

# OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE FUSÃO DE AÇO E REDUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO FORNO ELÉTRICO A ARCO

## OPTIMIZATION OF THE STEEL MELTING PROCESS AND REDUCTION OF ELECTRIC ENERGY IN THE ELECTRIC ARC OVEN

João Vitor Castro Alencar\*  
Alexander Pereira De Oliveira\*\*  
Orientadora: Illa Beghine Soncin\*\*\*

### RESUMO

O presente artigo é baseado no estudo da produção de aço por meio da fusão de sucatas metálicas nos Fornos Elétricos a Arco (FEA). No contexto de competitividade entre as usinas siderúrgicas, destaca-se a importância do FEA e a busca por melhor desempenho, redução no consumo de energia elétrica e diminuição da emissão de poluentes. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é analisar técnicas que podem aprimorar a eficiência energética nos processos de fusão do aço. Para alcançar esse objetivo, foi realizada uma pesquisa de campo em uma usina siderúrgica localizada em Juiz de Fora/MG, juntamente com o estudo de artigos científicos publicados acerca do tema. Os resultados obtidos demonstraram que a utilização do gusa líquido, a injeção de oxigênio, a regulagem do transformador de potência, a análise da eficiência da etapa de refino e o estudo da fórmula de Köhle foram essenciais para atingir a meta de redução do consumo de energia elétrica estabelecida pela usina.

**Palavras-chave:** Eficiência Energética. Forno Elétrico a Arco. Fusão do Aço. Gusa Líquido. Oxigênio.

### ABSTRACT

This article is based on the study of steel production through the fusion of scrap metal in Electric Arc Furnaces (EAFs). In the context of competitiveness among steel mills, the importance of EAFs and the pursuit of improved performance, reduced electricity consumption, and decreased pollutant emissions are highlighted. Accordingly, the objective of this work is to analyze techniques that can enhance energy efficiency in steel fusion processes. To achieve this goal, a field research was conducted at a steel mill located in Juiz de Fora, MG, along with a review of published scientific articles. The obtained results demonstrated that the use of liquid pig iron, oxygen injection, power transformer adjustment, analysis of refining stage efficiency, and the study of the Köhle formula were essential in achieving the target of reducing electricity consumption set by the mill.

**Keywords:** Energy Efficiency. Electric Arc Furnace. Steel Melting. Liquid pig iron. Oxygen.

\*Rede de Ensino Doctum – Unidade Juiz de Fora – aluno.joao.alencar@doctum.edu.br – Graduando em Engenharia Elétrica.

\*\*Rede de Ensino Doctum – Unidade Juiz de Fora – aluno.alexander.oliveira@doctum.edu.br – Graduando em Engenharia Elétrica.

\*\*\*Rede de Ensino Doctum – Unidade Juiz de Fora – prof.illa.soncin@doctum.edu.br – Orientador do trabalho.

## 1- Introdução

As indústrias estão constantemente em busca de maneiras de reduzir os seus custos, aumentar sua produtividade e competir em um mercado dinâmico. Neste contexto, a energia é um dos mais importantes recursos da sociedade atual, já que é utilizada na criação de grande parte dos bens e serviços indispensáveis à sociedade (HINRICHS; KLEINBACH; DOS REIS, 2011). O aço é um desses bens essenciais a humanidade, pois compõe diversos objetos e equipamentos necessários no cotidiano, como latas de bebidas, ferramentas, utensílios domésticos e compõe grandes estruturas como veículos, máquinas e edificações. No entanto, a produção de aço requer um considerável consumo de energia devido as etapas em seu processo de fabricação. Destaca-se, ainda, que o aço está associado ao conceito de economia circular, sendo um material altamente reciclável e reciclado em todo o mundo (INSTITUTO aço Brasil, 2015).

O Forno Elétrico a Arco (FEA) é a técnica predominante na produção de aço a partir de sucata metálica, utilizando energia elétrica como principal fonte de alimentação (U.S. Environmental Protection Agency, 2010). Reduzir o consumo de energia elétrica no processo de produção de aço é um dos principais desafios enfrentados pelas empresas siderúrgicas (CHEN et al., 2018). Melhorar o desempenho das empresas do setor requer a implementação de medidas como aumento da produtividade, redução de custos e aumento da eficiência dos processos.

Além dos benefícios econômicos, a redução no consumo de energia elétrica e o reaproveitamento de materiais descartados têm impactos ambientais significativos, como a redução da utilização de recursos naturais e a diminuição da emissão de substâncias poluentes. A partir do desenvolvimento de novas tecnologias, bem como de melhorias no processo, as siderúrgicas com Aciaria elétrica ganharam espaço, sendo uma solução vantajosa, econômica e ambientalmente sustentável. O FEA apresenta vantagens, tais como alta eficiência energética, aparelho extremamente versátil, produção de praticamente qualquer tipo de aço, operação intermitente e mudanças rápidas na produção, em escalas de dezenas a centenas de toneladas.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é analisar técnicas que possam aprimorar a eficiência energética nos processos de fusão do aço. Para atingir esse objetivo, serão adotadas duas abordagens principais: uma pesquisa bibliográfica e uma pesquisa de campo.

A pesquisa bibliográfica consistirá na análise dos principais artigos relevantes sobre o tema. Serão realizadas leituras e avaliações de artigos científicos, com o intuito de compreender as técnicas propostas por outros pesquisadores para melhorar a eficiência energética na fusão do aço. Essa análise teórica, embasada em pesquisas bibliográficas, permitirá obter uma base sólida e atualizada sobre o assunto.

Paralelamente, será realizada uma pesquisa de campo com base no projeto "Redução do Consumo de Energia Elétrica do FEA". Essa pesquisa de campo será conduzida em uma usina siderúrgica localizada em Juiz de Fora/MG. Serão coletados dados estatísticos e informações diretamente da usina, com o objetivo de compreender as práticas e os processos utilizados na realidade. Serão analisadas as etapas dos processos de fusão do aço, com especial atenção para a utilização de gusa líquido e energia química no forno. Será avaliado o impacto dessas modificações nas etapas do processo no consumo de energia elétrica.

A combinação dessas duas abordagens visa identificar e propor soluções eficientes para aprimorar a eficiência energética na fusão do aço, contribuindo para a sustentabilidade e o desempenho das indústrias siderúrgicas. Além disso, o trabalho busca aprimorar o conhecimento sobre eficiência energética no setor siderúrgico, contribuindo para o desenvolvimento profissional e a compreensão dos desafios enfrentados pelas empresas do ramo.

## **2- Referencial teórico**

Para a elaboração da pesquisa realizada, foram utilizados estudos acerca da otimização do processo de fusão do aço e da redução do consumo de energia elétrica pelo forno elétrico a arco (FEA). A seguir serão discutidos alguns tópicos relevantes sobre o tema.

### **2.1- Produção do aço**

De acordo com o Instituto Aço Brasil (2015), existem basicamente duas rotas tecnológicas para a produção de aço: a utilização majoritária de minério de ferro com uma pequena proporção de sucata metálica (usinas integradas) e a utilização principalmente de sucata como matéria-prima (usinas semi-integradas).

Nas usinas integradas, o aço é produzido a partir do minério de ferro, utilizando o carvão (mineral ou vegetal) como agente redutor nos altos fornos para obtenção do

ferro metálico, que é o principal componente na produção do aço. (INSTITUTO aço Brasil, 2015). Portanto essas usinas integradas passam por três fases básicas de produção: redução, refino e laminação. Já as usinas semi-integradas não possuem a etapa de redução, pois utilizam sucata de aço e ferro-gusa para alimentar as Aciarias elétricas, logo, elas operam somente as fases de refino (por meio do Forno Elétrico a Arco - FEA) e laminação. O fluxo de produção das usinas semi-integradas é inferior em comparação com as usinas integradas, uma vez que a produção de ferro-gusa não é realizada nas usinas semi-integradas. A carga utilizada no FEA para a produção de aço, neste caso, é composta por sucata metálica, ferro-gusa sólido e/ou líquido, ligas metálicas, cal (CaO) e finos de coque (carbono). Para evitar elementos indesejáveis, é necessário um controle rigoroso da carga metálica.

Nos dias atuais, destaca-se que o FEA tem sido o responsável pela produção de um terço de todo o aço no mundo, sendo importante enfatizar que a produção do aço neste equipamento é influenciada por diversos fatores, sendo os principais o consumo de energia elétrica, preço da sucata e o consumo de eletrodos (CHEN et al., 2018).

Considerando-se a importância do aço para a sociedade em termos de desenvolvimento socioeconômico, é impossível imaginar um mundo sem o seu uso. A produção de aço é um indicador significativo do desenvolvimento econômico de um país, visto que seu consumo aumenta proporcionalmente ao crescimento econômico, como evidenciado na construção de edifícios, obras públicas, instalação de meios de comunicação e produção de equipamentos, entre outros. No entanto, a fabricação do aço requer técnicas e conhecimentos que devem ser constantemente analisados e aprimorados, o que justifica os altos investimentos das siderúrgicas em pesquisas. O processo de otimização da fusão do aço representa grandes desafios e conquistas para a sociedade como todo (INSTITUTO aço Brasil, 2015).

No Brasil, a produção de aço encontra-se atualmente em crescimento com comparação ao mesmo período de 2017, refletindo os avanços na indústria siderúrgica. De acordo com o Instituto Aço Brasil (2015), a produção nacional de aço bruto alcançou 26,1 milhões de toneladas no acumulado até setembro de 2018, representando um aumento de 2,5% em relação ao mesmo período do ano anterior.

## 2.2- Forno elétrico a arco

A história do FEA (Forno Elétrico a Arco) como exemplo Figura 1, remonta ao início do século XIX, quando foram realizados experimentos para utilizar o arco elétrico no derretimento do ferro. Segundo Gomes (2012), Wilhelm Siemens foi pioneiro ao fundir aço pela primeira vez utilizando um arco voltaico em um pequeno cadinho, porém, as experiências tinham caráter científico devido ao alto custo da energia elétrica na época. Posteriormente, em 1888, Paul Louis Toussaint Héroult patenteou um forno elétrico a arco, e em 1898, Emilio Stassano experimentou a redução de minério de ferro utilizando o arco indireto. Desde então, reconheceu-se as vantagens do forno elétrico na produção de aços de qualidade, permitindo o controle da temperatura do banho e das condições de oxidação e redução da escória. Atualmente, os fornos elétricos desempenham um papel fundamental na produção mundial de aço, sendo responsáveis por mais de 30% de toda a produção global desta liga metálica, inclusive na produção de aços comuns em mini-usinas. (GOMES, 2012).

**Figura 1:** Imagem Forno elétrico a arco.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2023.

Atualmente, no Brasil, estão sendo estudadas melhorias no processo do FEA. Foram implementadas novas técnicas, como painéis refrigerados, sistemas de exaustão de fumos, vazamento sem escória e utilização de refino secundário, visando aprimorar a produtividade e a qualidade do produto final gerado (CÂNDIDO, 2008).

No contexto da busca por processos de fabricação com menos impacto, a flexibilidade nos tipos de carga e o aumento na produtividade dos Fornos Elétricos à Arco (FEA) têm sido os principais impulsionadores do sucesso do carregamento contínuo. É importante destacar os objetivos de reduzir o consumo de energia elétrica e os custos de produção, equilibrados com as necessidades ambientais, como a redução de emissões poluentes e ruídos excessivos (PAULA, 2017).

O FEA é um forno elétrico de corrente alternada, constituído de uma carcaça metálica refrigerada, três eletrodos de grafite, abóboda, soleira e bica de vazamento protegidas por materiais refratários, sistema de basculamento e elevação. (CÂNDIDO, 2008). A figura 1 mostra um modelo de FEA com seus respectivos componentes.

É importante ressaltar que esse tipo de forno pode ser classificado de acordo com a potência nominal instalada por tonelada de aço. Quanto maior a potência instalada, mais rápida é a corrida do ciclo de produção e, conseqüentemente, a produção do material final. No entanto, a alta potência da energia irradiada pelo arco acelera o desgaste nas paredes internas do forno, que são compostas por painéis refrigerados e refratários (CÂNDIDO, 2008).

É essencial destacar que os FEA são fornos que operam por meio da utilização de arco voltaico para fundir a carga metálica contida dentro de um reservatório isolado termicamente por material refratário. A formação do arco ocorre através do rompimento de um dielétrico, normalmente o ar, presente entre os dois condutores que apresentam uma diferença de potencial, gerando a descarga elétrica, ou seja, a passagem de corrente elétrica. No caso do forno, esse fenômeno ocorre entre os eletrodos (MAMEDE FILHO, 2001).

Segundo Betztios (1998), os convertedores FEA são aplicados em regiões com baixa disponibilidade de ferro gusa, sendo indicados para locais onde há boa disponibilidade de energia elétrica e sucata, que é sua principal matéria-prima. Os refinamentos primários FEA são chamados de fornos elétricos, que trabalham nas áreas de transformação.

Por fim, é importante mencionar que o aço produzido no FEA oferece diversas vantagens. Entre os aspectos relevantes que justificam a tendência atual de crescimento dessa alternativa de produção de aço, destacam-se:

- a) uma maior quantidade de sucata pode ser reciclada via FEA, o que é especialmente importante quando há um excedente de sucata gerada;
- b) a emissão de CO<sub>2</sub> é quatro vezes menor; e
- c) considerando o preço da energia elétrica e os custos de investimentos menores, o aço pode ser produzido de forma mais econômica (MOURÃO et al., 2008).

### **2.2.1- Operação do Forno Elétrico a Arco**

O processo de operação do FEA pode ser dividido em quatro etapas, quais sejam: o carregamento, a fusão, o refino e o vazamento.

No carregamento de um forno elétrico, é necessária uma boa estratificação do cesto e uma seleção adequada de sucatas, evitando peças com grande quantidade de contaminantes, materiais que não conduzem energia e materiais pressurizados que podem causar explosões dentro do forno. No caso de gusa sólida ou sucata de gusa, esse material deve ser colocado preferencialmente no primeiro cesto, na segunda camada de sucata na parte inferior do cesto (NASCIMENTO, 2016, p.18).

Durante o carregamento, o cesto é preenchido com a sucata proveniente do pátio de metais e transportado por uma ponte rolante para ser descarregado no interior do forno. Após o carregamento, o teto do forno, chamado de abóbada, é fechado e os eletrodos de grafite são posicionados em contato com a carga metálica. Em seguida, a energia elétrica é acionada, gerando energia térmica por meio dos arcos elétricos formados entre os eletrodos e a carga sólida. Durante o processo de fusão, à medida que o banho líquido ocupa um espaço menor no interior do forno, um segundo carregamento é feito para reiniciar o processo (RIES, 2001).

As matérias-primas básicas utilizadas são sucatas ferrosas e ligas de ferro. Os materiais são separados por família de composição, cortados e limpos nos pátios de sucatas. É importante destacar que, para evitar a presença de elementos indesejados no banho líquido, é necessário um controle especial da carga metálica no pátio de sucatas, a fim de evitar terra e outros resíduos (SILVA; MEI, 2011).

A fusão da carga ocorre por meio da radiação do arco gerado nos eletrodos de grafite (BRUCH, 2012). Essa etapa se inicia com o fechamento da abóboda e o

acionamento do disjuntor do FEA, energizando o transformador e o sistema hidráulico dos braços mecânicos. Em seguida, os eletrodos descem até que suas extremidades entrem em contato com a carga, dando início a formação dos arcos voltaicos.

Posteriormente, a máxima potência é atingida quando os arcos já penetraram na sucata, abrindo três perfurações. Dessa forma, forma-se uma barreira entre os arcos e as paredes do forno pela própria sucata, dissipando todas as irradiações na carga fundida.

O refino, entenda-se por acabamento do aço, ocorre depois da fusão e, nesta etapa, o consumo de energia é reduzido, havendo a compensação apenas das fugas de calor. A duração desta etapa depende do grau de refino do aço a ser produzido, podendo ser realizada em um pequeno espaço de tempo, certos tipos de aço, ou em intervalos de tempo maiores para aços especiais.

Ao final do refino, o aço é vazado em uma panela e está pronto para passar pelos demais processos da aciaria.

### **2.2.2- Potência ativa, corrente e tensão do arco**

O desempenho do FEA pode ser avaliado observando-se a tensão do arco, a corrente e a reatância, utilizando um circuito equivalente com seus respectivos parâmetros elétricos.

De acordo com Jaccard (2009), a potência do arco é o produto da tensão do arco pela corrente. O ângulo dessa potência depende da intensidade da corrente e da reatância do circuito, considerando uma determinada tensão entre fases.

Para controlar o tamanho do arco, é necessário controlar a posição dos eletrodos por meio de um dispositivo chamado "regulador de movimentos". A corrente fornecida está inversamente relacionada ao comprimento do arco. Quanto mais próximos os eletrodos estiverem da carga metálica, menor será o comprimento do arco e, conseqüentemente, maior será a corrente. O regulador de movimentos deve posicionar os eletrodos de forma a atingir a corrente determinada pelo programa de fusão (RIES, 2001).

### **2.2.3- Energia química**

A energia química liberada no Forno Elétrico a Arco, por meio das reações químicas dos elementos, especialmente do carbono e do oxigênio, desempenha um

papel crucial na produção de aço de alta qualidade, buscando um rendimento máximo com um consumo energético mínimo.

Durante as fases de fusão e formação de gases, ocorrem reações químicas no interior do FEA. Essas reações, juntamente com os materiais adicionados ao forno, resultam na formação da escória, que consiste em materiais não metálicos. Embora a escória seja descartada para obter o aço líquido final, ela desempenha um papel fundamental nas etapas de fusão e refino, melhorando a eficiência energética e a qualidade do aço. A escória, que possui uma consistência espumante, cria uma camada isolante que contribui para a retenção de calor, reduzindo a vibração, o ruído e o consumo de eletrodos e materiais refratários do forno. Quando o arco elétrico está coberto pela escória espumante, ele se torna mais estável, reduzindo possíveis problemas de qualidade de energia, como desequilíbrio de corrente, distúrbios elétricos e geração de harmônicas (DEHKORDI; MOALLEM; PARSAPOUR, 2011).

A quantidade total de energia química gerada no FEA e sua eficiência dependem de diversos fatores, como a capacidade e o uso de equipamentos periféricos e auxiliares. Atualmente, a participação da energia química no processo de fabricação do aço varia de 30% a 60% da energia total utilizada, o que corresponde a aproximadamente 50 a 300 kWh/t de aço vazado (OPFERMANN; RIEDUNGER, 2008).

É importante ressaltar que o uso e o controle da escória espumante trazem benefícios significativos para a produção de aço, como uma melhor transferência de calor e proteção dos materiais refratários contra a radiação direta do arco elétrico. Esse processo pode resultar em economia no consumo de energia elétrica de até 30 kWh/t e redução do consumo de materiais refratários entre 25% e 63% (LUZ et al., 2011).

#### **2.2.4- Energia elétrica**

No Forno Elétrico a Arco (FEA), a energia elétrica é utilizada para promover a fusão da carga por meio do arco elétrico. O arco elétrico é definido como a passagem contínua de corrente elétrica entre um cátodo e um ânodo em um meio gasoso ionizado. A posição do arco e o seu comprimento determinam a direção do fluxo de calor.

A tensão aplicada determina o comprimento do arco, ou seja, quanto maior a tensão, maior será o comprimento do arco. Por outro lado, a corrente elétrica define

a seção transversal do arco, sendo que uma maior seção resulta em uma maior corrente elétrica.

No que diz respeito ao consumo de energia do forno, os parâmetros elétricos de operação e a posição dos reguladores de eletrodos não têm uma influência significativa. A quantidade de energia necessária para produzir uma tonelada de aço depende de vários fatores, como o tipo de carga, o tamanho do forno, os tempos de funcionamento e parada do forno, as perdas térmicas nas refrigerações, a temperatura de vazamento, o rendimento do aço e as perdas elétricas nos condutores. As perdas elétricas consistem no único fator que está relacionado com a operação elétrica do forno (JACCARD, 2009).

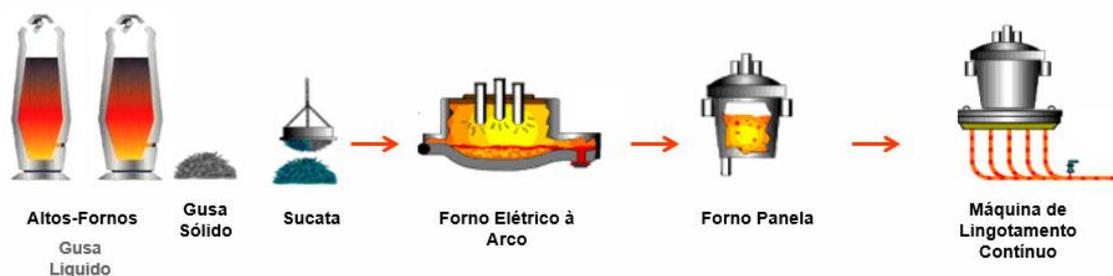
### **3- Metodologia**

A metodologia utilizada neste trabalho baseou-se na coleta de dados práticos realizada em uma usina siderúrgica localizada em Juiz de Fora, Minas Gerais. O objeto de estudo é o Forno Elétrico a Arco (FEA), situado na Aciaria da usina, com o intuito de reduzir o consumo de energia elétrica nesse equipamento.

Para iniciar o processo de pesquisa, foi realizado um benchmarking interno, que consiste na avaliação da empresa em relação à concorrência, a fim de incorporar os melhores desempenhos de outras unidades ou aperfeiçoar os próprios métodos. Essa etapa foi fundamental, uma vez que é raro encontrar usinas que operem de maneira similar à usina em estudo, tornando importante a busca por referências e boas práticas em outras empresas do setor.

Em 2007, a Siderúrgica de Juiz de Fora implantou Altos Fornos, o que resultou no fornecimento de gusa líquido para a Aciaria, conforme mostrado no fluxograma da Figura 2. Com a utilização dessa matéria-prima no estado líquido, houve uma redução significativa no consumo de energia elétrica. Em 2017, a usina atingiu um consumo de energia elétrica da ordem de 250 kWh/t (energia elétrica consumida durante o período de funcionamento do forno por tonelada de aço produzido).

**Figura 2:** Fluxograma Aciaria Siderúrgica de Juiz de Fora



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2023.

No ano seguinte, mesmo em um cenário desfavorável de produção de gusa líquido, foi iniciado um projeto com o objetivo de alcançar ganhos expressivos na redução do consumo de energia elétrica. A partir dessa iniciativa, foram realizadas análises e implementadas medidas específicas visando a melhoria da eficiência energética do FEA.

É importante ressaltar que o desenvolvimento da metodologia se baseou na análise de dados práticos coletados na usina siderúrgica, considerando o contexto específico da empresa e suas características operacionais.

### 3.1- Situação e contexto

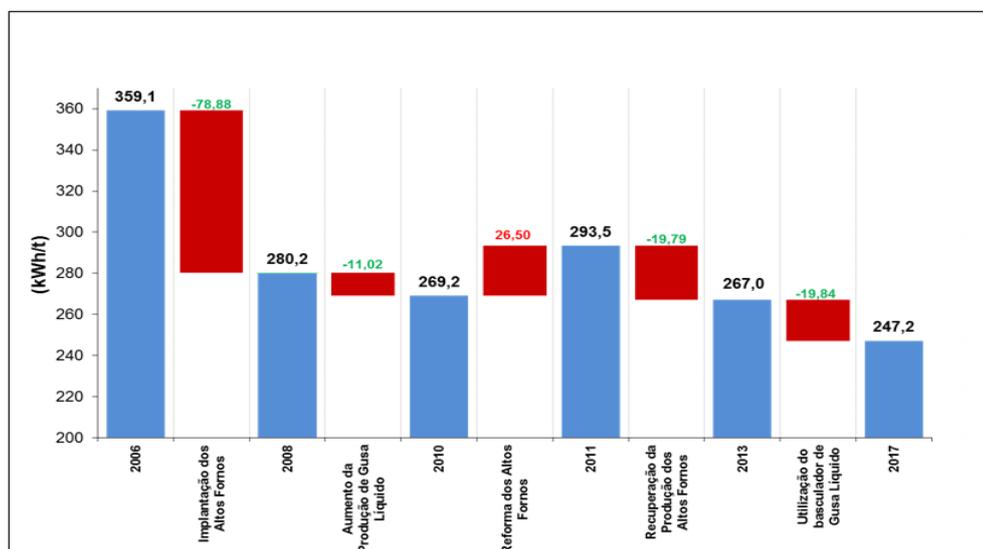
Em 2017, o consumo de energia elétrica no Forno Elétrico a Arco (FEA) atingiu o melhor valor histórico, com níveis baixos próximos a 247 kWh/t. A usina estabeleceu a meta de alcançar 246 kWh/t, mesmo sem aumentar a oferta de gusa líquido. Tais dados podem ser observados na Figura 3.

Vale destacar que até o ano de 2006 a Aciaria utilizava apenas gusa sólido, tendo um consumo médio de 359,1 kWh/t. Com a implantação do alto forno e a utilização de gusa líquido na carga, o ano seguinte houve uma queda vertiginosa no consumo de energia elétrica por tonelada de aço produzido no Forno Elétrico, chegando a 280,2 kWh/t. Nos anos seguintes houve alterações significativas no consumo de energia, devido a variação do percentual de gusa líquido disponibilizado pelo Alto Forno. Na Figura 3 podemos observar essas diferenças ano após ano, com a indicação do motivo que fez variar a quantidade de gusa líquido produzida.

No entanto, a partir de fevereiro de 2018, os Altos Fornos não conseguiram atender à produção planejada, resultando no afastamento da meta anual estabelecida. Além disso, os cenários de minério e carvão, matéria-prima dos altos fornos, não eram promissores para ajudar na recuperação do gusa líquido, o que

tornou o cumprimento da meta de consumo de energia elétrica um grande desafio para a empresa naquela época.

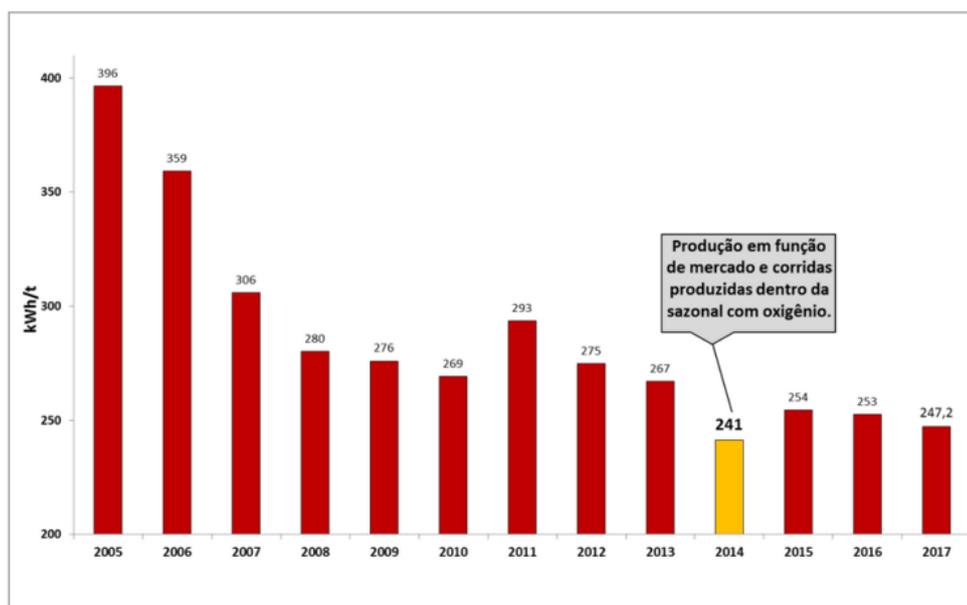
**Figura 3:** Histórico do Consumo de Energia Elétrica do FEA 2016 – 2017



**Fonte:** Elaborada pela equipe técnica da siderúrgica, 2019.

Para alcançar a meta de redução do consumo de energia, foram realizadas experiências e modificações no uso de oxigênio e energia elétrica nas fases do processo de produção do FEA. Essas ações resultaram em ganhos significativos de produtividade e economia para a empresa.

**Figura 4:** Histórico do Consumo de Energia Elétrica (kWh/t).



**Fonte:** Elaborada pela equipe técnica da siderúrgica, 2019.

A Figura 4 mostra um gráfico com o histórico dos consumos de energia elétrica entre os anos de 2005 e 2017 para a siderúrgica de referência. Após startup dos Altos Fornos em 2006, o consumo de energia foi diminuindo gradativamente ao longo dos anos sendo que o aperfeiçoamento do processo e o desenvolvimento de novos equipamentos contribuíram para que houvesse essa economia de energia. Vale destacar que o ano de 2014 foi diferenciado dos demais, pois foi utilizado o horário de sazonal, quando não há disponibilidade de energia elétrica pela concessionária, para produzir aço sem a utilização de energia elétrica, usando somente oxigênio e gás natural para produzir corridas de aço.

#### **4- Resultados e discussões**

O cerne principal do trabalho consiste na análise de técnicas que visam melhorar a eficiência energética nos processos de fusão do aço. Diante disso, após a investigação do projeto mencionado anteriormente, foram obtidos os seguintes resultados, que serão detalhados a seguir:

- a) utilização de gusa líquido;
- b) a injeção de oxigênio;
- c) a regulação do transformador de potência; e
- d) análise da eficiência da etapa do refino;

Os resultados alcançados foram abordados por meio da aplicação da fórmula de Kohle, a qual será apresentada e analisada em seguida.

##### **4.1- Utilização de gusa líquido no Forno Elétrico a Arco**

A escolha da carga metálica utilizada no Forno Elétrico a Arco (FEA) tem um impacto direto no custo final do processo, bem como no consumo de energia elétrica. Embora o uso de gusa possa aumentar o custo total da carga, sua utilização traz diversos benefícios que compensam esse aumento, tais como:

- a) excelente fonte de energia: O gusa possui teores significativos de carbono (C), silício (Si) e manganês (Mn), que podem economizar energia elétrica por meio de reações de oxidação. Esses elementos presentes no gusa reagem com o oxigênio durante o processo de fusão no FEA, liberando energia química que contribui para a fusão da carga metálica.

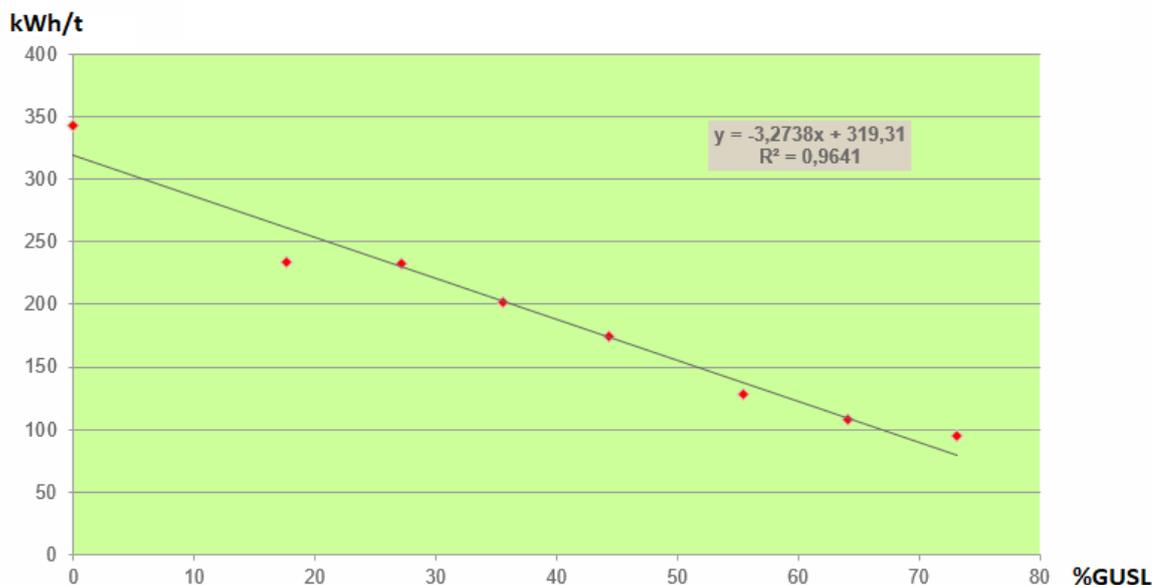
- b) redução no número de cestões utilizados: O cestão é o local de armazenamento da sucata que será adicionada ao forno para o processo de produção do aço. Cada cestão adicional utilizado no carregamento do FEA pode aumentar o consumo de energia em torno de 30 a 50 kWh por tonelada. Ao substituir parte da sucata por gusa líquido, é possível reduzir o número de cestões necessários, resultando em economia de energia elétrica e aumento do lucro da empresa.
- c) aumento da produtividade e redução do tempo de produção: A utilização de gusa líquido em vez de gusa sólido pode aumentar a produtividade e reduzir o tempo total do ciclo de produção do aço, conhecido como "Tap to tap". Isso ocorre devido à diferença na temperatura de carregamento no FEA entre o gusa sólido e o líquido. Ao utilizar gusa líquido, o tempo de fusão é reduzido, permitindo uma produção mais rápida e eficiente.

Portanto, substituir o gusa sólido pelo gusa líquido no FEA pode resultar em uma redução significativa no consumo de energia elétrica, proporcionando economia de energia, redução de custos e aumento da produtividade.

Durante o mês de junho de 2014 devido à baixa demanda de produção, tornou-se então possível utilizar gusa líquido em percentuais elevados. Houve uma queda na oferta do gusa neste estado no mercado, levando a empresa a adotar outras medidas adicionais, como reduzir o consumo deste produto em cada ciclo. Os resultados obtidos com este experimento serão apresentados, identificando oportunidades de ganhos operacionais e financeiros. A comparação será feita dentro do próprio mês de junho, considerando diferentes níveis percentuais de utilização de gusa líquido.

A Figura 5 ilustra a variação do consumo de energia elétrica com o aumento da utilização de gusa líquido. Quanto maior a utilização de gusa líquido, menor será o consumo de energia elétrica por tonelada de aço produzida.

**Figura 5:** Variação do Consumo de Energia Elétrica (kWh/t) em comparação com a variação da porcentagem de gusa líquido “GUSL” da carga metálica.



**Fonte:** Elaborada pela equipe técnica da siderúrgica, 2019.

$$Y = -3,2738X + 391,31$$

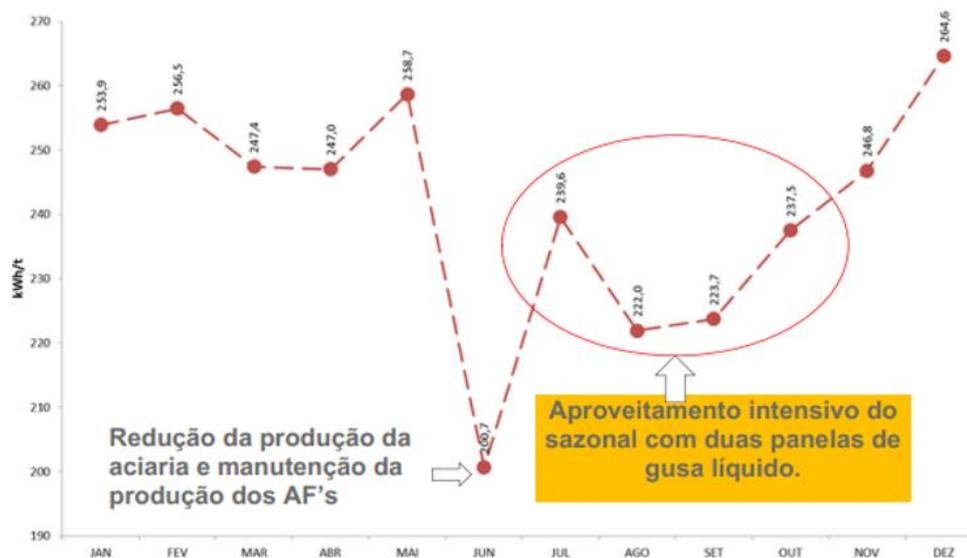
**Equação 1.**

De acordo com o gráfico da Figura 5, foi possível formular uma equação que correlaciona o consumo de energia elétrica (Y) com a porcentagem de gusa líquido (X) utilizada, como poder ser visto na Equação 1. Essa equação foi testada e apresenta grande confiabilidade, com um pequeno erro associado ao ajuste linear, o que pode ser observado ao analisar o valor da resultante [ $R^2$  (quanto mais próximo de 1, mais próximos os dados estão da regressão linear obtida)]. Os dados obtidos indicam que, a cada 1% de gusa líquido adicionado, é possível reduzir aproximadamente 3,27 kWh/t do consumo energético. Nesse caso, considera-se o efeito da energia contida no gusa (calor) e a reação exotérmica da queima do carbono.

No ano de 2014, o consumo de energia apresentou reduções significativas, alcançando níveis otimizados, devido a fatores específicos. A partir da análise de tais dados coletados, é possível apresentar a redução do consumo de oxigênio em decorrência do uso do ferro gusa líquido no FEA. Quando se utiliza o ferro gusa líquido na carga do FEA, a etapa de descarburização (oxidação do carbono) torna-se mais rápida e intensa do que quando comparada com a utilização de ferro gusa sólido, o que permite que o processo seja realizado em um intervalo de tempo menor e,

consequentemente, que as metas pretendidas pela empresa com relação a redução do consumo de energia elétrica sejam alcançadas.

**Figura 6:** Consumo mensal de energia elétrica no FEA ano de 2014.



**Fonte:** Elaborada pela equipe técnica da siderúrgica, 2019.

Através de análise dos dados do gráfico disponível na Figura 6, é possível perceber que o ano de 2014 registrou um excelente desempenho no consumo de energia graças a fatores específicos. Durante o mês de junho, houve uma sobre oferta de gusa líquido devido à redução na produção da aciaria. Já nos meses de julho a outubro, uma estratégia sazonal foi adotada para alcançar as metas de produção: durante o horário de pico, sazonal das 17h às 20h, em que a concessionária de energia elétrica não disponibiliza eletricidade, foi realizada a corrida (intervalo de produção entre o carregamento de matéria prima e o vazamento de aço líquido), total ou parcialmente com o uso exclusivo de oxigênio. Essa medida resultou em uma significativa queda no consumo de energia elétrica.

#### 4.2- A Injeção de oxigênio no Forno Elétrico a Arco

A injeção de oxigênio no Forno Elétrico a Arco (FEA) durante a etapa de refino do aço desempenha um papel crucial no fornecimento de energia e nas reações com os elementos presentes, como carbono, ferro, silício e manganês. Os equipamentos chamados "lanças" ou "injetores de oxigênio" são responsáveis por realizar essa injeção, combinando oxigênio (O<sub>2</sub>) e gás natural (GN). Além disso, esses

equipamentos pré-aquecem e cortam as sucatas, eliminando zonas frias no interior do forno.

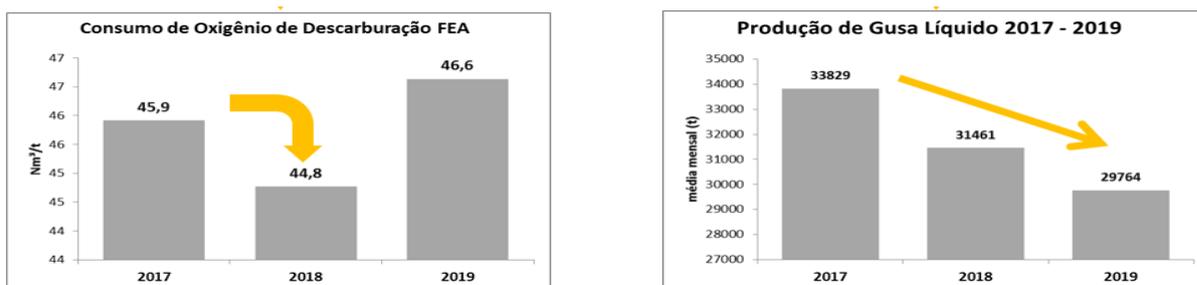
Quando uma carga de sucata é fundida, o oxigênio presente na atmosfera reage com os elementos presentes na sucata. A injeção de oxigênio auxilia nesse processo, liberando energia para facilitar a fusão da sucata. Tal processo resulta na formação de escória espumosa, especialmente quando o carbono (coque ou grafite) é injetado em escórias contendo um teor adequado de óxido de ferro (FeO) obtido pela oxidação com as lanças de oxigênio, conforme indicado na Equação 2. Essa reação entre o (C) e o (O<sub>2</sub>) gera grande quantidade de calor devido as reações químicas, aumentando a taxa de aquecimento do aço e conseqüentemente contribui para a redução do consumo de energia elétrica que seria preciso para aumentar a temperatura do aço.



A escória espumante desempenha um papel importante, reduzindo as perdas térmicas, melhorando a transferência de calor para o arco, aumentando o comprimento do arco elétrico em até 100% sem aumentar as perdas térmicas e reduzindo o consumo de eletrodos e refratários. Todos esses fatores contribuem para um maior rendimento energético.

No ano de 2018, as injetoras de oxigênio convencionais foram substituídas por injetoras supersônicas de maior potência e pressão. Esses novos modelos liberam uma maior quantidade de oxigênio quando ativados na etapa ideal do processo. Após a implementação das novas injetoras, observou-se uma redução no consumo de oxigênio no mesmo ano, fato observado na Figura 7, que era uma das metas da empresa.

**Figura 7:** Consumo de diferentes tipos de energia e produção de gusa líquido entre 2017 e 2019.



**Fonte:** Elaborada pela equipe técnica da siderúrgica, 2019.

No entanto, em 2019, o consumo de oxigênio aumentou devido à um novo período de baixa oferta de gusa líquido. Este fato está relacionado à queda na produção de gusa no mercado, conforme discutido anteriormente.

Em resumo, a troca das injetoras de oxigênio por modelos mais eficientes permitiu o uso do oxigênio de forma mais estratégica, concentrando sua aplicação na etapa ideal do processo de refino do aço, conhecida como "descarburação" ou "descarbonização", redução do conteúdo de carbono em metal, neste caso, o aço. Esta ação resultou em uma redução no consumo de oxigênio, uma vez que a quantidade utilizada na etapa de fusão, em que sua eficiência é menor, foi diminuída. O objetivo dessa abordagem foi evitar o aumento do consumo de oxigênio, garantindo um uso mais eficiente desse recurso energético.

#### **4.3- Regulagem do transformador de potência**

Durante o estudo da pesquisa apresentada, não houve alteração com relação à regulagem do transformador de potência. Todavia, é importante destacar a influência dessa fonte de energia no processo de produção de aço.

No que se refere aos transformadores, verificou-se que as correntes e tensões ideais interferem diretamente na redução do consumo de energia elétrica, foco deste trabalho. O sistema de controle do FEA possui um regulador de eletrodo, que tem como principal função manter a relação entre os valores de corrente e tensão do arco a fim de se obter uma máxima potência de operação e, conseqüentemente, um maior rendimento.

É evidente que, ao se utilizar uma alta voltagem secundária, trabalha-se com uma baixa corrente secundária e arcos longos. Arcos longos se traduzem em uma alta radiação de calor, o que proporciona uma alta taxa de transferência de calor para o banho de aço durante o processo de refino. Além disso, arcos longos permitem um ciclo de corrida mais curto (*Tap to Tap*), resultando em um menor consumo de energia.

Ao iniciar a etapa de corrida, não são utilizados arcos longos. Entretanto, à medida que as colunas de sucata se aprofundam na carga (estágio de "*boring*", perfuração da sucata), o arco deve ser alongado a fim de fundir a carga com a maior eficiência possível. Na etapa de banho plano, quando toda a carga metálica já está fundida, é necessário obter uma boa escória espumante (mencionada no tópico anterior) para preservar os painéis de carcaça superior (painéis refrigerados a água

da estrutura do forno) e para que seja aumentada a eficácia da transferência do calor do arco para o banho.

No final da corrida, quando parte da escória é removida do FEA, o arco deve ser reduzido para evitar danos aos painéis. Nesse estágio, trabalha-se com um arco intermediário entre o utilizado no início da fusão e aquele usado quando havia uma quantidade abundante de escória espumante dentro do FEA, visando minimizar o tempo necessário para essa redução.

Após a análise dos estudos e testes, conclui-se que durante o processamento no FEA, as fontes de energia têm rendimentos distintos, dependendo da fase da corrida. Logo, quando há a necessidade de utilizar uma maior quantidade de energia elétrica, ela será mais eficiente no processo de fusão. Essa conclusão ressalta a importância de ajustar e direcionar o uso da energia elétrica de acordo com as necessidades específicas de cada fase do processo no FEA, visando maximizar a eficiência energética.

#### **4.4- Análise da eficiência da etapa do refino**

Existem várias maneiras de se “perder” energia em um Forno Elétrico a Arco e tais perdas podem vir a ser altas, interferindo diretamente na eficiência do processo como um todo. Logo, destaca-se aqui que o tempo despendido durante cada etapa deve ser levado em consideração. Nesta fase é realizado o acerto de composição química do aço que será produzido.

O rendimento térmico de um Forno Elétrico a Arco é influenciado por diversos fatores, tais como a composição da carga, o tamanho do FEA, a potência entregue ao FEA, a regulagem elétrica e a prática da escória espumosa.

O rendimento térmico do forno varia entre 75% e 95% durante a etapa de fusão e entre 30% e 60% na fase do refino. Logo, a fase de refino deve ter o seu tempo reduzido ao mínimo possível, já que neste ponto, seu rendimento térmico é mais baixo em comparação às demais etapas.

Através das análises realizadas, foi possível observar que o uso de elevadas quantidades de oxigênio altera de forma substancial o balanço térmico e econômico da operação do FEA. Desta forma, podemos obter ganhos no refino como o aumento da potência útil, a utilização do maior índice possível de transmissão térmica, o aprimoramento da prática da escória espumante e a forte utilização de oxigênio a fim de se atender às metas estabelecidas pela siderúrgica.

Após analisar os resultados significativamente positivos de 2014, foi estabelecido um plano que começou em maio de 2018, visando intensificar o uso do oxigênio como a principal fonte de energia no processo de refino, além de reduzir o consumo de oxigênio no início de cada carregamento para evitar aumento no consumo total da corrida e melhorar a eficiência da injeção de oxigênio através da substituição dos injetores antigos por equipamentos com maior capacidade de dispersão em menor tempo, conforme descrito no item 4.2.

Diante dos dados de ganhos obtidos em 2014 com o uso do método sazonal, foi observado que houve um aumento do tempo da etapa de refino devido à maior disponibilidade de gusa líquido, o que permitiu maximizar o uso do oxigênio. Com base nesses resultados, o procedimento adotado durante o horário de parada sazonal passou a ser implementado em menor escala durante todas as corridas em que houvesse disponibilidade de oferta de gusa líquido. Isso possibilitou aproveitar melhor os benefícios do método, mesmo em períodos não sazonais.

Por meio das experiências realizadas, adotou-se a prática de desligar a energia elétrica durante parte da etapa de refino, aproveitando apenas a energia térmica do oxigênio e das reações químicas. Isso permitiu que o FEA produzisse a mesma capacidade de aço utilizando menos energia elétrica, o que é um ponto de destaque significativo. A análise dos rendimentos das fontes de energia de acordo com as etapas do processo de produção do FEA pode ser observada na Tabela 1, elaborada pela equipe técnica da siderúrgica em 2019.

**Tabela 1:** Análise dos rendimentos das fontes de energia de acordo com as etapas do processo de produção do FEA.

Rendimento da fonte de Energia		
Fonte	Fases	
	Fusão	Refino
Energia Elétrica	↑	↓
Queimador	↑	↓
Pós combustão	↑	↓
Oxigênio	↓	↑

**Fonte:** Elaborada pela equipe técnica da siderúrgica, 2019.

Foi constatado que as fontes de energia têm rendimentos distintos dependendo das fases de refino ou fusão, o que reforça a importância de ajustar e direcionar o uso das fontes de energia de acordo com as necessidades específicas de cada etapa do processo, visando otimizar a eficiência energética.

#### 4.5- Resultados alcançados: uma abordagem do projeto através da fórmula de Köhle

A fórmula desenvolvida por Köhle (2002) foi aplicada para calcular a energia elétrica demandada por um forno elétrico a arco com capacidade de cerca de 100 t/corridas. Essa fórmula leva em consideração diversos parâmetros, como consumo de gases (O<sub>2</sub> e GN), composição da carga fria e tempos de processamento da corrida.

A Equação 3, proposta por Köhle (2002), é utilizada para calcular a energia elétrica demandada por tonelada de aço produzida. No entanto, é importante observar que os coeficientes presentes na equação podem variar para fornos de diferentes capacidades. Ainda assim, a fórmula é útil para compreender a influência de cada elemento no consumo final de energia.

**Equação 3:** Fórmula de consumo de energia elétrica por tonelada em Fornos Elétricos de 100t.

$$\text{kWh/t} = 300 + 900 \times \left[ \frac{G_E - 1}{G_A} \right] + 1600 \times \frac{G_Z}{G_A} + 0,7 \times (T_a - 1600) + 0,85 \times P_{On} - 8 \times M_g - 4,3 \times M_i - \frac{350 \times G_{HM}}{G_a} + E_{Perdas}$$

**Fonte:** Elaborada por Köhle (2002).

As variáveis a seguir influenciam nos valores finais da energia a ser calculada.

- GE = peso da carga metálica carregada;
- GA = peso do aço líquido vazado;
- GZ = peso dos formadores de escória (CaO e CaOMgO);
- Ta = temperatura de vazamento do aço em °C;
- POn = tempo em que o forno está ligado em minutos (Power-On);
- Mg: consumo de gás queimador em Nm<sup>3</sup>/t;
- Mi: consumo de oxigênio por lança em Nm<sup>3</sup>/t; e
- GHM: peso de gusa líquido.

A equipe técnica da siderúrgica reescreveu a fórmula de Köhle de acordo com o processo em estudo aplicado pela mesma em suas instalações, o que resultou na expressão apresentada na Equação 4. Nessa equação, WR representa a energia elétrica específica demandada para produzir 1 tonelada de aço, C é uma constante (375 kWh/t), WQ é a soma das energias relacionadas à carga, WF é a soma das energias químicas utilizadas e WL é a soma das perdas energéticas.

**Equação 4:** Fórmula Köhle reescrita.

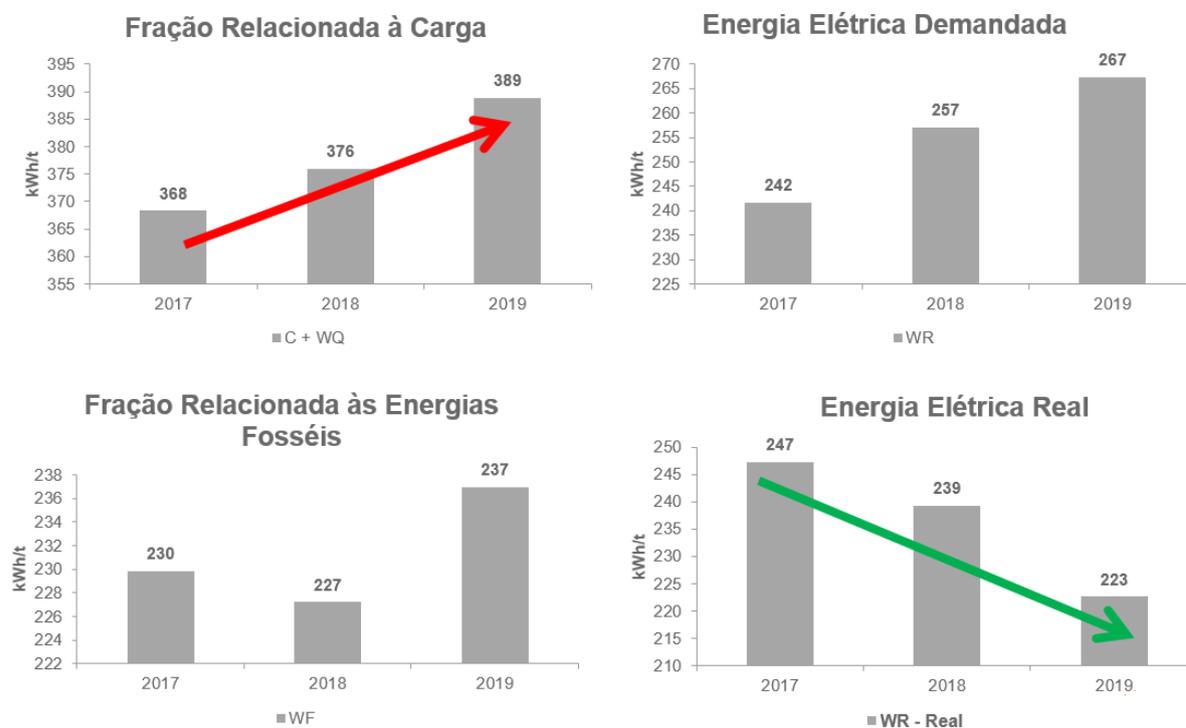
$$WR = C + WQ - WF + WL:$$

WR	C	WQ			
--					
$\frac{W_R}{\text{kWh / t}} = 375 + 400 \cdot \left[ \frac{G_E}{G_A} - 1 \right] + 80 \cdot \frac{G_{DRI/HBI}}{G_A} - 50 \cdot \frac{G_{Shr}}{G_A} - 350 \cdot \frac{G_{HM}}{G_A} + 1000 \cdot \frac{G_Z}{G_A}$					
$+ 0.3 \cdot \left[ \frac{T_A}{^\circ\text{C}} - 1600 \right] + 1 \cdot \frac{t_S + t_N}{\text{min}}$		$- 8 \cdot \frac{M_G}{\text{m}^3/\text{t}} - 4.3 \cdot \frac{M_L}{\text{m}^3/\text{t}} - 2.8 \cdot \frac{M_N}{\text{m}^3/\text{t}}$		$+ NV \cdot \frac{W_V - W_{Vm}}{\text{kWh / t}}$	
		WF		WL	

**Fonte:** Elaborada pela equipe técnica da siderúrgica, 2019.

- **WR** = energia elétrica específica demandada para fazer 1t de aço;
- **C** = constante que vale 375 kWh/t;
- **WQ** = soma das energias relacionadas com a carga;
- **WF** = soma das energias químicas utilizadas; e
- **WL** = soma das perdas energéticas.

A Figura 8 mostra a variação das frações de energias observadas no forno elétrico a arco da siderúrgica durante o período de 2017 a 2019, considerando os cálculos das variáveis da equação de Köhle reescrita. É possível observar a evolução das somas de energia ao longo do tempo. O primeiro gráfico é a fração relacionada a carga, era previsto o aumento do kWh/t devido as mudanças de carga, conseqüentemente a demanda de energia seria maior como pode ser visto no segundo gráfico. A fração relacionada às energias fosseis (oxigênio e gás natural) sofreram pouca variação neste período, mas no final houve uma queda na energia elétrica real utilizada.

**Figura 8:** Variações de somatórios de energias entre 2017 e 2019.

**Fonte:** Elaborada pela equipe técnica da siderúrgica, 2019.

Com as mudanças no processo, a quantidade de energia elétrica real gasta para produzir uma tonelada de aço caiu de 247 kWh/t para 223 kWh/t entre os anos de 2017 e 2019, gerando uma economia de 14 kWh/t, com a produção média de 82.000 toneladas de aço produzidas por mês, houve uma economia de 1.147.971,32 kWh mensal. A empresa mantendo esta média de consumo de energia e o valor do kWh de demanda próximo de R\$0,40, haverá uma economia próximo de 5,5 milhões de reais anuais. Os resultados podem ser vistos na Tabela 2.

**Tabela 2:** Resultados econômicos de energia dos anos de 2017 e 2019

Produção (t)	82000 t	
	kWh/t	kWh Média mensal
Consumo Energia FEA (Ano 2017)	247,04	19.447.444,10
Consumo Energia FEA (Ano 2019)	223,17	18.299.482,82
Diferença (Economia)	14	1.147.971,32

**Fonte:** Tabela Elaborada pelo autor.

A estratégia adotada para reduzir o consumo de energia elétrica foi a diminuição da quantidade de energia elétrica injetada no refino, através da priorização

do uso do oxigênio neste processo, que confere um rendimento maior para esta etapa, o que resultou na redução das perdas totais de energia, conforme mostrado na Figura 9. Estes valores de perdas estão associados com a diferença entre a fração relacionada a carga, ao somatório da fração relacionada aos fósseis e a energia elétrica real consumida.



**Fonte:** Elaborada pela equipe técnica da siderúrgica, 2019.

Com base em todos os resultados apresentados, fica evidente que a redução das perdas energéticas está diretamente relacionada à diminuição do consumo de energia elétrica. Portanto, adotar práticas que visam diminuir as perdas energéticas é fundamental para alcançar a eficiência energética desejada, como demonstrado pela equipe técnica da siderúrgica.

## 5- Conclusão

A pesquisa realizada buscou destacar a importância da eficiência energética no Forno Elétrico a Arco de uma usina siderúrgica. A análise dos dados de consumo de energia elétrica nos anos de 2018 e 2019 revelou que a utilização de gusa líquido, a implementação de injetoras supersônicas e a prática de desligar a energia elétrica durante o refino são estratégias eficazes para reduzir o consumo de energia durante o funcionamento do FEA.

A utilização de gusa líquido como fonte de energia mostrou-se benéfica devido à sua composição química rica em carbono e silício, que são elementos base para a produção do aço, além de proporcionar uma maior produtividade e redução do tempo de produção. A implementação das novas injetoras supersônicas contribuiu para a diminuição das perdas térmicas, reduzindo a quantidade de energia elétrica necessária.

A adoção da prática de desligar a energia elétrica durante o refino e aproveitar a energia térmica do oxigênio e das reações químicas demonstrou ser uma estratégia eficiente para aumentar o rendimento energético nessa etapa do processo. Além disso, a regulação adequada do transformador de potência permitiu maximizar sua eficiência, utilizando correntes e tensões ideais em cada etapa do processo de fusão do aço.

A análise da fórmula de Köhle confirmou que diversos elementos e seus componentes influenciam no consumo de energia elétrica do Forno Elétrico a Arco, em especial, cabe destacar a importância da carga metálica, do consumo de oxigênio por lança e do peso de gusa líquido ao longo da execução de todas as etapas do processo, a fim de garantir maximização da eficiência energética.

Por fim, sugere-se como pesquisa futura a investigação e aprimoramento do sistema SVC (Sistema de Compensação de Energia Reativa) atualmente instalado na usina, com o objetivo de corrigir de forma ainda mais eficiente o fator de potência ao longo de todo o processo produtivo da Aciaria. Isso pode resultar em uma maximização ainda maior da eficiência energética nos processos de fusão do aço, proporcionando redução de custos e aumento dos lucros para a usina siderúrgica.

#### **Referências Bibliográficas:**

CÂNDIDO, M. R. *Aplicação da transformada Wavelet na análise da qualidade de energia em fornos elétricos a arco*. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.

CHEN, C. et al. *Energy consumption modelling using deep learning technique - a case study of EAF*. Procedia CIRP, Cambridge, v. 72, p. 1063–1068, 2018.

DEHKORDI, B.; MOALLEM, M.; PARSAPOUR, A. *Predicting foaming slag quality in electric arc furnace using power quality indices and fuzzy method*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 60, n. 12, p. 3845–3852, 2011.

GOMES, R. *Análise energética de um forno elétrico a arco de 40 T utilizando gusa líquido*. 2012.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M.; DOS REIS, L. B. *Energia e meio ambiente*. 4. ed. São Paulo: Cengage, 2011. 708 p.

INSTITUTO aço brasil. *Processo siderúrgico*. 2015 Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>. Acesso em: 15 nov. 2022.

OPFERMANN, A; RIEDINGER, D. *Energy efficiency of Electric Arc Furnace: Badische Stahl Engineering GmbH. Germany, 14p.*

PAULA, M. S. de. *Método de carregamento de forno elétrico a arco: Consteel versus processo convencional.* 2017. 39 p. Monografia. (Graduação em Engenharia de Produção). Fundação Universitária Vida Cristã, 2017

KOHLE, S. *Recent improvements in modeling energy consumption of electric arc furnaces.* In: 7th European Electric Steelmaking Conference 2002, Proceedings - p1305-1314.

LUZ, A. P. et al. *Slag foaming: fundamentals, experimental evaluation and application in the steelmaking industry.* Refractories World Forum, v. 3, n. 2, p. 91–98, 2011.

MAMEDE FILHO, J. *Instalações Elétricas Industriais.* 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos, 2001.

MOURÃO, M. B. et al. *Curso de Auto- redução Carbo-metalotérmica.* 7º Simpósio Brasil – Japão, 2008

NASCIMENTO, L.M. *Comparações de Rotas Siderúrgicas.* REDEMAT. Ouro Preto. 2016.

JACCARD, L. R. *Operación del Horno Eléctrico de Arco.* Curitiba, p. 10. 2009

RIES, W. *Fornos a arco análise e projeto do sistema elétrico.* 1. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2001.

SILVA, A. L. V. DA C.; MEI, P. R. *Aços e ligas especiais.* 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011. 664 p.

U.S. environmental protection agency. *Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the U.S. iron and steel industry.* Disponível em: [https://www.energystar.gov/ia/business/industry/Iron\\_Steel\\_Guide.pdf](https://www.energystar.gov/ia/business/industry/Iron_Steel_Guide.pdf). Acesso em: 15 novembro. 2022.