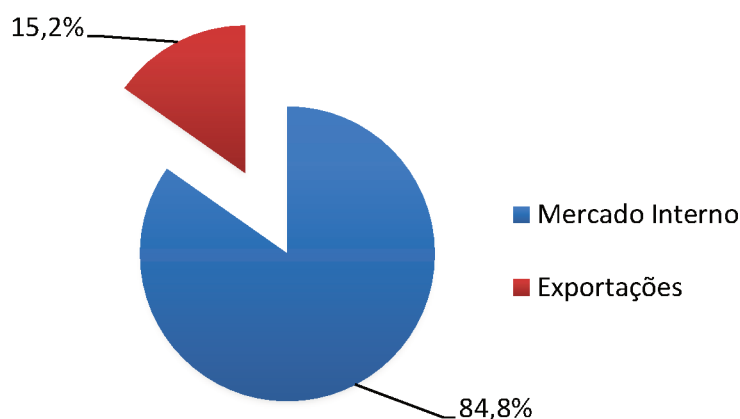


Figura 3 - Percentual de importações e exportações (Fonte: adaptado de ABIFA, 2016)

Dados estatísticos de 2008 revelam que, no Brasil, o principal destino dos produtos fundidos são as indústrias montadoras de veículos e de autopeças, seguida pelo setor de bens de capital e infraestrutura.

A produção da indústria de fundição, quanto ao cliente atendido, é denominada independente (produtos seriados) ou cativa (feita para atender a um cliente determinado) (SIMÕES; BAJAY, 2010).

A indústria de fundição é caracterizada pela utilização intensiva de mão de obra, que representa aproximadamente 35% do custo total de produção e o segmento é representado por, aproximadamente, 1,4 mil empresas no Brasil. Dessas empresas, 94% são de pequeno e médio porte, e 6% de grande porte (BRASIL, 2009).

### 2.3 Processos de fundição

O processo de fundição é baseado no princípio de Arquimedes: “o líquido toma a forma do vaso que o contém”. A definição de fundição é a conformação do metal em estado líquido, vertendo dentro do molde, para após a solidificação obter a peça moldada (CARNIN, 2008; TOLEDO, 2006).

O processo utilizado pela indústria de fundição, em sua essência, consiste na fusão de ferro, aço ou metais não-ferrosos, como cobre, zinco, alumínio e magnésio, visando obter certas propriedades para o produto final. Quando líquidos, metais e suas ligas são vazados no interior de moldes confeccionados com areias especiais, aglomeradas com resinas próprias para este fim, em formatos que irão reproduzir o

objeto pretendido, seja ele simples ou complexo (SIMÕES; BAJAY, 2010; JANSEN, 2013).

Muitas técnicas podem ser usadas em fundições. A escolha de qual técnica será utilizada depende do tamanho, quantidade, complexidade de peça e qualidade superficial desejada para o produto acabado (SHEUNEMANN, 2005)

De acordo com Jansen (2013), as operações para produzir uma peça fundida podem ser resumidas em:

- Confeção 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.
- Confeção do molde: O molde determina as dimensões externas da peça. A principal diferença entre os processos de fundição está na forma de como se obtém o molde.
- Confeção dos machos (macharia): O macho é usado quando a peça necessita de furos ou canais; nesse caso o molde é projetado com locais para os machos. Normalmente são confeccionados em material refratário e montados dentro do molde.
- Fusão e vazamento: É na fusão que se obtém o metal líquido, através do derretimento de um metal sólido para então ser vazado nos moldes. O vazamento pode ser sob pressão, a vácuo, por centrifugação ou por gravidade.
- Desmoldagem: Local ou momento em que o metal solidificado é retirado do molde, dando origem à peça.
- Quebra de canal e limpeza: Etapa final do processo de fundição, quando se dá o acabamento final na peça, retirando as rebarbas indesejáveis.

A Figura 4 apresenta as etapas do processo de fundição de ferro; as regiões internas aos contornos coloridos indicam cada área de uma fundição.



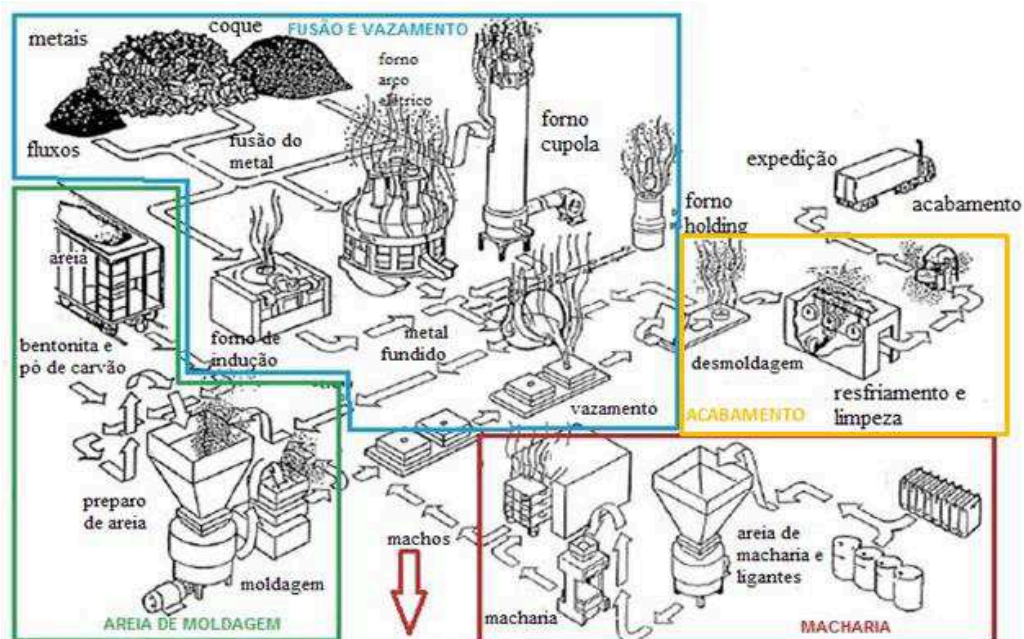


Figura 4 - Etapas do processo de fundição (Fonte: adaptado de Jansen, 2013)

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).

## 2.4 Energia na indústria de fundição

As modificações que ocorreram nos processos e equipamentos, e o 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 (SIMÕES; BAJAY, 2010).

A participação do setor metalúrgico<sup>1</sup> no consumo final energético teve crescimento acentuado ao longo do período de 1970 até 2014, alcançando no final do ano de 2014, 21,6% do consumo do setor industrial e 9,5% do consumo total de energia do país (BRASIL, 2015).

Já a participação da metalurgia no consumo de energia elétrica da indústria foi de 26,3% em 2014, e 12,2% em 2015 no país (BRASIL, 2015).

<sup>1</sup> Produção de Ferro-Gusa e Ferroligas; Siderurgia; Produção de tubos de Aço, exceto sem costura; Metalurgia dos Metais Não Ferrosos; e Fundição.

No que diz respeito à fundição, os insumos demandados são apresentados na Tabela 1. A energia elétrica é o principal insumo e, com a modernização do segmento, acarretou em aumento da demanda. De acordo com Brasil (2012), o consumo de energia elétrica representa cerca de 52% do consumo final de energia. Um exemplo, nesse contexto, é o crescente processo de substituição de fornos cubilô, utilizados na fusão de ferro, aço e suas ligas, por fornos de indução. Esse processo é necessário para atender o aumento de qualidade de peças e redução de emissões de gases poluidores (SIMÕES; BAJAY, 2010).

Tabela 1 – Insumos energéticos das principais matérias-primas demandadas pelas fundições no Brasil (Fonte: adaptado de Brasil, 2015)

<b>Itens</b>	<b>Unidade</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>
Coque	t	217.799	223.727	191.359
Energia Elétrica	10 <sup>3</sup> kWh	3.178.159	3.278.833	2.804.465
Óleo Combustível	t	104.992	105.618	103.571
Óleo Diesel	t	16.137	16.648	16.325
Alumínio	t	260.877	264.800	259.667
Gusa	t	1.400.194	1.438.320	1.410.441
Sucata	t	930.042	961.699	943.059

Com relação ao potencial de eficiência energética nas indústrias de fundições, Simões e Bajay (2010) apresentam o resultado de uma metodologia baseada na diferença entre o consumo médio e mínimo de energia elétrica e térmica.

Os potenciais técnicos de conservação de energia térmica ocorrem no aquecimento direto via fornos - 50.586 TEP (tonelada equivalente de petróleo) e, no vapor de processo - 6.742 TEP. No caso de energia elétrica, o único potencial de conservação considerado foi a força motriz, com 65.881 TEP. A soma destes potenciais representaria aproximadamente 0,3% na matriz elétrica brasileira (SIMÕES; BAJAY, 2010).

Conforme apresentado na seção 2.3, o consumo de energia também pode ser dividido em processos, setores ou equipamentos. O percentual de consumo varia de acordo com o tamanho da fundição, o tipo de processo, tipo de forno, automatização, taxa de produção, eficiência energética, entre outras condições. Na Tabela 2 são apresentados os resultados para algumas dessas condições.

Tabela 2 – Consumo de energia de acordo com tamanho da fundição (Indução) (Fonte: adaptado de Patange et al., 2016; Canadá, 2003; e ETSU, 2000)

<b>Departamento</b>	<b>Consumo de acordo com tamanho da fundição (%)</b>			
	Pequenas	Médias*	Grandes	Ideal
Fusão	72	78	64	59
Iluminação	07	1	3	6
Compressor de ar	08	3	3	5
Motores	-	11	-	12
Bombas e Exaustores	-	-	-	6
Acabamento	-	-	4	-
Diversos	13	7	8	12
<b>Total</b>	100	100	100	97**

\* Valores obtidos pelo próprio autor

\*\* Variações devido a influências diversas

Para fundições que utilizam fornos de indução (proposta deste estudo), a quantidade de energia necessária para fundir o material é mais baixa quando comparada aos demais tipos de fornos, devido à eficiência de fusão, conforme Figura 5. Porém, o consumo de energia elétrica é maior e isto se torna um problema quando o custo deste insumo é elevado, comparado aos demais. A faixa em verde representa a entalpia necessária para fundir o metal a 1500°C (necessidade de 396kWh/t) (HERMANN; KROES, 2010; JAMISON et al., 2015).

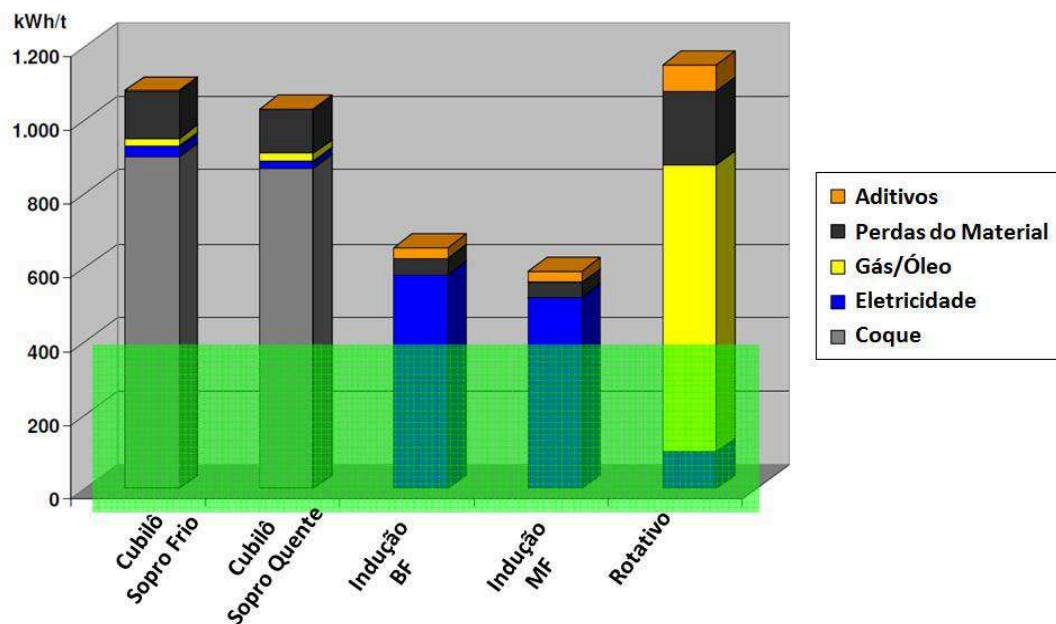


Figura 5 - Energia necessária para fundir ferro a 1500 °C para diferentes tipos de fornos (Fonte: Jamison et al., 2015)

## 2.5 Indicadores de energia em fundições

Com um sistema de gestão de energia, são utilizados Indicadores de Eficiência Energética (IEE) para acompanhar índices de produção e relacioná-los com consumo de energia, também conhecidos como KPIs (*Key performance indicators*) (RIEXINGER et al., 2015).

Segundo IEA (2016) nos diversos setores da economia, indicadores de energia diferenciados são empregados para cada segmento. Porém, a maioria utiliza consumo de energia por produção de determinado material. Em termos energéticos, eficiência é quantidade de energia utilizada por unidade de atividade. Alguns exemplos de indicadores:

- Residencial: Iluminação – Energia de iluminação/m<sup>2</sup>; Água quente: Energia para aquecimento de água/habitantes;
- Transporte: Energia consumida/quilômetro percorrido;
- Manufatura: Energia consumida/produto de valor.

Para fundições com características indicadas na introdução deste trabalho existem três principais indicadores energéticos: i) energia consumida (kWh ou GJ) por metal líquido fundido (ton) – na etapa de fornos; ii) energia consumida (kWh ou GJ) por metal líquido vazado (ton) – na etapa de vazamento; e, iii) energia consumida (kWh ou

GJ) por peças aprovadas (ton) – na etapa de acabamento (pós jateamento e tratamento térmico) (ARJUNWADKAR; RANSING; RANSING, 2015).

Os valores destes indicadores variam bastante, dependendo do tipo de processo, de forno e de insumo energético. Conforme descrito anteriormente, os valores apresentados serão para produção de ferro fundido. Conforme Comissão Européia (2005), para fundições pesquisadas na Europa em fornos cúbicos (uso de carvão mineral), o indicador kWh/ton é encontrado na faixa de 950 – 1200 kWh/ton. Para fornos a arco elétrico, os valores são de 500 - 600 kWh/ton. Já conforme Schifo e Radia (2004), para fundições americanas, os valores encontrados para fornos cúbicos foram de 1002,5 - 1124,5 kWh/ton e para fornos a arco elétrico os valores são de 530 – 600kWh/ton. Os valores para fornos a indução eletromagnética estão apresentados na Figura 6.

No Brasil, são poucos os dados de indicadores energéticos de fundição. Uma pesquisa aprofundada neste tema é desconhecida na literatura. Segundo Heinen (2015), uma fundição brasileira, após desenvolver uma máquina de quebra canais<sup>2</sup>, atingiu um valor em torno de 610kWh/ton. Outras fundições que também instalaram o sistema alcançaram uma redução de aproximadamente 12% no consumo de energia. Estes ganhos são devido a um aumento da densidade de carga.

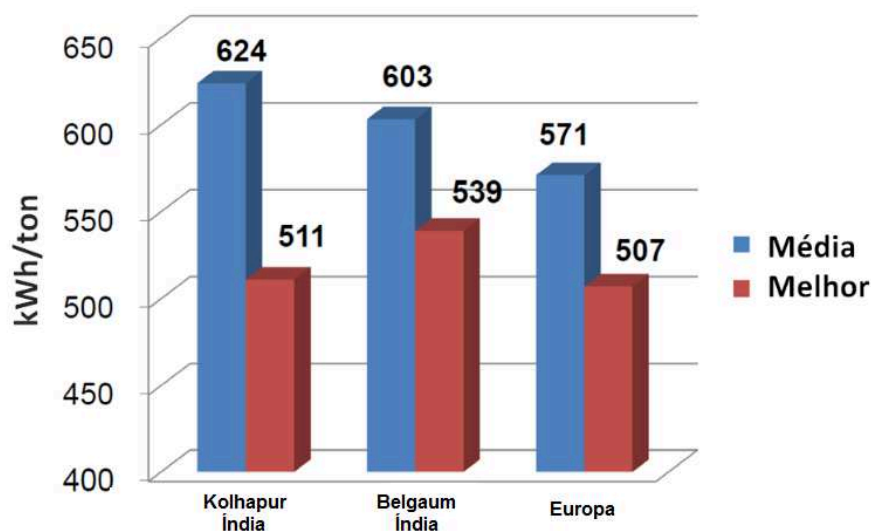


Figura 6 - Valores de kWh/ton para fornos de indução (Fonte: adaptado de Schifo e Radia, 2004)

A Figura 7 mostra as reduções de necessidades de energia para a fusão por indução, da década de 1950 até o presente momento. As estimativas de necessidades de

<sup>2</sup> O sistema de quebra canais será apresentado no subitem 4.1.2.3.

energia típica de fusões foram reduzidas a partir de um valor estimado em 800 kWh/ton em 1950 para 500 kWh/ton para as tecnologias atuais.

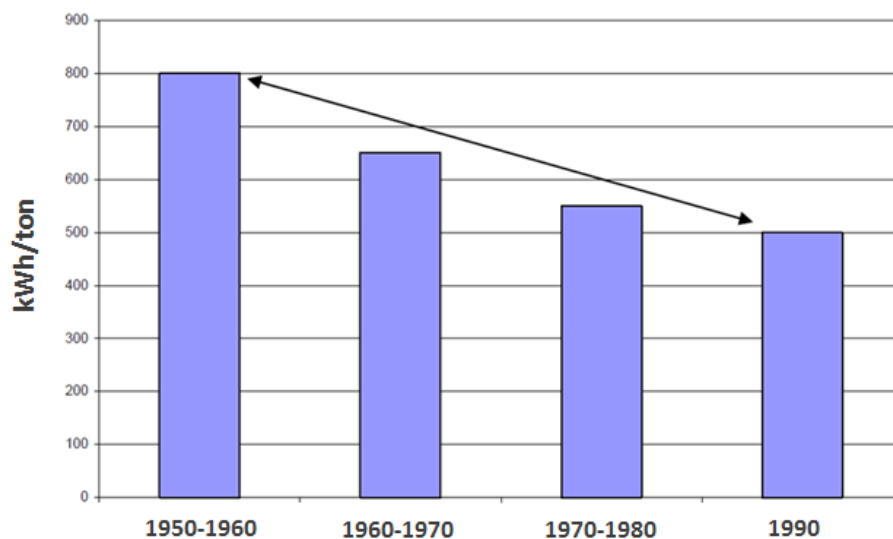


Figura 7 - Histórico de consumo de Energia nos fornos fusores a Indução, do fabricante Inductotherm (Fonte: adaptado de Schifo e Radia, 2004)

### 3 METODOLOGIA

Este trabalho foi dividido em duas partes principais: revisão bibliográfica e estudo de caso. A metodologia utilizada para avaliação da eficiência energética em fundições é descrita a seguir.

#### 3.1 Revisão bibliográfica

Um artigo de revisão ou uma revisão da literatura é uma análise crítica das publicações em uma determinada área do conhecimento (MARKONI; LAKATOS, 2007).

Após a identificação do tema e seleção da questão de pesquisa, foram definidas as etapas para elaboração da revisão, conforme ordem a seguir.

##### 3.1.1 Seleção das fontes de pesquisa

As fontes utilizadas foram diversas, devido ao fato da eficiência energética estar em desenvolvimento contínuo e a fim de fornecer respostas adequadas ao tema proposto, apresentando as melhores e mais viáveis práticas de eficiência energética.



Utilizou-se: livros; teses acadêmicas; manuais técnicos de fabricantes; estudos de caso; manuais de concessionárias de energia elétrica e órgãos governamentais; dados históricos da Associação Brasileira de Fundição; Relatórios de Organizações Internacionais relacionados à energia; sites especializados; e artigos científicos sobre a temática.

Referente aos artigos científicos, a busca ocorreu nas bases de dados: Scielo (*Scientific Electronic Library OnLine*) e *Science Direct*. As palavras chave utilizadas na busca dos artigos foram: Eficiência Energética, Eficiência Energética Fundição, *Energy Efficiency*, *Energy Efficiency Foundry*, *Foundry Process*, *Best Practices Foundries*, *Induction Furnaces*.

Procurou-se utilizar as referências com datas mais atuais possíveis, pois o tema necessita de conhecimento recente. Quando um assunto era abordado em mais de uma referência, foram analisados criticamente os resultados e em caso de coerência dava-se preferência ao estudo mais atual.

Ao final, as fontes foram separadas de acordo com a área de pesquisa.

### **3.1.2 Levantamento de dados**

O levantamento de dados ocorreu seguindo a metodologia de Marconi e Lakatos (2007), inicialmente com uma leitura exploratória de todo o material (leitura rápida e objetiva, verificando se a obra é de interesse para o trabalho). Posteriormente, fez-se uma leitura seletiva visando um aprofundamento das partes que realmente interessavam. Por fim, registravam-se as informações extraídas das fontes em instrumento específico (autores, ano, método, resultado e conclusões).

### **3.1.3 Análise e interpretação dos resultados**

A análise e interpretação dos resultados foi realizada através de uma leitura mais analítica com finalidade de ordenar e resumir as informações contidas nas fontes, tornando mais fácil a obtenção das informações desejadas (MARKONI; LAKATOS 2007).

### **3.1.4 Discussão dos resultados**

Esta etapa apresenta os resultados finais obtidos na pesquisa, de forma crítica e mais clara possível, visando apresentar as ações mais aplicáveis possíveis de eficiência energética em fundições.

### **3.2 Estudo de caso**

O estudo de caso será uma exemplificação prática de algumas aplicações de eficiência energética apresentadas na revisão. Algumas ações foram realizadas pelo autor em uma fundição brasileira real, e outras serão simulações. Após expostas as ações de eficiência energética praticadas, será realizada uma simulação financeira para apresentar possíveis valores de tempo de retorno de investimento.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Os resultados obtidos pelas pesquisas bibliográficas realizadas serão descritos em cada subitem que segue.

### **4.1 Revisão bibliográfica sobre eficiência energética em fundições**

A seguir serão descritas ações de eficiência energética em fundições, indicando a solução e potenciais ganhos energéticos.

#### **4.1.1 Gestão e auditoria de energia**

A gestão de energia é uma estratégia para ajustar e otimizar o consumo de energia, ou seja, promover a eficiência energética na indústria da forma mais inteligente possível. Pesquisas mostraram que indústrias que adotam práticas de gestão de energia podem economizar até 40% do seu consumo total (BACKLUND et al., 2012).

Existem diversas metodologias e maneiras para promover a gestão de energia. Para que ela ocorra efetivamente, três passos básicos devem ser considerados: planejamento, execução e controle. A Figura 8 apresenta um roteiro básico de um sistema de gestão energética. Segundo Canadá (2003), para começar uma gestão de energia, algumas práticas são importantes:

- Compromisso firme da gestão de topo;
- Objetivos do programa claramente definidos;
- Estrutura organizacional e definição de responsabilidades;
- Previsão de recursos - pessoas e dinheiro;
- Procedimentos de medição e acompanhamento e;
- Revisão regular do progresso.

O objetivo principal de um sistema de gestão energética deve utilizar sistemas e procedimentos para promover a redução do consumo de energia por unidade de produção, mantendo constante ou reduzindo os custos totais de produção, através de uma política energética (ARASU; JEFFREY, 2009).

O desenvolvimento de uma política energética terá como ação inicial a auditoria. Uma auditoria energética é um passo fundamental que estabelece a linha base a partir do qual serão medidas futuras melhorias da eficiência energética (outras auditorias energéticas podem ser realizadas mais tarde para, por exemplo, verificar realizações ou descobrir outras oportunidades) (CANADÁ, 2003).

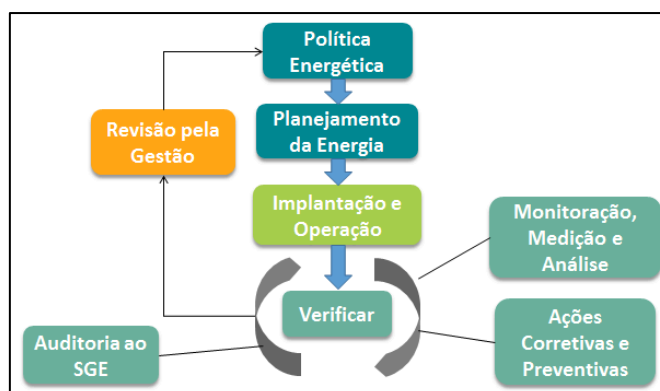


Figura 8 - Roteiro básico de um sistema de gestão energética (Fonte: adaptado de Canadá, 2004)

Uma auditoria energética consiste num estudo de fluxos energéticos em uma empresa, com o propósito de racionalizar o uso de energia. Após a definição dos objetivos, escopo, time de auditores, duração e demais ações pré-auditoria, uma possível sequência de atividades pode ser adotada, como, por exemplo: levantamento de dados gerais; estudo de fluxos de materiais e produtos; caracterização do consumo energético; avaliação das perdas de energia; desenvolvimento dos estudos técnicos e econômicos das alternativas de redução das perdas e; elaboração das recomendações e conclusões (ELEKTRO, 2012).

Como resultado das atividades, deve ser realizado um documento sintetizando o trabalho de levantamento empreendido. Na Figura 9 é apresentado um esquema com o conteúdo típico do relatório final.

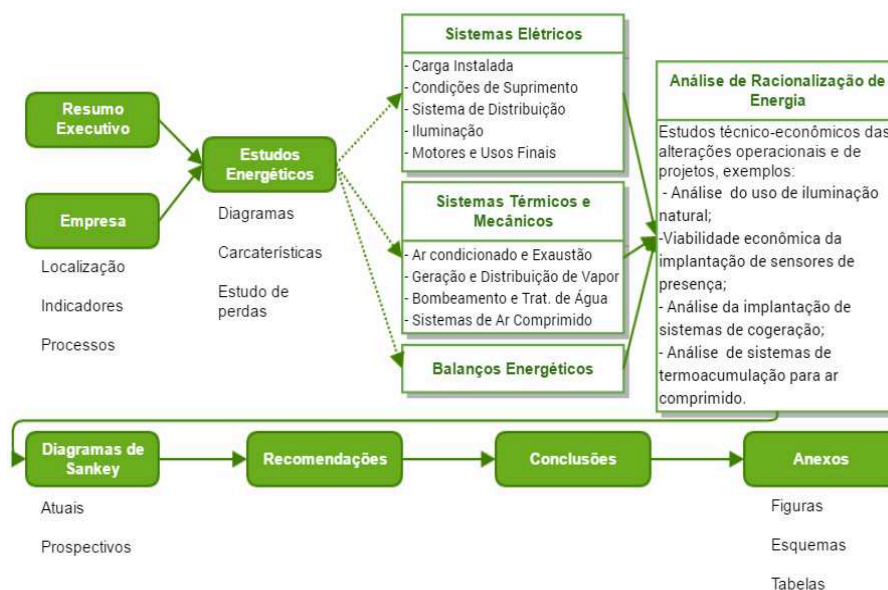


Figura 9 - Conteúdo Típico do relatório de Auditoria Energética (Fonte: adaptado de ELEKTRO, 2012)

Um programa de gestão de energia bem executado segue os mesmos princípios que se aplicam a qualquer empresa para um sistema de qualidade ou gestão ambiental, por exemplo, através dos princípios do PDCA (*Plan, Do, Check, Act* – Planejar, Executar, Checar, Agir) (CANADÁ, 2003).

Um sistema de melhoria aplicado à gestão de energia e baseado no PDCA é implementado pelo WCM (*World Class Manufacturing* – Manufatura/Produção de Classe Mundial). Em Almeida (2014), este novo conceito de produção foi considerado a última evolução do sistema Toyota de produção. O sistema é baseado em 10 pilares e possui um processo longo de melhoria. Neste método de produção o Pilar de energia é subdivisão do Pilar de meio ambiente, e sua metodologia de trabalho segue os sete passos a seguir:

1. Selecionar área modelo (análise de maiores custos, consumos e possibilidades de expansão);
2. Investigar equipamento e processo;
3. Medir, treinar e auditar;
4. Analisar as medições e perdas;
5. Definir contramedidas e projetos;
6. Padronizar;

## 7. Expandir horizontalmente.

Um sistema de gestão de energia deve ser contínuo, Por isso, é importante possuir um sistema de monitoramento e controle de energia, além de equipamentos para mensurar perdas (analisadores de energia, medidores, central de acesso remoto, equipamentos caça vazamentos, luxímetros, termômetro infravermelho, dentre outros). Com as medições em tempo real, devem-se utilizar gráficos e relatórios para controle, analisando o desenvolvimento de consumo e assim criar gráficos com kWh/ton para cada equipamento ou setor. Estes gráficos podem gerar retas para identificar os padrões e analisar valores muito distantes, assim definindo metas de consumo (BACKLUND et al., 2012).

### 4.1.2 Eficiência energética em fornos a indução

Conforme citado no item 2.4, em uma fundição, o principal consumidor de energia é a área da fusão, em especial nos fornos. Por isso, as principais ações de eficiência energética devem ser realizadas neste setor.

Na Figura 10 é apresentado um forno de indução com seus principais componentes. Esta figura apresenta praticamente todos os componentes aos quais serão apresentadas as ações de eficiência energética para fornos.

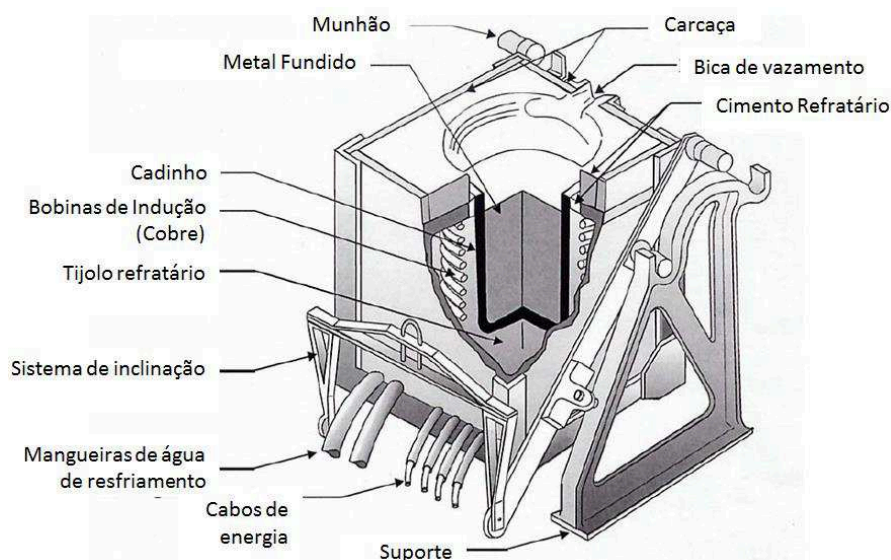


Figura 10 - Ilustração de um forno a indução e seus principais componentes (Fonte: Schifo e Radia, 2004)

Com relação aos mínimos valores possíveis e praticados de kWt/ton em fundições que utilizam fornos de indução, são encontrados variados estudos, embora a maioria apresente números parecidos. Na Figura 11 são apresentadas as faixas de

consumo de energia, oportunidades de eficiência energética e valores de eficiência do forno, descritas em um estudo encomendado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (JAMISON et al., 2015).

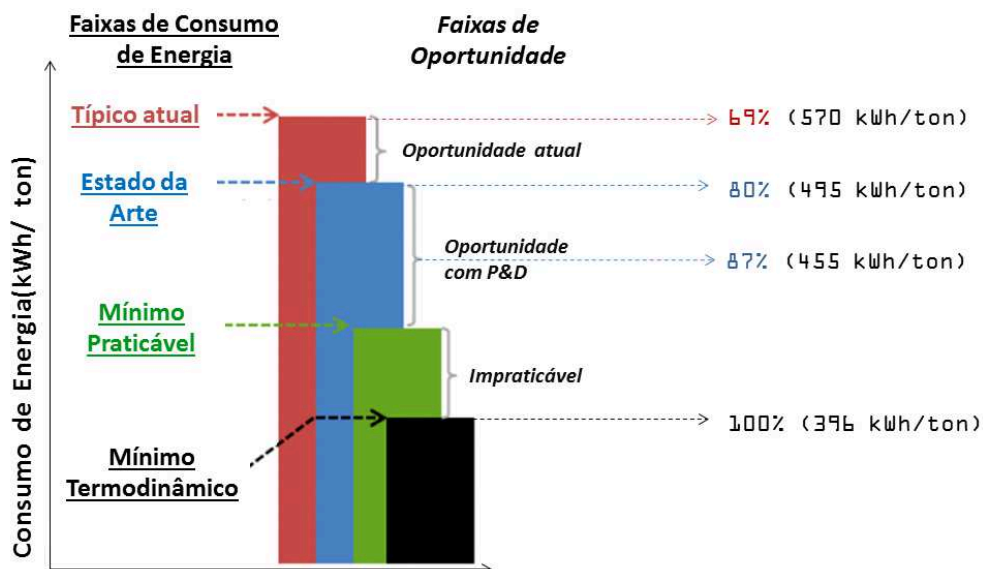


Figura 11 - Consumos, oportunidades e sua porcentagem de eficiência para fornos a indução (Fonte: adaptado de Hermann e Kroes, 2010; Jamison et al., 2015)

O consumo de energia de tserve como a referência do consumo de energia de fabricação atual. O consumo de energia TM serve como linha de base (ou Mínimo Termodinâmico) que é utilizado no cálculo do potencial de economia de energia. A energia de matéria-prima (geração) não está incluída nas estimativas de consumo de energia (JAMISON et al., 2015).

Relacionado ao estado da arte da tecnologia, o diagrama de *Sankey* da Figura 12 apresenta um resumo dos tipos de perdas que ocorrem um forno de indução. Estas perdas representam cerca de 130 kWh/ton. Nestes valores, o forno apresentaria uma eficiência de 75% à 80%. Para que seja possível uma redução ainda maior, pesquisas e testes estão em desenvolvimento. As principais são: redução das perdas da bobina; melhoria no material refratário; redução de perdas na fonte de alimentação (conversores); redução das perdas nos transformadores; redução de perdas da instalação (HERMANN; KROES, 2010; SCHIFO; RADIA, 2004).



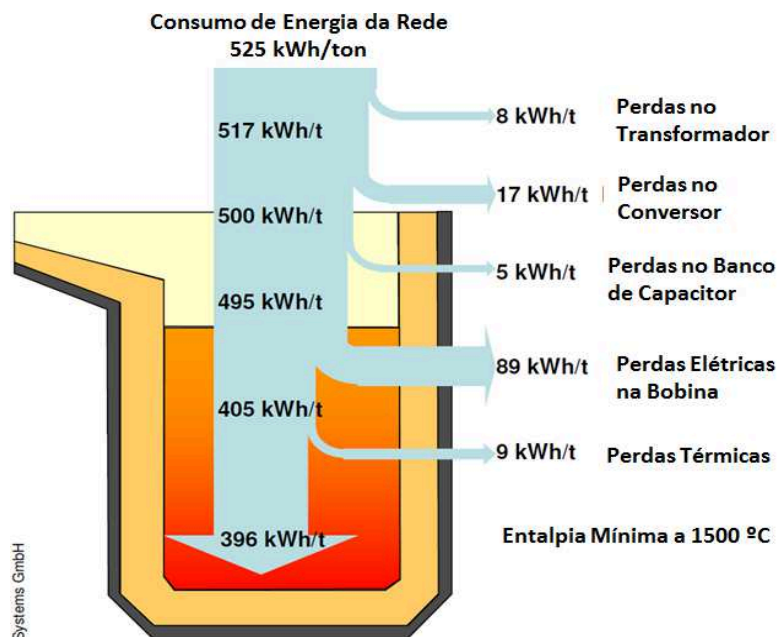


Figura 12 - Balanço de energia para um sistema de fusão por indução (Fonte: adaptado de Hermann e Kroes, 2010)

Na prática, a maioria das fundições não apresentam fornos com perdas maiores que esses valores, pois outras perdas estão atreladas, as quais podem ser mitigadas com as ações que serão apresentadas a seguir. Schifo e Radia (2004) informam que ainda é possível encontrar fundições operando com valores de 800 kWh/ton nos fornos.

#### 4.1.2.1 Eficiência elétrica e eletromagnética nos fornos a indução

Algumas ações para melhorar a eficiência elétrica e eletromagnética nos fornos de indução podem ser realizadas. Após pesquisas, as ações com melhores resultados são:

- a) Uso de equipamento com maior densidade de potência;
- b) Melhoria no sistema conversor;
- c) Melhoria nas bobinas;
- d) Melhoria no concentrador de fluxo magnético (*shunt*).

A capacidade do forno, a frequência e a densidade de potência têm influência significativa sobre o desempenho da fusão, manutenção e também sobre o consumo de energia por tonelada de metal fundido.

Quanto à densidade de potência, já é comum entre os autores o conhecimento de que quanto maior a densidade de potência (kW/ton), mais eficiente será o forno. Estudos sistemáticos já confirmaram esta conclusão, que tem como principal justificativa a redução do tempo de fusão, pois com um ciclo de trabalho mais curto,

menores serão as perdas térmicas, reduzindo assim o consumo de energia elétrica (ESTU, 2000). A Figura 13 exemplifica esta conclusão. Em um estudo feito por Schmitz e Trauzeddel (2014) para um forno a indução de 12 toneladas, o consumo de energia elétrica aumenta exponencialmente com a diminuição da densidade de potência. A comparação entre uma operação de fusão de 6000 kW com uma de 3000 kW revelou uma diferença substancial de consumo de energia de 20 kWh/t.

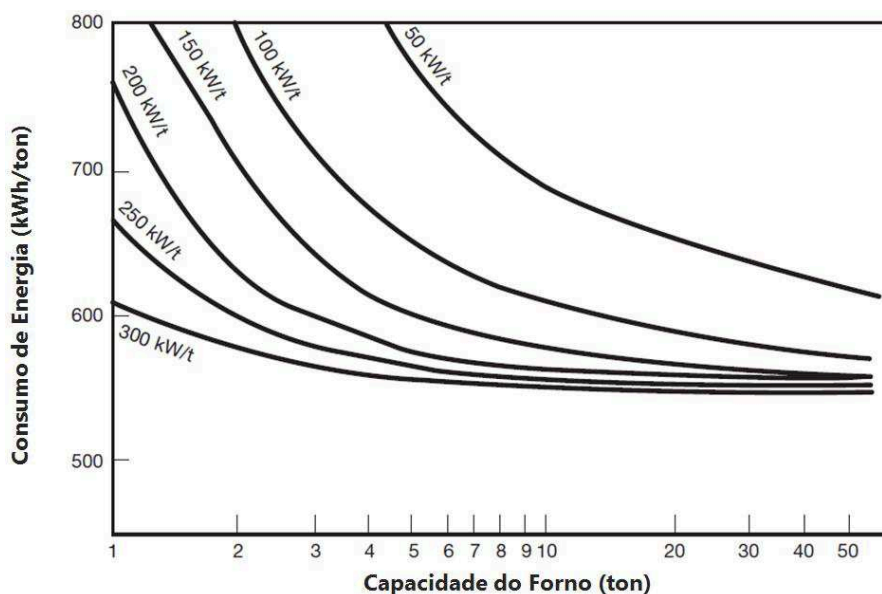


Figura 13 - Efeito da densidade de potência no consumo de energia (Fonte: adaptado de ESTU, 2000)

Outro potencial para a redução do consumo de energia em fornos é a melhoria no sistema conversor. O uso da tecnologia de comutação de média frequência (150Hz a 1500Hz) ao invés de baixa frequência (frequência da rede - 50Hz ou 60Hz), já é comum nos fornos mais novos. Esta tecnologia torna possível operar o forno sem o conhecido “pé de banho”<sup>3</sup>, seja para pequenas ou grandes capacidades, aumentando eficiência energética e segurança, visto que a carga não necessariamente precisa ser pré-aquecida (SCHMITZ; TRAUZEDDEL, 2014).

O uso da baixa frequência necessita de cerca de um terço de metal líquido no fundo para iniciar a fusão, causando erosão do refratário e aumentando 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. Isso acarreta em menores taxas de produção e aumenta o 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).

<sup>3</sup> Quantidade de metal fundido sempre mantida no forno

Com um bom acoplamento eletromagnético, a redução no consumo de energia de um sistema de bateladas pode ser grande. Schmitz e Trauzeddel (2014) obtiveram um valor de 8% de redução devido a maior eficiência da bobina até o ponto de Curie (Figura 14).

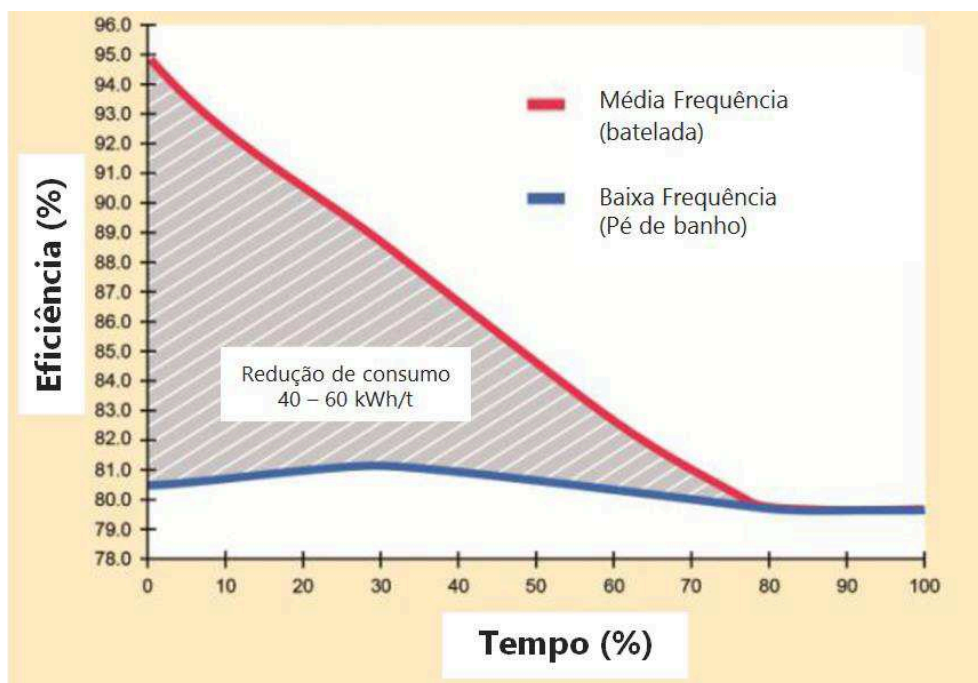


Figura 14 - Economia de energia através da comutação por média frequência (Fonte: adaptado de Schmitz e Trauzeddel, 2014)

Além do uso de média frequência, os conversores podem ser ainda mais eficientes dependendo da seleção correta para a aplicação. Atualmente os principais tipos de conversores são diferenciados pelo tipo da chave eletrônica utilizada, sendo as principais: SCR (*Silicon Controlled Rectifier* - Retificador Controlado de Silício), IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor* - Transistor Bipolar de Porta Isolada) e MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* - Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor) (PARMAR; ARYA, 2016).

Um forno de indução típico utiliza a tipologia formada por AC (rede) – Conversor DC (retificador) – Filtro DC – Conversor AC (inversor). O sistema SCR, IGBT ou MOSFET é o sistema conversor AC, o último sistema antes da bobina (PARMAR; ARYA, 2016).

A principal diferença é que o SCR é um tiristor enquanto o IGBT e o MOSFET são transistores. A aplicação varia de acordo com frequência de trabalho, tensão aplicada e potência. Os MOSFET's praticamente não são utilizados por terem melhor desempenho em altas frequências. Quanto ao uso de SCR e IGBT, é possível encontrar

os dois tipos para fornos similares em média tensão (mais utilizados) com grandes variações no consumo de energia elétrica (PARMAR; ARYA, 2016). Uma proposta bastante inovadora é apresentada por Schmitz e Trauzeddel (2014), com um sistema de multi-frequências, alternando entre frequências maiores no início da fusão e frequências menores durante a adição de combustível.

Uma seleção adequada do conversor ou uma atualização pode impactar em grandes reduções no consumo de energia. Além disso, as perdas devido ao conversor não devem ser maiores que 3% a 4% (HERMANN; KROES, 2010).

O cuidado com a densidade de potência e com o sistema conversor são fatores importantes no momento do projeto, visando um bom consumo de energia. É possível realizar melhorias após o sistema implantado, porém necessitando de estudos mais aprofundados. Já melhorias na bobina e no concentrador de fluxo magnético são mais fáceis de serem aplicadas.

Segundo Hermann e Kroes (2010) e Schmitz e Trauzeddel (2014), as perdas na bobina são as mais significativas, podendo representar 70% do total de perdas da instalação e acarretar em um aumento de até 15% no consumo de energia. Por isso, um dos principais focos das pesquisas dos fabricantes é sobre a bobina. Novos materiais da bobina e do revestimento da bobina estão sendo desenvolvidos, além de melhorias em seu design (ESTU, 2000).

As perdas ôhmicas através da bobina dependem da densidade de corrente e da temperatura do material da bobina. As forças eletromagnéticas distribuem a corrente em uma pequena área do total da seção transversal da bobina, o que resulta em uma densidade de corrente elevada (SCHMITZ; TRAUZEDDEL, 2014).

Schmitz e Trauzeddel (2014) comprovaram que, realizando um projeto especial de bobina, é possível ampliar a área de superfície eficaz para o transporte de corrente, podendo economizar 10% para metais não ferrosos e cerca de 4% para materiais ferromagnéticos. Este projeto é baseado sobre uma bobina transversal, tendência atual do mercado e que pode variar de acordo com a densidade de potência do forno, formato e características do material a ser fundido.

Uma característica interessante é que estes novos conceitos de bobina também podem ser adaptados aos fornos já existentes. E, portanto, são adequados para a atualização de projetos já em operação (SCHMITZ; TRAUZEDDEL, 2014).

Um equipamento muito interessante que está começando a ser utilizado é o sistema OCP (*Optical Coil Protection* – Sistemas Ópticos de Proteção da Bobina) para

monitoramento do cadinho do forno. Trata-se de um sistema de monitoramento da temperatura através de fibra óptica (não sendo afetado pela indução), que indica pontos quentes e protege o sistema (SCHMITZ; TRAUZEDDEL, 2014).

Outra possível ação que ocasiona potenciais ganhos é a melhoria no concentrador de fluxo magnético, conhecido como *shunt* (Figura 15).

O uso de controladores de fluxo magnético existe desde o desenvolvimento da técnica de indução. Michael Faraday descobriu a indução enrolando um fio; após isso o controle do fluxo magnético foi realizado com pilhas de aço laminado (mesmo sistema utilizado em transformadores). Os atuais controles de fluxo magnético melhoram a eficiência da bobina, reduzem o fator de potência, a corrente que circula pela bobina, os aquecimentos indesejados, melhoram a eficiência da frequência de alimentação e o campo externo (GOLDSTEIN, 2014).

O sistema de *shunts* utilizado nos fornos atuais usa lâminas de aço silício contidas em um suporte de metal. Normalmente não existem lâminas inferiores e superiores. A contenção é feita através de anéis de Faraday nas voltas iniciais e finais da bobina, reduzindo o campo magnético nesta área (GOLDSTEIN, 2014).

Um método alternativo é a utilização de compósitos *soft-magnetic* que incorporam a parte inferior e superior, de modo que não é necessário utilizar os sistemas *counterwind*. Consequentemente, todo o comprimento da bobina de indução pode trabalhar para criar o campo magnético interno. Na Figura 15, é possível visualizar dois sistemas de controles de fluxo modernos. O superior sendo de *design* inovador e o inferior no mesmo estilo dos *shunts*, geralmente utilizados na indústria, porém em maior quantidade e com a presença de material de controle na parte superior e inferior (GOLDSTEIN, 2014).

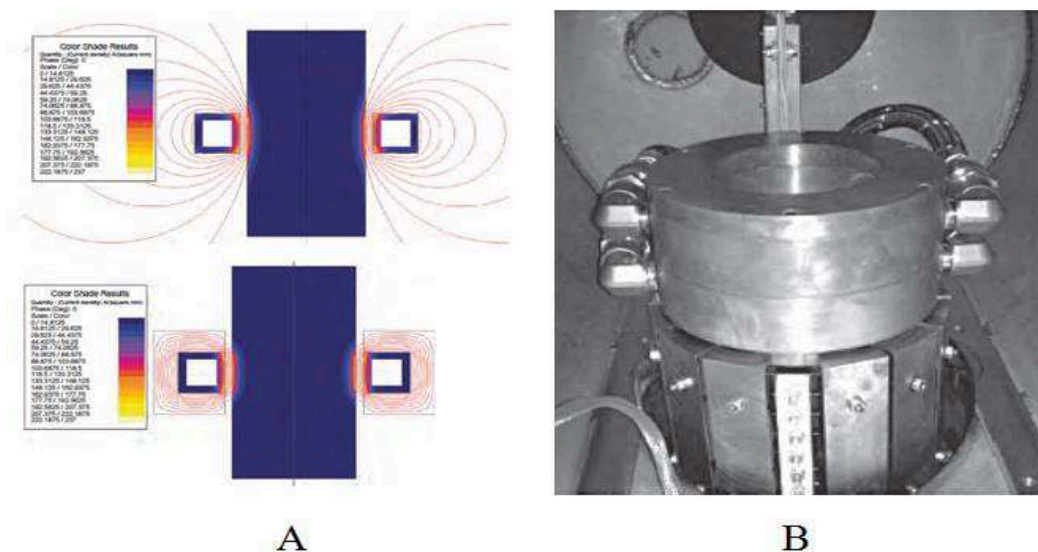


Figura 15 - a) Simulação comparando as linhas de campo e densidade de corrente para uma simples bobina sem *shunt* na parte superior e com o uso de *shunt* na parte inferior. b) Dois modelos inovadores de bobinas utilizando compósitos *soft-magnetic* como *shunt* (Fonte: adaptado de Goldstein, 2014)

Dependendo do tipo de forno e de como ocorre a operação, a redução de perdas na bobina com a utilização de um melhor concentrador de fluxo magnético, pode chegar a cerca de 5%. 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).

#### 4.1.2.2 Eficiência no carregamento e operação do forno

Além das perdas relacionadas aos equipamentos em si, muitas perdas ocorrem devido a uma operação inadequada do forno, por vezes sendo maior que as perdas intrínsecas. A Figura 16 apresenta esquematicamente a operação do sistema de carregamento e fusão.

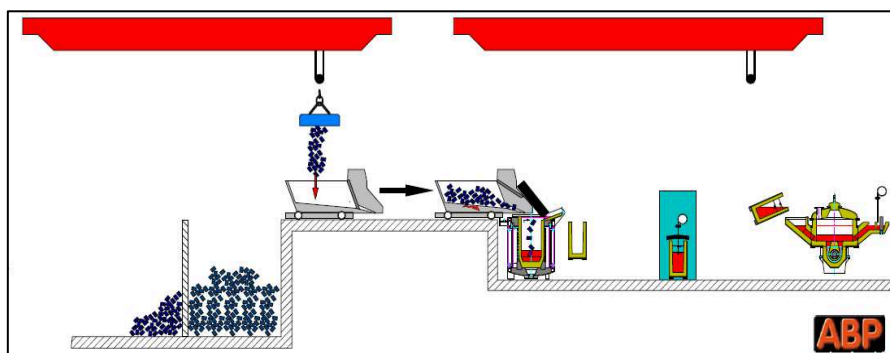


Figura 16 - Desenho esquemático da área de carregamento e fusão de uma fundição (Fonte: Hermann e Kroes, 2010)



A seguir são listadas algumas ações que podem reduzir essas perdas:

- Carregamento: muitas fundições ainda usam o sistema manual de carregamento de carga no forno, processo que consome demasiada energia. Atualmente, existem sistemas com máquinas e controles automáticos, os chamados carros de carga. Esses carros permitem um carregamento rápido e constante do forno, reduzindo perdas por falta de metal e perdas térmicas, devido à tampa permanecer pouco tempo aberta, além de benefícios adicionais no refratário e bobina. Dependendo da maneira e controle de carregamento, os ganhos podem passar de 30 kWh/t (ESTU, 2000).
- Sistema de exaustão: a energia também vai ser "sugada" desnecessariamente, se o sistema de escape estiver trabalhando em plena capacidade, mesmo nos momentos em que apenas um pouco, ou nenhum, gás de combustão é produzido. Em circunstâncias desfavoráveis, isso pode aumentar o consumo de energia em até 3%. Isto corresponde a 15 kWh por tonelada de ferro (SCHMITZ; TRAUZEDDEL, 2014).
- Pé de banho: conforme apresentado anteriormente, o uso de tecnologia de média frequência torna possível operar o forno sem "pé de banho", inclusive para fundir pequenas cargas. Graças ao acoplamento eletromagnético, é obtida uma eficiência maior da bobina, ocorrendo um salto no início da fusão, quando se tem a carga fria (SCHMITZ; TRAUZEDDEL, 2014).
- Fechar a tampa: com a tampa aberta mais tempo que o necessário muita energia é desperdiçada. As perdas de calor pela tampa, que são baixas, podem subir para 600 kW (SCHMITZ; TRAUZEDDEL, 2014). Schifo e Radia (2004) apontaram uma perda de 14 kWh/min para um forno de 12 toneladas.
- Evitar paradas: em teoria, o regime de funcionamento mais favorável seria utilizando a máxima energia elétrica disponível, portanto, com altas densidades de potência. Um modo de funcionamento deste tipo produz ciclos de calor mais curtos e menores perdas térmicas, reduzindo assim o consumo de energia elétrica (SCHMITZ; TRAUZEDDEL, 2014).

Organizar o programa de fusão para reduzir o número de partidas a frio também irá auxiliar na redução do consumo de energia. A massa de refratário tem uma elevada massa térmica. Logo, se fundir com o forno frio poderá exigir até 10% mais energia do que com o forno quente, além de auxiliar na sinterização do material do refratário, pois, caso seja mal executada, poderá acarretar na formação de trincas (ESTU, 2000).

Hermann e Kroes (2010) apontam que interrupções de 2 a 4 minutos por algum problema acrescentam de 25 a 50 kWh/ton devido, principalmente, às perdas térmicas.

- **Superaquecimento:** o aumento de 50K de temperatura, além do pré-estabelecido, irá consumir cerca de 20 kWh por tonelada de ferro. Sistemas atuais permitem controlar a temperatura final com uma precisão de 5 K, eliminando perdas de energia por sobreaquecimento (SCHMITZ; TRAUZEDDEL, 2014).
- **Carburante:** uma adição de 2% de carburante resulta em consumo de energia adicional de 36 kWh/ton de metal. A adição do carburante em quantidades corretas e no início do ciclo de fusão, juntamente com a carga metálica, resultará em economia de energia de aproximadamente 2 kWh/ton. É aconselhável que os agentes de cementação sejam ajustados com base na carga metálica, uma vez que um alto teor de carbono pode levar à erosão do cadinho de fusão (KERMELI et al., 2016).
- **Transferência de metal:** uma redução na temperatura de transferência poderia acarretar em reduções de consumo, visto que as perdas por radiação são influenciadas pela temperatura (JAPAN, 1998). A magnitude das perdas aumenta com a altura de vazamento e com a diminuição da taxa de vazamento. Na prática, uma perda de temperatura de até 20 - 40 K pode ser esperada no vazamento do forno. Na própria fundição da marca Otto Junker, uma perda de temperatura de 20 - 25 K foi medida durante o vazamento de uma panela de 2 toneladas. Além disso, a perda de temperatura na panela durante o transporte do metal líquido é de modo algum insignificante. Em um tipo de cadinho concha com uma capacidade de 2 toneladas (sem tampa), a queda de temperatura pode ser estimada em aproximadamente 6.5 K/minuto. Reduzir o tamanho da boca, melhorar isolamento e aumentar a capacidade do cadinho (Figura 17) podem

diminuir as perdas para 1,5 K/min. O uso de tampas também auxilia significativamente na redução de perdas (SCHMITZ; TRAUZEDDEL, 2014).

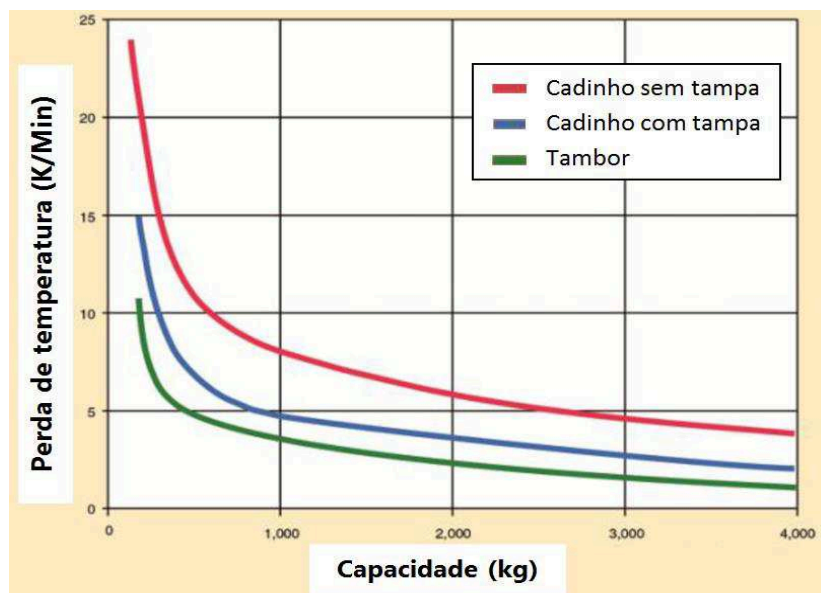


Figura 17 - Efeito da geometria do cadinho na perda de temperatura (Fonte: adaptado de Schmitz e Trauzeddel, 2014)

#### 4.1.2.3 Eficiência na composição e densidade de carga

Um cálculo preciso da composição da carga necessária, com base em análises de material e peso da carga e aditivos de liga (incluindo correções), são pré-requisitos básicos para a minimização dos tempos de fusão e consequente necessidade de energia. (ESTU, 2000)

Devido ao acoplamento magnético, quando mais densa a carga, menor será o consumo de energia, devido à perda do campo eletromagnético em vazio (ESTU, 2000; SCHMITZ; TRAUZEDDEL, 2014; JAPAN, 1998; KERMELI et al., 2016). Kermeli *et al.* (2016) indica que uma diminuição na densidade de 0,35 t/m<sup>3</sup> aumenta em 23 kWh/t no consumo de energia. Já Schmitz e Trauzeddel (2014) obtiveram um aumento no consumo de 25 kWh/t para uma redução de 0,5 t/m<sup>3</sup>. Logo, é evidente o impacto desta ação e, apesar de alguns custos e esforços, vale a pena investir na compactação.

Algumas ações para promover eficiência energética através da melhoria na composição e densidade de carga, podem ser realizadas. Após pesquisas, as ações com melhores resultados são:

- a) Uso de equipamento quebra canais (Figura 18);
- b) Briquetagem da sucata;

c) Redução na quantidade de areia e oxidação (escória);

O sistema de quebra canais já é realidade em algumas fundições brasileiras. Heisen (2015) informou que uma fundição brasileira obteve o valor de 610 kWh/t (sendo o menor consumo específico encontrado na literatura) após implementar um sistema de quebra canais em sua fundição, e também teve ganho com aumento de taxa de produção. Os ganhos com sistemas quebra-canais são evidentes, podendo obter um aumento de 12% no tempo de fusão de carga, retirada de areia em até 2% do peso de material quebrado (consequente redução de escória), aumento de densidade de carga e consequente redução de consumo de energia elétrica do processo de fusão em até 12%, eliminação de mão de obra para quebrar canais, além de evitar o “engaiolamento” no interior do forno e do carro de carga (ROSSIL, 2016).

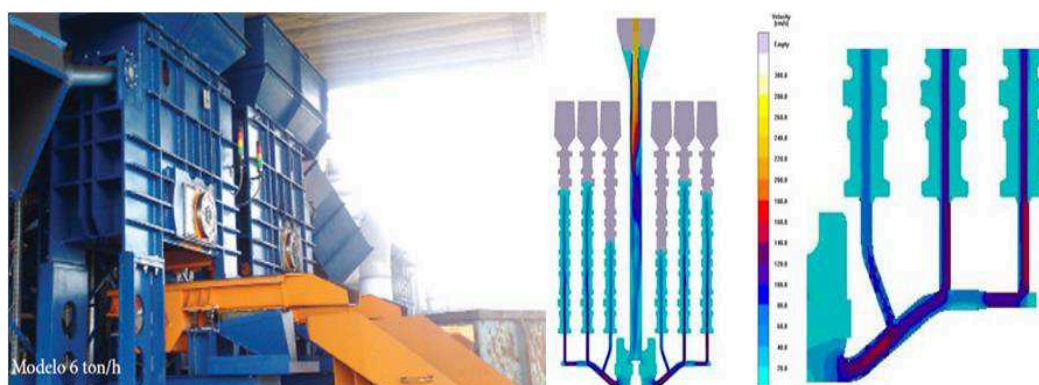


Figura 18 – À esquerda o equipamento quebra canais e a direita um exemplo do que são os canais (Fonte: adaptado de Rossil 2016)

Outra maneira de se obter aumento de densidade da carga e redução de consumo é através da briquetagem (Figura 19). O processo, que já é conhecido nas indústrias madeireiras para briquetagem de cavaco, também pode ser aplicado no metal. É possível realizar a briquetagem do cavaco e da sucata em até 80% da densidade do sólido fundido e os ganhos podem chegar a mais de 10% de redução do consumo da fusão, dependendo da quantidade briquetada (JESSBERGER, 2008). Um ponto ressaltado em ESTU (2000), é que, com a briquetagem, parte do óleo é retirado da sucata e isso pode favorecer a oxidação do material, consequentemente aumentando o consumo de energia.



Figura 19 - Cavaco de metal briquetado (Fonte: do autor)

Além da compactação de carga, o uso de materiais limpos e secos também auxiliará na redução de consumo de energia. Se o retorno de fundição é utilizado sem ter sido limpo da areia, o resíduo gerará escória e vai consumir energia específica, como na fusão de ferro. Com 25 kg de areia por tonelada de ferro, o acréscimo no consumo será 12,5 kWh/t, considerando valores bem otimistas (SCHMITZ; TRAUZEDDEL, 2014).

Um fator, ainda mais impactante que a areia, é o material da carga estar enferrujado. Suas propriedades no acoplamento eletromagnético são inferiores e prejudicam a transferência de energia na fusão, resultando em tempos de fusão maiores. Verificou-se que a sucata de aço enferrujada leva 2 a 3 vezes mais tempo para derreter e exige 40 a 60% a mais de energia. Portanto, a utilização de material de carga oxidado deve ser evitada sempre que possível (SCHMITZ; TRAUZEDDEL, 2014).

#### **4.1.3 Pré-aquecimento de carga**

Uma solução, com implantação praticamente desconhecida no Brasil, é o pré-aquecimento da matéria prima a ser fundida. Existem diversas maneiras de realizar este pré-aquecimento, porém os principais fatores a serem considerados são os custos e adequação ao layout (JAPAN, 1998). É possível realizar o pré-aquecimento através de um sistema separado ao processo, ou nos próprios carros de carga (Figura 20).



Figura 20 - Carro de carga com sistema de pré-aquecimento (Fonte: Kinematics, 2016)

Poderá realizar-se uma economia de energia e custo notável se a matéria-prima for pré-aquecida até 500 - 600 °C, por qualquer método mais eficaz e menos custoso do que o aquecimento por indução (JAPAN, 1998). Em Schmitt (1997), os ganhos indicados com o pré-aquecimento da carga são de 22 kWh/t para um aumento de 150 °C e 81 kWh/t para 540 °C.

Segundo Canadá (2003) e Japan (1998), o pré-aquecimento do material tem as seguintes vantagens:

- Segurança: evita a explosão do vapor causada pela condensação da humidade na superfície do material de carga fria;
- Economia: possibilidade de economia de custos de energia (o calor pode ser proveniente dos efluentes gasosos dos fornos/desmoldagem, ou outro combustível como o gás natural, uma vez que o preço para o aquecimento por energia elétrica seja maior);
- Produção: aumento da capacidade de fusão reduzindo o tempo no forno de indução.

A operação do pré-aquecedor deve ser sincronizada com o forno. O pré-aquecimento não deve inserir perdas por oxidação (por temperaturas excessivas - acima de 650°C - ou tempos de retenção da carga longos no pré-aquecedor). Além disso, a transferência a partir do pré-aquecedor para o forno deve ser a mais rápida possível, para minimizar as perdas pela transferência de calor (CANADÁ 2003).

#### 4.1.4 Recuperação de calor

Outra forma de reaproveitamento de calor é através da cogeração. 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).

A indústria Italiana Turboden tem se destacado no desenvolvimento de equipamentos para geração de energia elétrica a partir da recuperação de calor em fornos de fundições. Mais de 300 geradores foram desenvolvidos a partir do conceito do ciclo Rankine (Figura 21), em sua maioria ORC (*Organic Rankine Cycle* – Ciclo Rankine Orgânico), muito usado na Europa em usinas a Biomassa e Geotermia (CAMPAGNA, 2013).

A principal diferença do ORC para o ciclo convencional é que ao invés de utilizar água como fluido de trabalho, se utiliza um fluido orgânico. Estes fluidos não necessitam ser superaquecidos para evitar a condensação na turbina, durante a fase de expansão. Com isso é possível trabalhar com temperaturas e potências mais baixas, a partir de 200 °C e 200 kW, respectivamente (TURBODEN, 2014).

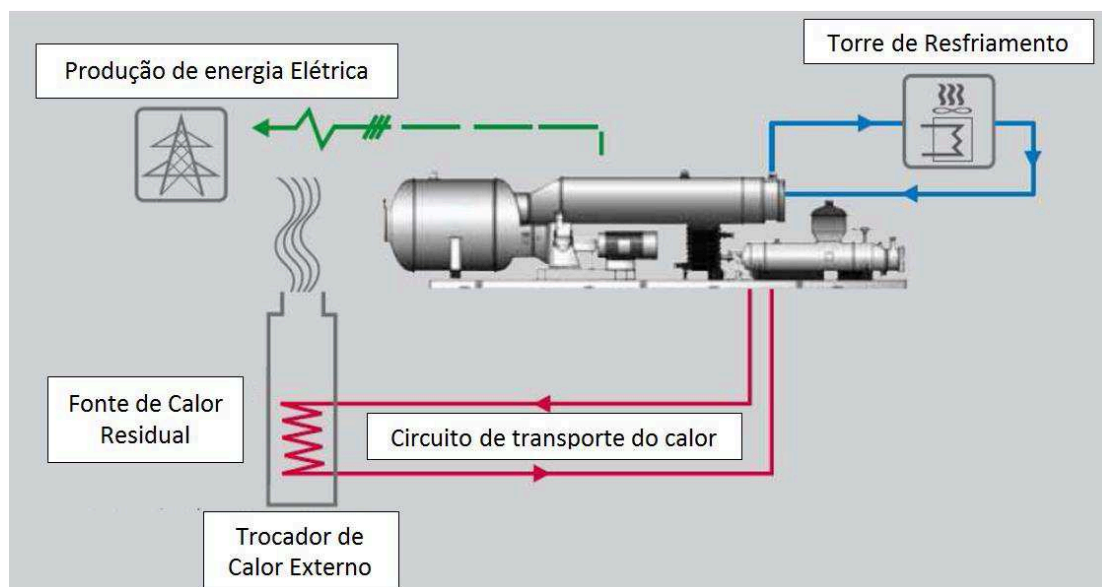


Figura 21 - Representação básica do ciclo ORC Turboden para produção de energia elétrica a partir de gases de exaustão (Fonte: adaptado de Campagna, 2013)

#### 4.1.5 Eficiência energética em iluminação

Além das ações de eficiência energética exclusivas de fundições, existem ações que também podem ser aplicadas em outros setores. A melhoria na Iluminação é uma



delas. Segundo Elektro (2012) vários trabalhos desenvolvidos mostram que a iluminação ineficiente é comum no Brasil, resultado de uma combinação de lâmpadas, reatores e refletores ineficientes, associados a hábitos não saudáveis na sua utilização.

Alguns conceitos são importantes para análise da iluminação:

- Fluxo luminoso: quantidade de luz produzida pela lâmpada, emitida em todas as direções, que pode produzir estímulo visual, em lúmens (lm);
- Eficiência Luminosa: é o quociente do fluxo luminoso total emitido por uma fonte de luz, em lúmens, e a potência por ela consumida, em Watts (lm/W).

Este último conceito é o mais importante em termos de eficiência energética, pois indica o quanto de energia elétrica é transformada em iluminação (ELEKTRO, 2012).

A Tabela 3 apresenta os valores típicos de eficiência luminosa para fontes de iluminação. São valores típicos, podendo variar de acordo com fabricantes e desenvolvimento de tecnologias. Já é possível encontrar no mercado lâmpadas LED com 200 lm/W e vida útil de 80.000 horas (KERMELI, 2016).

Tabela 3 - Comparação de desempenho de fontes de iluminação (Fonte: adaptado de Kermeli, 2016)

<b>Lâmpada</b>	<b>Eficiência (Lm/watt)</b>	<b>Tempo de vida (Horas)</b>	<b>Aplicação</b>
Incandescente	5–20	1.000	Qualquer
Halógena	<24	1.000	Trabalho
Fluorescente T-12	60	20.000	Qualquer
Fluorescente T-8	80–100	20.000	Qualquer
Fluorescente T-5	80–105	20.000	Qualquer
Vapor de Mercúrio	30-50	60.000	<i>Hi-Bay</i>
Vapor de Sódio de Alta-pressão	85–150	10.000–50.000	Exterior, <i>Hi-Bay</i>
Iodeto Metálico	70–115	20.000	<i>Hi-Bay</i>
LED	10–120	80.000	Qualquer

Algumas boas práticas para eficiência energética em sistemas de iluminação são descritas por Kermeli (2016), Elektro (2012) e Canadá (2003):

- Desligar as lâmpadas em áreas desocupadas. Uma medida fácil e eficaz é encorajar as pessoas a desligar as lâmpadas em espaços desocupados;
- Usar sensores de presença e outros controles de iluminação. As lâmpadas podem ser desligadas durante as horas sem trabalho por controles automáticos;

- Atualizar sinais de saída. Os custos de energia podem ser reduzidos pela troca de lâmpadas incandescentes por lâmpadas de LED (diodos emissores de luz);
- 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%;
- Ajustar os níveis de lux corretos para a atividade que está sendo realizada;
- 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*);
- Usar luz natural. Aumentar os níveis de luz natural dentro de salas pode reduzir as cargas de iluminação elétrica em até 100% durante o dia;
- Usar iluminação LED. As lâmpadas LED usam menos energia para emitir a mesma quantidade de lúmens, e possuem maior vida útil. Para fundições as mais indicadas são do tipo *Hi-Bay*, pois possuem um foco de luz, perfeito para plantas com pé direito alto.

#### **4.1.6 Eficiência energética em sistemas de ar comprimido**

Quase todas as plantas industriais, de micro a grandes empresas, dispõem de algum sistema de ar comprimido. Fundições usam o ar comprimido em uma variedade de aplicações, como: ferramentas de alimentação, enchimento de caixas de núcleo, transporte de areia, sopro de moldes, entre outros. Este ar comprimido, muitas vezes, é a forma mais cara de energia disponível em uma planta, por causa da baixa eficiência (KERMELI, 2016).

Segundo Karmouche (2009), estudos de caso revelam que a eficiência energética alcançada em sistemas de ar comprimido tem permitido reduções de consumo de até 50%. Em média, o potencial de economia é da ordem de 30%. Estes potenciais podem ser divididos na geração de ar comprimido (casa de máquinas) e na distribuição. O Quadro 1 apresenta algumas ações para economizar energia e custos para o sistema de ar comprimido encontrados na literatura.

A avaliação de cada uma das medidas citadas deverá ter como base a aplicabilidade e rentabilidade, levando em consideração não apenas o custo do investimento e economias de energia anuais, mas também as alterações nos custos de operação e manutenção do (s) sistema (s) de ar comprimido (ADENE, 2010).

Quadro 1 – Ações e potenciais ganhos com eficiência energética em sistemas de ar comprimido (Fonte: adaptado de Marques, Haddad e Guardial, 2007; Adene, 2010 e Rocha e Monteiro, 2005)

<b>Ações</b>	<b>Ganhos Potenciais</b>
Redução de perdas utilizando reservatórios e sistemas de estabilização	Até 4% de redução no consumo
Controle de compressores em cascata (pela demanda e eficiência)	Até 15% de redução no consumo
Redução de perda de carga	Até 3% de redução no consumo
Melhorias no sistema de secagem	Até 5% de redução no consumo
Alteração na concepção geral do sistema, incluindo sistemas de multipressão	Até 9% de redução no consumo
Substituição de motores convencionais por alto rendimento	Até 5% de redução no consumo
Utilização de variadores de velocidade	De 15% a 30% de redução no consumo
Seleção adequada no tipo de compressor (parafuso, centrífugo...)	Até 12% de redução no consumo
Melhoria nos pontos de utilização (consumidores)	Até 40% de redução no consumo
Redução de vazamentos	Variam bastante de acordo com pressão de trabalho – As reduções podem chegar a 40% (mais detalhes na Tabela 4)
Substituição regular do filtro de ar	Até 2% de redução
Ajusta da pressão	1 bar de aumento, equivale a aproximadamente 6% de aumento na potência consumida (p@6bar)
Melhoria na temperatura aspirada (a partir da temperatura padrão - 21°C)	Para cada 4°C de aumento de temperatura aspirada, o consumo aumenta em 1%; Para cada 3°C de redução da temperatura aspirada, o consumo reduz em 1%
Compressores movidos a gás natural	Podem gerar economia dependendo do custo do insumo
Correção do diâmetro dos tubos	Até 3% de redução no consumo
Recuperação de calor	Até 20% da energia de entrada e 94% da energia consumida no eixo

O mais indicado, para melhorar o desempenho de um sistema de ar comprimido, é criar uma metodologia para implantação das ações, monitorando demandas de ar e observando os equipamentos e linhas, determinando-se assim reais necessidades da qualidade do ar, melhores sistemas para determinada aplicação, redução dos pontos de uso, balanceamento de produção e consumo do ar, elaborando um plano de manutenção e acompanhamento, definindo metas e implementando um sistema de controle (MARQUES; HADDAD; GUARDIAL, 2007).

A partir da metodologia traçada, são implantadas primeiro as ações com baixo (ou nulo) investimento, que possam proporcionar redução de potência e, conseqüente, capacidade dos equipamentos. Como exemplo, cita-se a redução de pressão em fins de semana e eliminação de vazamentos, que costumam ser muito viáveis e de baixo custo, porém necessitando de monitoramento constante (MARQUES; HADDAD; GUARDIAL, 2007). A Tabela 4 apresenta perdas com vazamentos de ar comprimido.

Tabela 4 - Perdas de vazão e potências de vazamento em um sistema de ar comprimido de 6 bar (Fonte: adaptado de Karmouche, 2009)

<b>Diâmetro do orifício de vazamento (mm)</b>	<b>Vazamento (em m<sup>3</sup>/min) sob pressão de 6 bar</b>	<b>Potência (kW) requerida para compressão</b>
1	0,06	0,3
3	0,6	3,1
5	1,62	8,3
10	6,3	33
15	25,2	132

Uma ação que vale a pena ressaltar é a recuperação da energia térmica do sistema de resfriamento do compressor. Esta ação é pouco utilizada devido aos custos iniciais de implantação, porém esta medida pode elevar o rendimento global do sistema para cerca de 70% ou mais (MARQUES; HADDAD; GUARDIAL, 2007). A Figura 22 apresenta um sistema da Atlas Copco que pode recuperar água quente até 90°C e utilizá-la na pré-alimentação da caldeira.

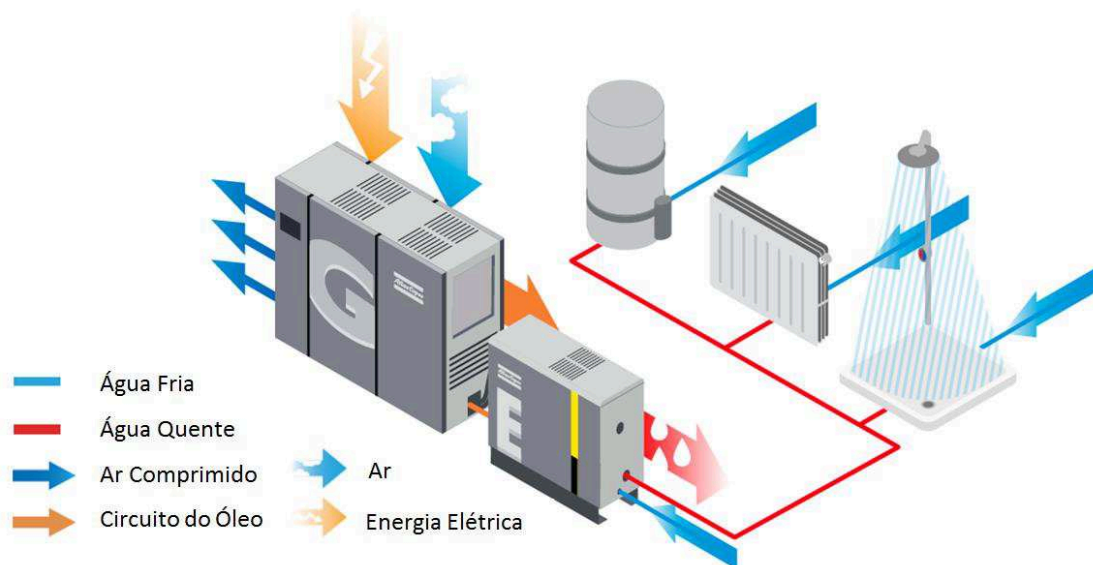


Figura 22 - Recuperador de energia térmica (Fonte: adaptado de Atlas Copco, 2011)

#### 4.1.7 Eficiência energética em sistemas motrizes

Até 95% dos custos de um motor podem ser atribuídos à energia que ele consome ao longo de sua vida útil, enquanto apenas cerca de 5% dos custos de um motor são tipicamente atribuídos à sua compra, instalação e manutenção. Por isso é muito importante analisar os potenciais de redução de consumo de energia em motores (KERMELI, 2016).

A seguir são listadas algumas possíveis ações para efficientização energética em motores elétricos, segundo Kermerli (2016), Elektro (2012) e Marques, Haddad e Guardial (2007):

- Executar manutenção periódica: realizar limpeza e lubrificação dos mancais, verificar acoplamentos, ajustando alinhamentos e eliminando folgas que dão origem a vibrações e elevação da temperatura de operação;
- Evitar o uso de acoplamentos com redutores e correias (podem introduzir perdas de até 30%);
- Redimensionar motores: muitas vezes os motores são sobredimensionados ou subdimensionados, operando com menor rendimento e consumindo mais energia que o necessário;
- Substituir motores de baixo rendimento por outros de alto rendimento;
- Evitar rebobinagens;

- Utilizar métodos de partidas e operação que acarretem em menor consumo de energia, como: inversores de frequência (reduções de até 80%) e *soft starters*;
- Automatizar o uso dos motores para modular a carga e/ou desligar quando o motor permanecer a vazio por muito tempo;
- Criar *check-list* (lista de verificações) de desligamento, após finalização de produção;
- Minimizar variações de tensão, como desbalanceamentos, afundamentos e sobretensão, além da presença de harmônicos;
- Corrigir fator de potência dos motores: minimizar o uso do motor a vazio, utilizar motores de alto rendimento, instalar capacitores para reduzir a magnitude da potência reativa.

#### **4.1.7.1 Solução para filtros manga**

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 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 filtração (Figura 23) (WEG, 2010).

Ao fechar os “*dampers*” de tubos de captação de máquinas, ou ocorrerem variações no processo, o transdutor de pressão reconhece, controlando a velocidade do motor dentro das condições ideais de operação e reduzindo substancialmente o consumo de energia. Este controle é possível devido ao motor de ímãs permanentes possuir torque constante em toda faixa de rotação, imprescindível para aplicações em sistemas de exaustão, uma vez que impossibilitaria a redução de velocidade, caso ocorresse uma perda de carga no sistema (CARDALL, 2012).

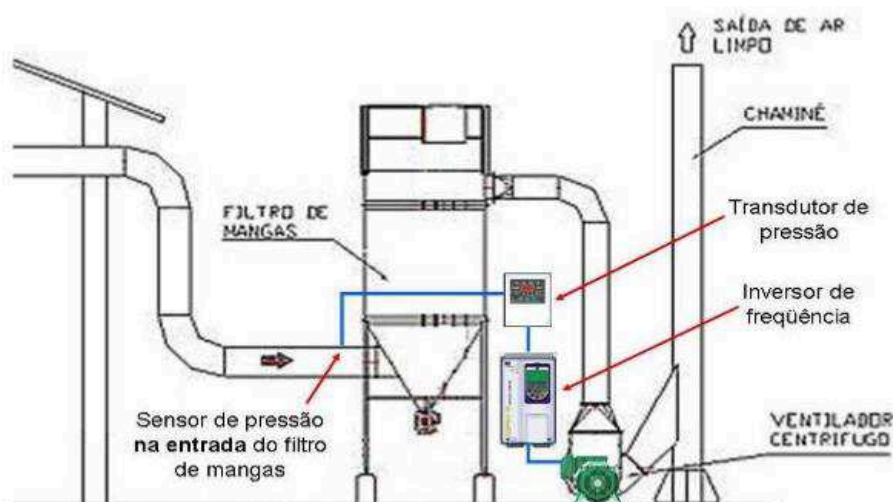


Figura 23 - Sistema automatizado de controle de velocidade do motor para exaustores (Fonte: adaptado de WEG, 2010)

Em um estudo de caso elaborado por WEG (2010), foi possível perceber que com a substituição do motor de 50 CV por um de Imãs Permanentes e com a instalação do sistema com inversor de frequência, a economia obtida foi de 53,7% no consumo de energia. Este estudo demonstrou que esta aplicação é viável para fundições.

#### 4.1.7.2 Solução para torres de resfriamento

As torres de resfriamento são dimensionadas a partir dos valores de vazão e temperatura da água a ser resfriada, e como padrão são projetadas em função da maior temperatura de bulbo úmido do local de instalação. Mas, durante o ano, as temperaturas variam, seja pelas condições sazonais do ambiente local ou pelas sazonalidades de produção. Com isso, a torre opera na maior parte do tempo “sobredimensionada”, consumindo energia elétrica em excesso (WEG, 2012).

Para realizar uma redução de consumo, é possível aplicar um controle de temperatura da água e enviar um sinal para um inversor de frequência que irá modular a rotação do motor elétrico (Figura 24), seja do ventilador ou da bomba. Como a potência responde a uma relação cúbica da rotação, as possibilidades de redução no consumo de energia são grandes (WEG, 2012).



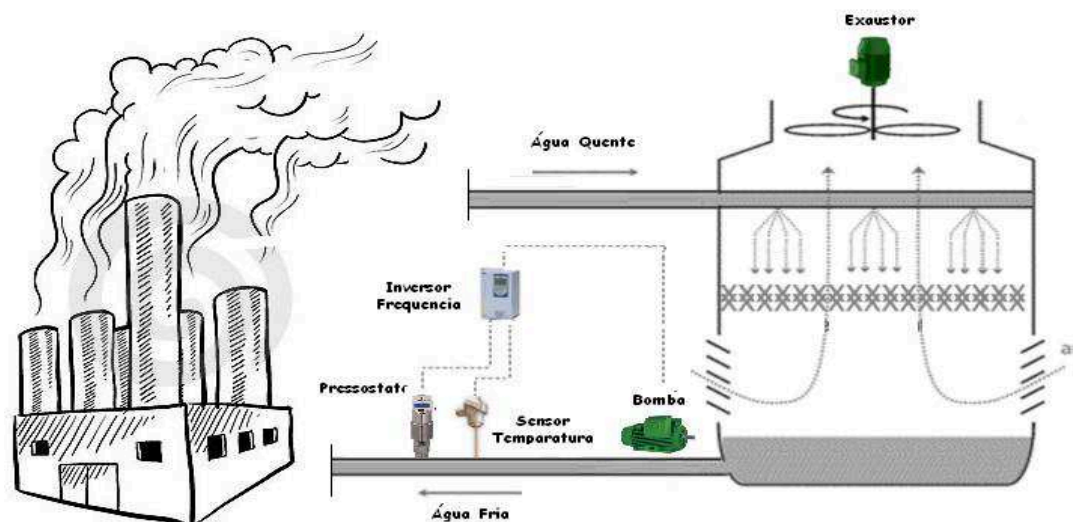


Figura 24 - Sistema automatizado de controle de velocidade do motor para torres de resfriamento (Fonte: adaptado de WEG, 2012)

No estudo de caso desenvolvido em WEG (2012), a economia no consumo de energia elétrica foi de aproximadamente 80%. Além deste ganho, com o sistema, se obtém redução no consumo de água, no consumo de produtos químicos e se aumenta o controle do processo.

#### 4.1.8 Otimização na contratação e tarifa de energia

Algumas soluções visando economia, principalmente nos custos de energia, envolvem alterações na forma de contratação desse insumo. Os custos da energia e da prestação de serviços variam de acordo com a classe tarifária enquadrada e o subgrupo.

O consumidor deverá analisar como é a estrutura tarifária e como são calculados os valores expressos nas notas fiscais de energia elétrica para definir como será seu consumo e o seu fornecimento de energia. Muitas vezes, os valores para alterações, como em tensões de fornecimento, são elevados, porém a economia nos custos deverá ser cuidadosamente analisada (ELEKTRO, 2012).

Algumas informações importantes a serem analisadas: energia elétrica ativa e reativa consumida; fator de carga; demanda contratada, média, máxima, medida e faturável; fator de potência; horário fora de ponta e de ponta; período seco e úmido; modalidade tarifária convencional (Grupo B), horossazonal azul ou verde (Grupo A); ambiente de contratação regulado (ACR) e ambiente de contratação livre (ACL); bandeiras tarifárias. A partir da compreensão destas informações, consumos e preços otimizados podem ser implementados, como por exemplo: alteração de modalidade

tarifária devido à mudança na tensão de fornecimento; otimização da demanda de potência consumida; redução de consumo no horário de ponta (normalmente preço mais elevado); correção de fator de potência para evitar multas; migração para o mercado livre de energia; entre outros (ELEKTRO, 2012).

Um ponto muito importante a ser detalhado é com relação ao Ambiente de Contratação Livre (ACL). Hoje mais de 60% da energia consumida por indústria no país é adquirida no mercado livre de energia. A economia média proporcionada com relação ao mercado cativo é de 18%. Logo, fundições que não se encontram nesse mercado devem analisar uma migração o mais breve possível (ABRACEL, 2016).

O mercado livre de energia elétrica é um ambiente onde o consumidor pode escolher livremente seus fornecedores de energia, exercendo seu direito à portabilidade da conta de energia elétrica e não dependendo de valores estipulados pelo governo, como, por exemplo, o custo das bandeiras tarifárias (ABRACEL, 2016).

Neste mercado, existem dois tipos de consumidores: os consumidores livres e os consumidores especiais (Figura 25). Os consumidores livres devem possuir, no mínimo, 3000 kW de demanda contratada e podem contratar energia de qualquer fonte de geração. A única restrição é que consumidores que se conectaram ao sistema elétrico antes de 7 de julho de 1995, têm que receber a energia em tensão superior de 69 kV. Já os consumidores especiais devem possuir demanda contratada igual ou maior que 500 kW e menor que 3000 kW, independente do nível de tensão, e só podem comprar energia de fontes conhecidas como incentivadas (ABRACEL, 2016).

Para empresas que não atendem ao requisito de demanda de 500 kW, uma possibilidade de ingresso no mercado livre é através da comunhão de cargas. Consumidores com o mesmo CNPJ ou localizados em área contígua (sem separação por vias públicas), podem agregar suas cargas para atingir os 500 kW exigidos e se tornar consumidor especial (ABRACEL, 2016).

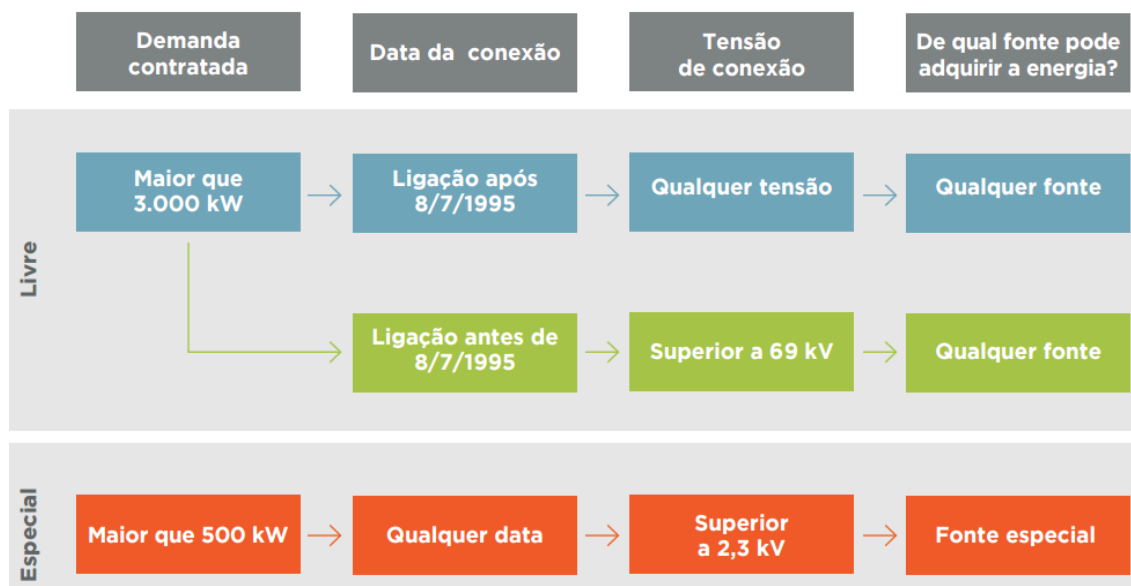


Figura 25 - Classificação dos consumidores no mercado livre (Fonte: ABRACEL, 2016)

A compra de energia é realizada por meio de contratos de compra, normalmente bilaterais ou por meio de comercializadoras de energia, seja de energia incentivada e/ou convencional. A energia convencional é proveniente de grandes centrais hidrelétricas e usinas térmicas. A energia incentivada é proveniente de usinas eólicas, solares, biomassa, PCH's ou hidráulicas com potência inferior ou igual a 50.000 kW. Os consumidores de fontes incentivadas têm direito a redução de 50% a 100% nas tarifas de uso do sistema de distribuição e transmissão (TUSD e TUST). O percentual do desconto depende da data de homologação da outorga ou do registro do empreendimento na ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e do tipo de fonte de geração. Essa medida é um incentivo econômico para o desenvolvimento das fontes renováveis no país (ABRACEL, 2016).

Os valores dos diferentes tipos de energia são bastante flutuantes. No Brasil, devido à dependência de fontes hidrelétricas, o preço é regulado pelas chuvas, pelo comportamento do mercado e pelo ano da energia contratada. Durante a elaboração deste trabalho, os valores médios, para 2017, obtidos junto a algumas geradoras e comercializadoras foram: energia convencional R\$ 150,00/MWh; energia incentivada 50% (I5) R\$ 175,00/MWh; energia incentivada 100% (I10) R\$ 200,00/MWh.

## 4.2 Estudo de caso

Neste subitem será apresentado um estudo de caso para redução de custos com energia em uma fundição que utiliza como método de fusão a indução eletromagnética,

no qual serão utilizados valores de consumo de energia tradicionalmente encontrados neste tipo de empresa.

Os valores de consumo, economia de energia e custos de implantação são baseados em projetos implantados e estudos realizados pelo autor.

Para projetos de eficiência energética, o principal benefício econômico é a redução do consumo de energia e a redução de demanda. Para realizar a análise, algumas avaliações econômicas são necessárias para indicar a viabilidade e atratividade dos projetos. Dentre estes indicadores, pode-se destacar o valor presente líquido (VPL), o valor presente líquido anualizado (VPLa), a taxa interna de retorno (TIR), o tempo de retorno de capital (*Payback*) e o índice benefício/custo (IBC). Para tais análises, procura-se modelar o problema real em um fluxo de caixa, o que permite a utilização de certas equações previamente concebidas. Cada avaliação possui certas vantagens e desvantagens, por isso é necessário aplicar já conhecendo as respectivas limitações. (ELEKTRO, 2012).

Para este estudo de caso será analisado apenas o *Payback* descontado, que pode ser calculado através da Equação 1, sendo o mais difundido no meio técnico, devido a facilidade de sua aplicação, e por considerar a taxa de juros adotada (ELEKTRO, 2012). Em Elektro (2012), é o possível obter as demais formulações referentes aos indicadores econômicos.

$$n = \frac{\ln(1 - \frac{I}{A}i)}{\ln(1+i)}, \quad (1)$$

onde  $n$  é o tempo de retorno,  $I$  é o investimento realizado,  $A$  é a economia proporcionada,  $i$  é a taxa de juros considerada.

Será considerada uma empresa já no mercado livre, logo, com preço de energia fixo, variando apenas valores de demanda ponta e fora ponta (preço médio do kWh já com taxas de transmissão e impostos de R\$ 0,35). A taxa de juros considerada (Selic) será de 13,90% ao ano e a depreciação dos equipamentos em 10% ao ano (BRASIL, 2016; BRASIL, 2012). No *payback* informado estão incluídos os custos evitados com manutenção (equipamentos e mão de obra) e ganhos de produção. Outras informações importantes para avaliação de um projeto de eficiência energética, e que estão contempladas na análise, são: taxa de juros estimada para os anos da avaliação, análise da evolução dos preços de energia, vida útil dos projetos e depreciação dos equipamentos (ELEKTRO, 2012).

Para o estudo de caso, serão consideradas as seguintes premissas: a fundição trabalha em três turnos, parando nos sábados, domingos e feriados para manutenção; linha de vazamento, moldagem e jateamento automatizadas; taxa de produção média de 12 ton/h; 240 dias produtivos; três fornos a indução, com capacidade de 5 toneladas e potência de 3750 kW cada; consumo por forno de 720kWh/ton; compressor de 350kW com sistema carga e alívio, com pressão de operação de 6 bar; iluminação com luminárias de vapor de mercúrio de 400 W.

O Quadro 2 apresenta o resumo das ações propostas, investimentos necessários, observações (ganhos estimados em kWh, em %, entre outros) e o *payback* de cada estudo de caso analisado.

Quadro 2 - Resumo dos projetos de eficiência energética do estudo de caso analisado (Fonte: do autor).

<b>Ação</b>	<b>Investimento Total (R\$)</b>	<b>Observações</b>	<b>Payback (anos)</b>
Redução de 5 minutos na interrupção do forno	-	Redução de 25 kWh/ton no consumo do forno	Imediato
Substituição das bobinas	240.000,00	Redução de 2% no consumo do forno (14,4 kWh/ton)	1,07
Substituição dos <i>shunts</i>	945.000,00	Redução de 4% no consumo do forno (28,8 kWh/ton)	2,16
Redução de Areia e oxidação na matéria prima (25 kg)	27.000,00	Redução de 11 kWh/ton no consumo do forno	0,16
Implantação de um quebra canal	980.000,00	Redução de 10% no consumo do forno (72 kWh/ton)	0,88
Melhorias nas tampas e redução de 3 minutos de tampa aberta além do necessário	30.000,00	Redução de 10 kWh/ton no consumo do forno	0,20
Aumento de 50 K	-	Redução de 20 kWh/ton no consumo do forno	Imediato
Reduzir o tempo de transferência do metal do forno fusor para o forno canal	-	Para um cadinho de 2 ton estima-se uma perda de 6,5 K/min, logo 2,6 kWh/min	Imediato
Redução no tempo de <i>Break down</i> na linha de moldagem	-	Reduções podem acarretar em até 30% de economia da planta	Imediato
Melhorias na iluminação (substituição de luminárias de vapor metálico por LED)	122.000,00	1. Redução de luminárias de 400 W para 150 W 2. Desligamento quando não uso por não ter reator 3. Redução de manutenção devido maior vida útil	1,28

<b>Ação</b>	<b>Investimento Total (R\$)</b>	<b>Observações</b>	<b>Payback (anos)</b>
Controle de vazamentos de ar comprimido	2.000,00	1. 8 vazamentos de 1 mm (0,3 kW cada) 2. 5 vazamentos de 3 mm (3,1 kW cada) 3. Redução de 11169 kWh/ano	0,08
Automação nas torres de resfriamento dos fornos fusores, canal e de vazamento	99.000,00	Redução de 350.000 kWh/ano	1,00
Automação nos sistemas de exaustão	198.000,00	Redução de 850.000 kWh/ano	0,91
Pré-aquecimento do carro de carga (consumo de 18 m <sup>3</sup> /ton)	6.500.000,00	Redução de 81 kWh no consumo de energia elétrica do forno (considerado consumo e preço do gás natural no <i>payback</i> ) e aumento de produção	2,33
Implantação de Subestação para alterar a tensão de alimentação de 13,8 kV para 138 kV (enquadra-se como consumidor livre)	11.000.000	Redução de preço da energia elétrica no mercado livre (cerca de 20%) e redução no preço da demanda devido à alteração da classificação tarifária	2,39

Alguns estudos apresentados por Elektro (2012), trazem valores médios de dois anos de *payback*. Já os resultados obtidos com o estudo de caso, indicam algumas oportunidades com melhor atratividade e viabilidade para redução de custo e consumo de energia. Muitas soluções, principalmente focadas na gestão de energia e cultura de economia, não necessitam de investimento, acarretando em retorno imediato.

Um fator muito interessante a ser observado é com relação aos fornos fusores (maiores consumidores da planta). Inicialmente se tinha um consumo de 720 kWh/ton, e com a implantação das sete primeiras ações foi possível obter uma redução de 181,2 kWh/ton. Esta redução impacta significativamente no indicador, resultando em um novo valor de 538,8 kWh/ton fundida no forno, valor este muito próximo àqueles encontrados em Schifo e Radia, 2004.

Projetos que impactam mais nos custos, normalmente, necessitam de maiores investimentos e possuem maior tempo de retorno. As últimas duas soluções exemplificam este fato. São dois projetos com um custo inicial significativo e com *payback* maior que as demais ações. Também é importante perceber que,

necessariamente, não haverá uma redução de consumo de energia, entretanto o custo dos insumos é que será alterado.

## 5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados, é possível concluir que muitas atitudes para redução no consumo de energia podem ser empregadas dentro de uma fundição, as principais delas no setor da fusão. Algumas dessas atitudes não necessitam de investimento, apenas um gestor de energia pode avaliar desperdícios nos processos e equipamentos, implantando melhorias e disseminando a cultura de conscientização dos empregados. Esta conscientização deve ser constante, por isso faz-se necessário o uso de auditorias e de um sistema de gestão de energia.

A cultura de eficiência energética é, na maioria das fundições, desconhecida. Os problemas com o consumo elevado de energia começam desde a fase de projeto. Para reduzir os investimentos iniciais, as fundições são desenvolvidas com o menor custo possível, não avaliando o impacto que um projeto mal elaborado pode causar. Um exemplo de erro grave pode ocorrer no dimensionamento do forno. Conforme apresentado na revisão bibliográfica, um forno com densidade de potência baixa consome significativamente mais energia, e este problema só poderá ser resolvido com a aquisição de um novo forno.

Já com o estudo de caso, foi possível verificar algumas ações de eficiência energética e redução de custos com energia, mesmo quando uma fundição estiver em operação. Das quinze ações propostas, quatro não necessitariam de investimento inicial e podem reduzir significativamente o consumo de energia. Todas as quatro são consumos excessivos devido a uma má operação, e são perdas resolvíveis com conscientização e treinamento.

No decorrer da pesquisa, notou-se uma falta de publicações no que diz respeito à atual situação do consumo e eficiência energética em fundições brasileiras. Um possível estudo futuro seria o levantamento de informações faltantes, como consumo médio de energia por tipo de fundição, padrão de indicadores brasileiros (conforme estudos apresentados no decorrer deste trabalho nos Estados Unidos da América, Canadá, na União Européia e Índia), consumo de gases combustíveis, entre outros. Uma parceria com a ABIFA (Associação Brasileira de Fundição) auxiliaria neste trabalho.



## ENERGY EFFICIENCY IN FOUNDRIES: A LITERATURE REVIEW AND A CASE STUDY FOR BRAZILIAN FOUNDRY

### ABSTRACT

Energy efficiency has been assuming increasing importance in the commercial and industrial sector, motivated by the reduction of costs from the competitive market, the uncertainty of energy availability or environmental restrictions. The main objective of this study is to indicate energy efficiency actions for a sector that has high demands and energy costs: foundries, especially those that use induction furnaces. As the theme has few studies in Brazil, an analysis of the energy consumption in each sector of a foundry was made. The analysis indicates the fusion as the main energy consuming area. The actions are mainly focused in this sector, later presenting actions for the other areas. The energy efficiency possibilities encountered can significantly impact the energy consumption of a foundry. To demonstrate this impact, a case study is presented. It can be concluded that many actions in the foundry sector have a short investment return time (less than two years) when compared to other sectors of industry. In addition, some actions require little or no investment, just awareness.

Keywords: Energy Efficiency. Foundries. Economy.

### REFERÊNCIAS

ABIFA. Associação Brasileira de Fundição. **Desempenho do setor de fundição**. <http://abifa.org.br/indices-setoriais/>. Acesso em: 12 out. 2016

ABRACEL (Brasil). Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia. **Cartilha Mercado Livre de Energia Elétrica**: Um guia básico para consumidores potencialmente livres e especiais. Brasília: Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia, 2016. 12 p.

ADENE, Agência Para A Energia (Ed.). **Medidas de Eficiência Energética Aplicáveis à Indústria Portuguesa**: Um Enquadramento Tecnológico Sucinto. Alges, Portugal: Adene, 2010.

ALMEIDA, Márcio. **WCM – (World Class Manufacturing)**: Última tendência na Qualidade. 2014. Disponível em: <<http://marcioqualy.blogspot.com.br/2012/07/wcm-world-class-manufacturing-ultima.html>>. Acesso em: 04 jul. 2016.

ARASU, M; JEFFREY, L Rogers. Energy Consumption Studies in Cast Iron Foundries. **Indian Foundry Congress**. India, p. 331-336, fev. 2009.

ARJUNWADKAR, S. H.; RANSING, M. R.; RANSING, R. S. Seven Steps to Energy Efficiency for Foundries. **Foundry Management and Technology**, United Kingdom, v. 143, n. 3, p.24-29, mar. 2015.

ATLAS COPCO. **Atlas Copco Air Optimization: Energy Recovery**. Belgium: Atlas Copco Airpower, 2011. 2 p.

BACKLUND, Sandra et al. Energy efficiency potentials and energy management practices in Swedish firms. **Summer Study on Energy Efficiency in Industry (ecee 2012), European Council For An Energy Efficient Economy**. Netherlands, set. 2012.

BCS, Incorporated (Org.). **Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry**. Columbia: U.S. Department Of Energy, 2005. 46 p.

BRASIL, Banco Central do (Org.). **Dados Diários: Taxas Selic de 22/10/2016**. 2016. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/htms/selic/selicdiarios.asp>>. Acesso em: 22 out. 2016<sup>a</sup>.

BRASIL. FAZENDA. **Sobre a OCDE**. Disponível em: <<http://www.pcn.fazenda.gov.br/assuntos/ocde/sobre-a-ocde>>. Acesso em: 10 out. 2016<sup>b</sup>.

BRASIL. Carlos Nogueira da Costa Júnior. Ministério de Minas e Energia. **Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico - 2015: Siderurgia, Ferro-gusa, Ferroligas, Metais não ferrosos, Fundição**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2015. 108 p.

BRASIL. Tribunal de Contas do Estado do Estado de Santa Catarina. Portaria nº TC-0078, de 23 de setembro de 2012. **Disciplina os procedimentos para Reavaliação, Redução ao Valor Recuperável, Depreciação e Amortização dos bens móveis**. Diário Oficial da União; Poder Executivo, 2012.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Boaventura Mendonça D'ávila Filho. **Plano Duodecenal (2010 - 2030) de Geologia, Mineração e Transformação Mineral**. Brasília: MME, 2009.

BRASIL. Carlos Nogueira da Costa Júnior. Ministério de Minas e Energia. **Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico - 2012: Siderurgia, Ferro-gusa, Ferroligas, Metais não ferrosos, Fundição**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2007. 117 p.

CAMPANA, F. et al. ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: Energy and GHG savings. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 76, p.244-252, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.041>.

CANADÁ. Cipec. Canadian Foundry Association (Org.). **Guide to Energy Efficiency Opportunities in Canadian Foundries**. Ottawa: Canadian Foundry Association, 2003. 143 p.

CARDALL, Cardoso Industrial LTDA. **Eficiência Energética em Filtro de Mangas**. 2012. Disponível em: <[http://www.cardall.com.br/noticia/eficiencia\\_energetica\\_em\\_filtro\\_de\\_mangas-11](http://www.cardall.com.br/noticia/eficiencia_energetica_em_filtro_de_mangas-11)>. Acesso em: 20 out. 2016.

CARNIN, Raquel Luísa Pereira. **Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundição como Agregado de Misturas Asfálticas**. Dissertação de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008

COMISSÃO EUROPÉIA. Integrated Pollution Prevention and Control. **Reference document on best available techniques in the smitheries and foundries industry**. Sevilha: Ec Jrc Ipts, 2005.

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

ETSU (United Kingdom). Energy Efficiency Enquiries Bureau. **Efficient melting in coreless induction furnaces**. Harwell: Crown, 2000. 40 p.

GOLDSTEIN, Robert. Magnetic Flux Controllers in Induction Heating and Melting. In: RUDNEV, Valery; TOTTEN, George. **ASM Handbook: Induction Heating and Heat Treatment**. 4. ed. United States Of America: Asm International, 2014. Cap. 5. p. 633-645.

HEISEN, Enio. Abifa. De como não queimar dinheiro. **Revista da Abifa: Fundição e matérias-primas**, São Paulo, v. 18, n. 8, p.10-12, ago. 2015. Mensal.

HERMANN, Stoperikongress; KROES, Josef. **Energy efficiency using Induction Furnaces**: Hamar, 2010. 40 slides, color.

IEA, Intenational Energy Agency (France). **Energy Efficiency: Market Report 2016**. Paris: OECD/IEA, 2016.

JAMISON, Keith et al. **Bandwidth Study on Energy Use and Potential Energy Saving Opportunities in U.S. Iron and Steel Manufacturing**. U.S: Department Of Energy, 2015.

JANSEN, Carolina Specht. **Aplicação da produção mais limpa como ferramenta para melhoria contínua do sistema de gestão de saúde, segurança e meio ambiente**. 2013. 49 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Segurança do Trabalho, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

JAPAN, The Energy Conservation Center (Org.). **Seminar on Energy Conservation in Iron Casting Industry**. Hanoi - Vietnam: Unido, 1998. 78 p.

JESSBERGER, Andreas. Briquetting of cast iron chips. **Foundry Trade Journal**. United Kingdom, p. 134-137. maio 2008.

KARMOUCHE, Andréa Romero. **Análise da Eficiência Energética em Compressores a Pistão em Sistemas de Ar Comprimido**. 2009. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009.

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, 2016. 128 p.

KINEMATICS, General. **Charge Pre-Heat Systems**. 2016. Disponível em: <<https://www.generalkinematics.com/product/charge-pre-heat-systems/>>. Acesso em: 07 out. 2016.

MARCONI, M.A.; LAKATONS, E.M. **Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados**. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2007

MARQUES, Milton César Silva; HADDAD, Jamil; GUARDIAL, Eduardo Crestana (Org.). **Eficiência Energética: Teoria e Prática**. Itajubá, Mg: Fupai, 2007. 244 p.

PARMAR, Ronal S; ARYA, Swapnil V. Triggering Circuit of Induction Furnace With Power Quality Analysis. In: International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, 1, 2016, India. **Proceedings...** . Tamil Nadu: Iceeot, 2016. p.23 - 27.

PATANGE, G.; KHOND, M. Energy Efficiency in Small and Medium Scale Foundry Industry. **Metalurgija**, Indian, v. 55, n. 2, p.257-259, fev. 2016.

RIEXINGER, Günther et al. KPI-focused Simulation and Management System for Eco-Efficient Design of Energy-Intensive Production Systems. **Procedia Cirp**, [s.l.], v. 29, p.68-73, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.029>.

ROCHA, Newton Ribeiro; MONTEIRO, Marco Aurélio Guimarães. **Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. 208 p.

ROSSIL. **Sistema para Quebra de Canais e Refugo em Ferro**. 2016. Disponível em: <<http://www.rossil.com.br/catalogos.php?page=downloads>>. Acesso em: 03 set. 2016.

SCHEUNEMANN, Ricardo. **Regeneração de Areia de Fundição Através de Tratamento Térmico Via Processo Fenton**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

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

SCHMITT, Robert J.. Electric Arc Furnace Scrap Preheating. In: By the EPRL Center for Materials Production, 1997, Pittsburgh. **Proceedings...** . Pennsylvania: Electric Power Research Institute, Inc., 1997. p. 1 - 4.

SCHMITZ, W; TRAUZEDDEL, D. The Melting, Holding and Pouring Process - Energy and Process - Related Aspects. In: World Foundry Congress, 71, 2014, Bilbao. **Proceedings...** . United Kingdom: World Foundry Organization Ltd, 2014. v. 2, p. 642 - 653.

SCHMITZ, Wilfried; TRAUZEDDEL, Dietmar. Anlagen-und verfahrenstechnische Neuentwicklungen der Induktionsofentechnik. **Giesserei Rundschau**, Wien, v. 60, n. 1/2, p.2-6. 2013.

SIMÕES, André Felipe; BAJAY, Sérgio Valdir. **Oportunidades de eficiência energética para a indústria**: Relatório setorial: Fundação. Brasília: Cni - Confederação Nacional da Indústria, 2010. 47 p.

TOLEDO, Edna Beronheiro Signorelli. **Método de Utilização de Areia de Fundição e Resíduo de Poeira de Jateamento (Micro Esferas de Vidro) para Produzir Cerâmica Vermelha**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

TURBODEN (Comp.). **Turboden 200/300 kW Units - Typical Performances**. Brescia, Italy: Clean Energy Ahead Turboden, 2014.

WEG. **Eficiência Energética em Filtros de Manga**. Jaraguá do Sul: Weg, 2010.

WEG. **Solução de Eficiência Energética em Torres de Resfriamento**. Blumenau: Weg, 2012.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece a Universidade por disponibilizar o acesso ao conhecimento. A todos os professores que fizeram parte da graduação, em especial ao melhor possível coordenador de curso e orientador do TCC Luciano Pfischter e os professores que aceitaram fazer parte desta banca. A família, que é a engrenagem principal e sempre apoiou, apesar de todas as decisões do autor. A namorada que serviu de inspiração profissional e sempre instigou a melhorar. A empresa Embraco, por disponibilizar a chance de fazer um grande estágio, em especial ao meu líder André Gross, que lutou por minha vaga e me ensinou muito. E aos meus amigos, em especial ao Rodolfo que compartilhou este último ano de luta comigo e ao Engenheiro Gabriel Dieterich, que auxiliou nas pesquisas, no desenvolvimento do TCC e irá lançar um livro em parceria.