
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO FORNO A INDUÇÃO – CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – UNISOCIESC / CAMPUS MARQUÊS DE OLINDA JOINVILLE

FLORENTINO, Djonathan Resendes ¹

TOLEDO, Rafael Fernandes de ²

FILHO, Carlos Roberto da Silva ³

OLIVEIRA, Solange Alves Costa Andrade de ⁴

RESUMO

Foi aplicado uma melhoria no setor da fundição, que tem como principal objetivo a eficiência dos fornos a indução. O começo dessa implementação, foi a partir da melhoria de sistema de pesagem, que anteriormente não havia nenhum tipo de controle, onde como consequência, o operador poderia pesar a quantidade que desejasse. Com a melhoria, o técnico responsável insere a pesagem correta em um supervisor que aparecerá para o operador através da IHM, no qual na hora do abastecimento, não consegue ultrapassar a pesagem solicitada, uma vez que, o programa irá bloquear, não permitindo ir carga em excesso para os fornos. Na parte do forno fusor, foram implementados dois displays e uma coluna luminosa, onde o operador poderá ver através de um display, potência do forno e tempo de fusão. Com a coluna luminosa, ele identifica que o forno está em baixa potência, uma vez que a mesma estiver na cor verde, e quando se encontrar em vermelho, ele saberá que está no final da fusão, fazendo com que assim, o operador desligue e bascule o forno, ganhando alguns minutos para iniciar a próxima fusão e assim economizando energia.

Palavras-chave: Forno, fusão, eficiência energética e peso.

ABSTRACT

An improvement was applied in the foundry sector, whose main objective is the efficiency of induction furnaces. The beginning of this implementation was from the improvement of the weighing system, which previously did not have any type of control, where as a consequence, the operator could weigh as much as he wanted. With the improvement, the responsible technician enters the correct weighing in a supervisory that will appear to the operator through the HMI, in which at the time of refueling, he cannot exceed the requested weighing, since the program will block, not allowing the load to go in excess to the ovens. In the part of the fuser furnace, two displays and a luminous column were implemented, where the operator can see, through a display, the furnace power and melting time. With the luminous column, it will identify that the furnace is at low power, once it is in green color, and when it is in red, it will know that it is at the end of the fusion, thus causing the operator to switch off and tilt the oven, saving a few minutes to start the next melting and thus saving energy.

Keywords: Oven, melting, energy efficiency and weight.

¹Djonathan Resendes Florentino do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário UNISOCIESC, djonathan-95@hotmail.com; ²Rafael Fernandes de Toledo do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário UNISOCIESC, rafafertoledo@gmail.com; ³Carlos Roberto da Silva Filho: Mestre, Centro Universitário UNISOCIESC, carlos.silva@unisociesc.com; ⁴Solange Alves C. Andrade: Mestra, Centro Universitário UNISOCIESC, solange@unisociesc.com.br

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Brasileira de Fundição (ABIFA, 2021), o Brasil vem a três anos seguidos com um crescimento na produção de fundidos, como prova disso, só em 2019 houve uma produção de 2,28 milhões de toneladas ao total. Sabe-se que para toda essa demanda produzida, existem vários cenários nas indústrias de fundição.

De acordo com alguma pesquisa, é notável que muitas ainda utilizam trabalhos manuais, sem algum tipo de controle, o que acaba tornando todo processo com muito risco de variação. Conseqüentemente, a falta de controle pode acarretar em uma perda de até 50% da energia no final do produto.

Dentre os principais objetivos deste trabalho encontram-se:

- a) Implementação da comunicação Ethernet IP no sistema;
- b) Apresentar a programação, confecção do supervisor e do Controle Lógico Programável (CLP);
- c) Aperfeiçoamento do controle de pesagem dos materiais;
- d) Estabelecer métodos de indicadores de desempenho eficiência energética
- e) Cálculo do Chave de performance do indicador (*Key Performance Indicator - KPI*) considerando uma carga de 4 toneladas;
- f) Implementação visual do término da fusão;
- g) Apresentação do gráfico de fusão tradicional e otimizada;
- h) Quadro comparativo entre a fusão tradicional e otimizada.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROCESSO DE FUSÃO DO METAL

O processo de fusão dos metais é uma das principais partes das indústrias de fundição, e tem como finalidade a produção de peças fundidas. Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME, 2015), o Brasil encontra-se no sétimo lugar entre os dez maiores produtores de materiais fundidos do mundo.

Durante a fusão, a composição química é uma das etapas que se deve ter um controle rigoroso, para não afetar a qualidade do produto. Assim, para garantir a composição exata, existe a necessidade do conhecimento das composições e purezas, também a distribuição homogêneas, dissoluções completas e minimização das perdas por reações químicas (Oliveira *et all* , 2018).

A ocorrência de erros em qualquer fase do processo de produção de uma peça, seja na construção do modelo, preparação do molde, fusão e lingotamento da peça, resultará em rejeição total da peça fabricada, desfavorecendo a fundição do ponto de vista econômico (SANTANA, 2016).

Existem variáveis importantes no processo de fusão do metal, mas as mais importantes seriam, a temperatura do forno, a composição química do fundido e a correção da mesa (HERMENEGILDO, 2011).

O processo de fusão do metal, é a parte mais quente da fundição, devido a alta temperatura gerada para derreter o metal através da agitação dos elétrons até que vire líquido. Esse metal é fundido no forno a indução que possui um refratário resistente a temperaturas maiores que a da fusão do metal (WEISS, 2012).

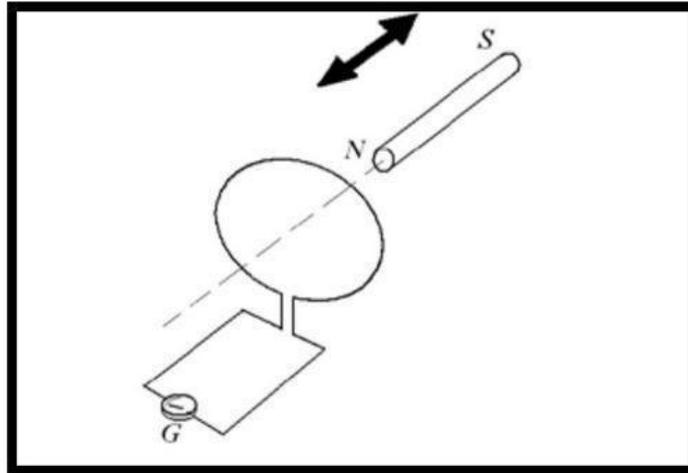
2.2 INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A indução eletromagnética começa com a descoberta, onde a corrente elétrica poderia produzir um campo magnético, no qual Michael Faraday trabalhou por 10 anos, e por volta do ano de 1831 obteve sucesso (HAYT e BUCK, 2013).

Foi descoberto que, um campo magnético pode criar uma corrente elétrica, denominada como corrente elétrica induzida, onde o efeito se origina como indução eletromagnética (OLIVEIRA e SANTOS, 2015).

Faraday, para realizar um dos seus experimentos, conforme representado pela Figura 1, produziu uma bobina de cobre, e conectou seus terminais ao galvanômetro (equipamento utilizado para indicar corrente elétrica). Com um ímã em forma de barra, ele ficou exercendo uma movimentação por dentro da bobina, desta forma ocasionando a geração de um campo elétrico (OLIVEIRA e SANTOS, 2015).

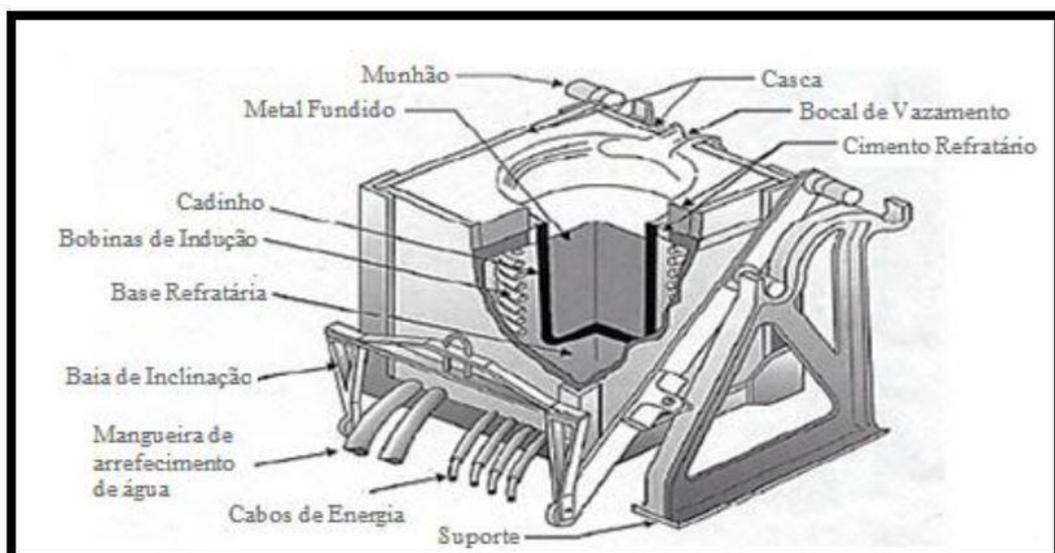
Figura 1- Experimento de Faraday



Fonte: OLIVEIRA e SANTOS (2015).

A Figura 2, nos mostra o esquema de um forno por indução, onde, o metal a ser fundido é colocado em um cadinho e em torno deste, enrolado em um fio condutor. A corrente que circula no fio é alternada, assim o campo magnético produzido varia com o tempo, produzindo correntes parasitas no metal, e a energia elétrica convertida em energia térmica, aumentando sua temperatura (JUNIOR, 2016).

Figura 2 - Esquemático do forno à indução



Fonte: Adaptado de JUNIOR (2016)

2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO ABASTECIMENTO NO FORNO DE INDUÇÃO

A eficiência dos fornos pode sofrer perdas, pois existem fatores que contribuem para essas perdas. Existem perdas no processo de produção, onde muitas das vezes são características do próprio processo. Também existem perdas provocadas pela má operação no carregamento, e o ajuste para capacidade correta (CUSA, 2018).

Para minimizar estas perdas, existem maneiras que podem ser incorporadas no processo, como, manter o equipamento sempre em boas condições, neste caso o refratário, umas das peças chave que mantém o calor. Outro ponto, é manter um intervalo de interrupção menor entre uma fusão e outra, tendo um melhor aproveitamento do calor gerado para o próximo abastecimento (CUSA, 2018).

2.4 COMUNICAÇÃO ETHERNET IP

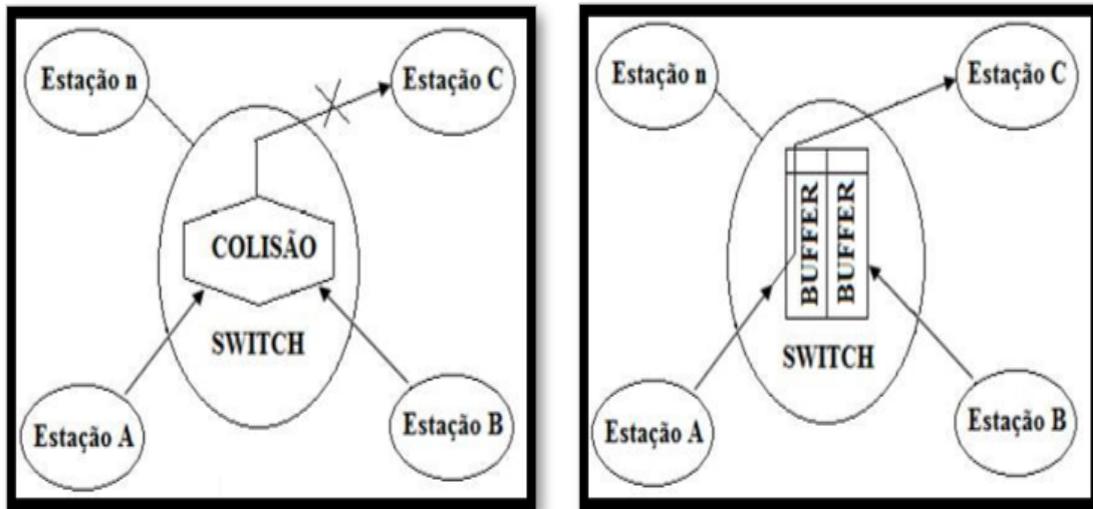
Cada vez mais, há um aumento quanto ao uso de internet nas indústrias, seja para comunicação pessoal, ou para comunicação entre as máquinas. Segundo a Revista Automação (2019), os números das pesquisas indicam uma movimentação de US \$83,5 bilhões em 2018, com previsão de alcançar próximo dos US \$174,5 bilhões em 2025. Mas isso a tempos atrás, não era uma notícia muito aceitável, visto que, sua colocação no chão de fábrica era de certa maneira “bloqueada”. O ambiente pesado, com diversas interferências, era considerado inapropriado (Serpa, 2011).

Porém, para se atingir maiores resultados, e obter controle em tempo real, o ambiente fabril foi se adaptando, e obteve melhorias nas redes ethernet, e tudo isso deve-se ao uso dos *switches*, responsáveis pela melhor eficiência na transmissão das mensagens diretamente para seus destinos (Serpa, 2011).

A comunicação passou por mais melhorias, quando foi desenvolvido os *switches* com *buffer*, com função de estocar as mensagens e enviar para o destino correto (Serpa, 2011).

Abaixo na Figura 3, uma representação dos *switch* com e sem *buffer*:

Figura 3 - Comunicação dos switch



a) Switch com colisão de mensagem

b) Switch com destino correto

Fonte: SERPA (2011)

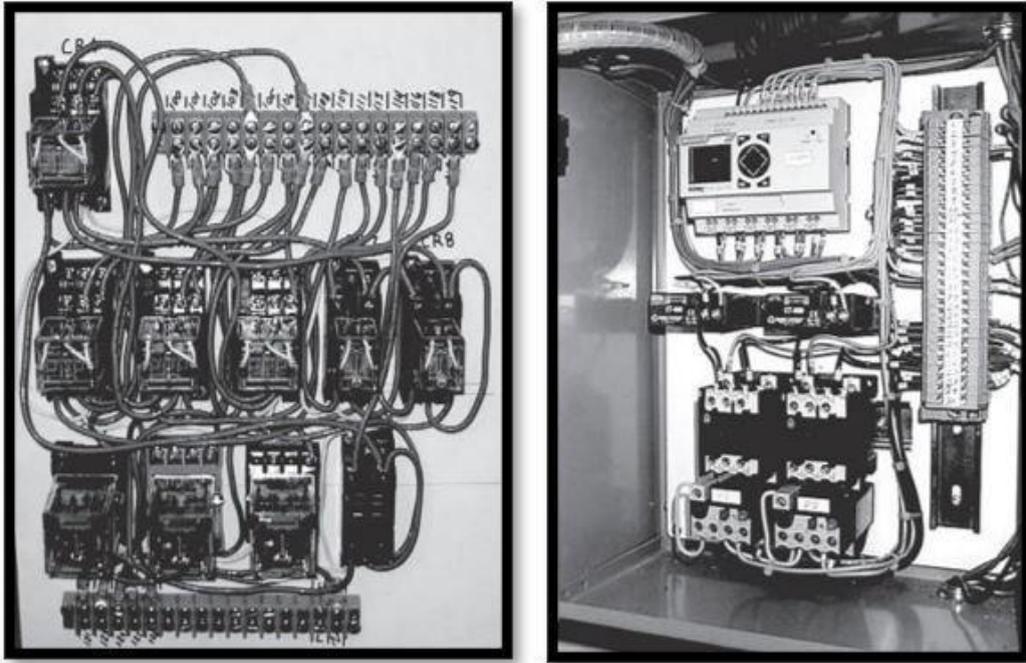
2.5 PROGRAMAÇÃO DE CIRCUITOS LÓGICOS PROGRAMÁVEIS (CLP)

Hoje quando se fala de automação nas indústrias, logo subentende-se que existirá um controlador lógico que receberá informações (dados de entrada) e que executará uma ou mais saídas. Isso graças à General Motors, que desenvolveu o CLP em 1968, devido a grande dificuldade de mudar a lógica de controle dos painéis de comando a cada mudança na linha de montagem (RIBEIRO, 2016).

Vantagens do CLP em comparação aos relés, seria que os relés precisam ser instalados para executar uma função específica e quando o sistema necessita de uma modificação, os condutores do relé precisam ser modificados. Já o CLP's, a maior parte desse trabalho com fiação foi eliminada, além disso, ele tem dimensões e custo reduzidos. Sistemas de controles modernos ainda incluem relés, porém são raramente utilizados para a lógica (PETRUZELLA, 2014).

Logo abaixo na Figura 4 é possível ver a diferença entre um painel com relés e outro com CLP:

Figura 4 - Painel automatizado com CLP



a) Painel com relés

b) Painel com CLP

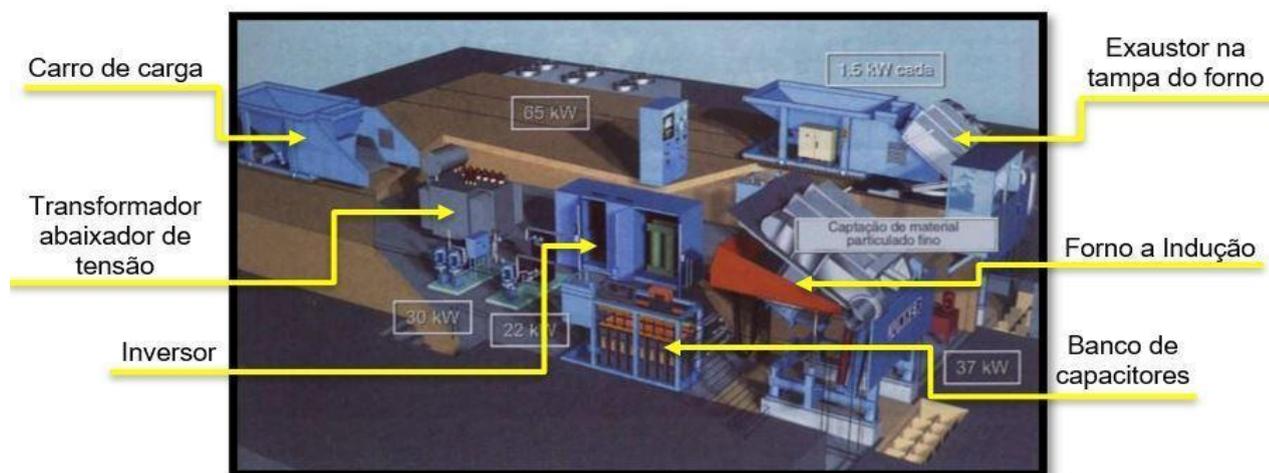
Fonte: PETRUZELLA (2014)

2.6 A INFLUÊNCIA NO CONSUMO DEVIDO AO MODO DE OPERAÇÃO NO FORNOS DE INDUÇÃO

Para que haja a fusão de ferro, em média é consumido 700 kWh por tonelada, mas pode ser reduzido utilizando novas tecnologias. A partir delas é possível registrar peso exato, tempo necessário de fusão, cálculo de materiais e a quantidade de energia necessária para todo este processo (JUNKER, 2006).

Não se pode deixar de mencionar, que as perdas energéticas de toda instalação não está somente relacionada ao grande consumo dos fornos, mas sim, de toda somatória de todo o processo que envolve a indústria de fundição. Todos os dispositivos consomem energia, como unidades hidráulicas, bombas de arrefecimento, dispositivos de cargas para os fornos, entre outros, conforme pode-se notar na Figura 5 (JUNKER, 2006).

Figura 5 - Equipamentos auxiliares de uma fusão indutiva e seus consumos



Fonte: Adaptado JUNKER (2006)

As novas fundições já estão optando por usar fornos por indução, onde apresentam uma melhor eficiência, reduzindo o consumo, uma vez que, se pode ter um melhor controle no processo, evitando perdas (Hermann e Kroes, 2010).

2.7 EQUAÇÃO POLINOMIAL

As equações usadas atualmente, tiveram suas primeiras definições descobertas pelo trabalho de Isaac Newton entre os anos 1642 e 1727, e Gottfried Wilhelm Leibniz, de 1646 a 1716. Tempo depois, Jean Bernoulli entre 1667 e 1748 adota nomenclatura de Leibniz para a função de "x". E por volta do ano de 1707, Leonard Euler trouxe muita contribuição com seus estudos, onde teve a contribuição para a linguagem simbólica e notações das funções, que são utilizadas até hoje. Ele criou a notação $f(x)$, que atualmente tem utilização universal para expressar a lei de uma função (MATTOS, 2017). Existem alguns softwares matemáticos, que por sua vez utilizam estas funções para seus cálculos, um dos mais usados atualmente é o Geogebra.

Consegue-se definir uma equação polinomial, como uma expressão algébrica formada pela soma de monômios, que por sua vez, está estruturado com um

número, sendo coeficiente (a), e uma variável, sendo (x), elevado ao expoente (n), tendo a expressão ax^n (MARQUES, 2017).

Na equação abaixo, pode-se descrever um polinômio como sendo:

$$a_0 + a_1x + a_2x^2 \dots + a_nx^n \quad (1)$$

As equações polinomiais estão dispostas em inúmeros graus, mas o foco está na equação de segundo grau, onde pode ser dado pela equação abaixo:

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (2)$$

Onde letra “a” seria a concavidade da parábola vista graficamente, a letra “b” de o tipo de inclinação da curva do gráfico, e a letra “c” é o ponto onde a parábola corta o gráfico verticalmente (eixo y) (Souza *et all*, 2017).

2.8 INDICADOR KPI

KPI é uma sigla da junção de três palavras da língua inglesa *Key Performance Indicator*, que em português significa Indicador Chave de Desempenho. Esse indicador tem como objetivos três principais ações que são: o alinhamento e a ligação entre as ações da organização, melhorar o desempenho em todo processo e criar um maior apropriação, empoderamento e a realização (PARMENTER, 2015).

3 DESENVOLVIMENTO

No processo de eficiência dos fornos vários itens são utilizados para a coleta e envio de informações. Todos os equipamentos estão interligados com o auxílio da rede de ethernet IP, podendo adquirir qualquer dado de qualquer parte do processo de fusão, onde consegue-se verificar na Figura 6.

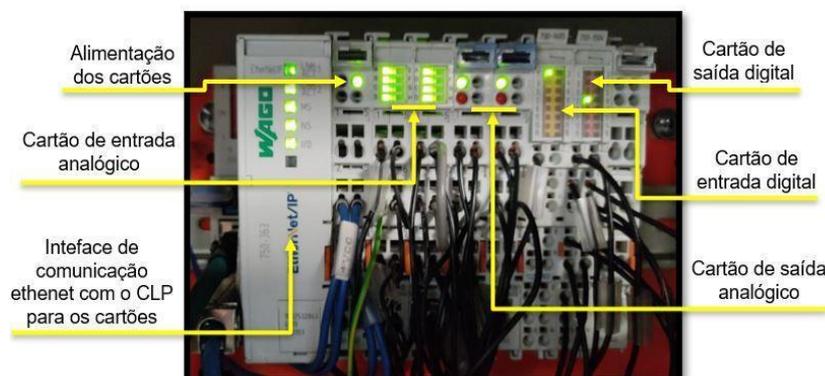
Figura 7 - CLP Allen Bradley



Fonte: Autores (2021)

No projeto que está sendo executado, tem-se a ligação do supervisor principal da fusão, a IHM da Pesagem de aditivos do carro de carga, outros CLP's que estão envolvidos em parte de sinais, e o módulo remoto I/O (Entradas e saídas) da Wago que é a principal interface que está sendo utilizada, conforme Figura 8.

Figura 8 - Módulo da Wago



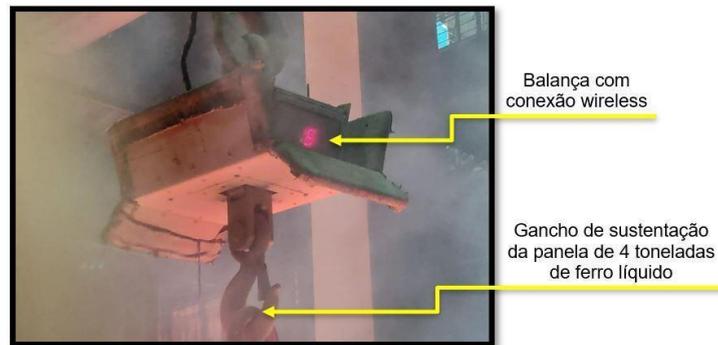
Fonte: Autores (2021)

No módulo foram adicionados cartões de entradas e saídas digitais e analógicas, onde são coletadas todas as informações de corrente, potência e tensão dos fornos fusores, com o sinal de 0 - 5V gerada pelo próprio forno que são enviadas para o CLP principal.

Optou-se pela utilização da comunicação de ethernet IP, para a possível diminuição da utilização de cabos que teriam de ser passados, resultando em um

painel mais organizado e conseqüentemente, economizando materiais e vários componentes como, botões e cartões de entradas, e consistindo como principal objetivo a ligação da balança que fica junto a ponte de transferência conforme a Figura 9.

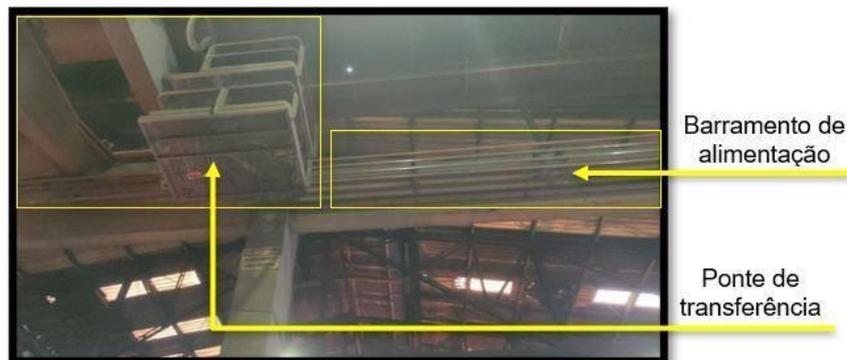
Figura 9 - Balança ponte de transferência



Fonte: Autores (2021)

A comunicação com a balança via cabo acaba não sendo muito viável, uma vez que a ponte tem uma movimentação constante e só existem barramentos para a alimentação de potência conforme a Figura 10, não contendo infra-estrutura para a passagens dos cabos de comando.

Figura 10 - Barramento da ponte de transferência



Fonte: Autores (2021)

Adicionou-se um roteador *wireless* conforme a Figura 11, que se comunica com a balança da ponte de transferência, e também envia as informações para a ponte de carregamento. A ligação desse roteador wireless ajuda até mesmo na comunicação dos CLP 's, supervisórios e módulos I/O via Notebook de onde estiver.

Figura 11 - Roteador TP link

Fonte: Autores (2021)

Para a comunicação com o sistema de pesagem da ponte de carregamento, utilizou-se um módulo de comunicação sem fio da Wago, no qual pode ser configurado em modo *Wireless* ou *Bluetooth*. Como no processo tem a utilização de um roteador *WIFI*, foi configurado o roteador da Wago conforme a Figura 12, e colocado o mesmo como ponto de acesso, comunicando com toda a rede instalada.

Figura 12 - Roteador sem fio Wago

Fonte: Autores (2021)

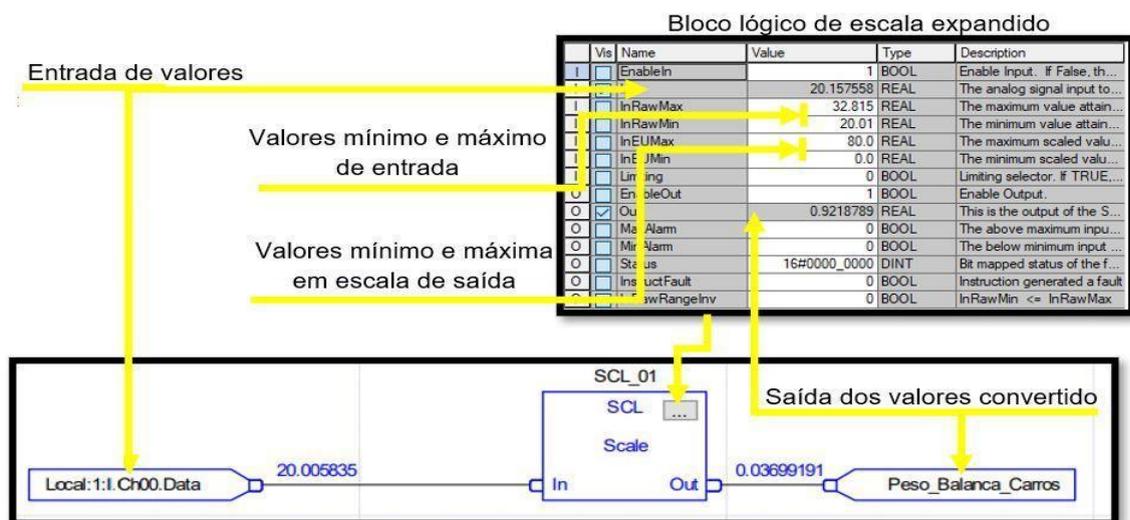
O sistema sem fio, foi utilizado no equipamento para prevenir futuros problemas ocasionados pela movimentação constante da ponte, onde há a possibilidade do cabo ser danificado, uma vez que pode ocorrer um rompimento ou até mesmo um mau contato nos terminais de ligação, interferindo diretamente na comunicação.

3.2 APRESENTAR A PROGRAMAÇÃO, CONFECÇÃO DO SUPERVISÓRIO E DO CONTROLE LÓGICO PROGRAMÁVEL (CLP)

3.2.1 Programação do CLP

A programação do CLP Allen Bradley, foi executada com o *software* Studio 5000 processando todas as informações, uma delas, é o sinal de 4 à 20mA da balança de aditivos. O valor é enviado para um cartão analógico, no qual é inserido em uma variável chamada de *Float*, que significa uma variável flutuante onde contém dígitos após a vírgula, sendo introduzido em um bloco lógico de escala conforme a Figura 13.

Figura 13 - Bloco lógico da escala da balança de aditivo



Fonte: Autores (2021)

Após a conversão do valor analógico enviado pela balança, foi acrescentado esses valores em um bloco de tolerância conforme a Figura 14, que foi desenvolvido para diminuir a lógica do programa, já que para cada material teria que ter essa lógica principal onde internamente ele faz o cálculo da tolerância com o peso do material e controla a pesagem até ficar dentro do desejado, esperando o acionamento do botão para confirmar a pesagem, fazendo a mudança da tela para o próximo material e a gravação do peso confirmado.

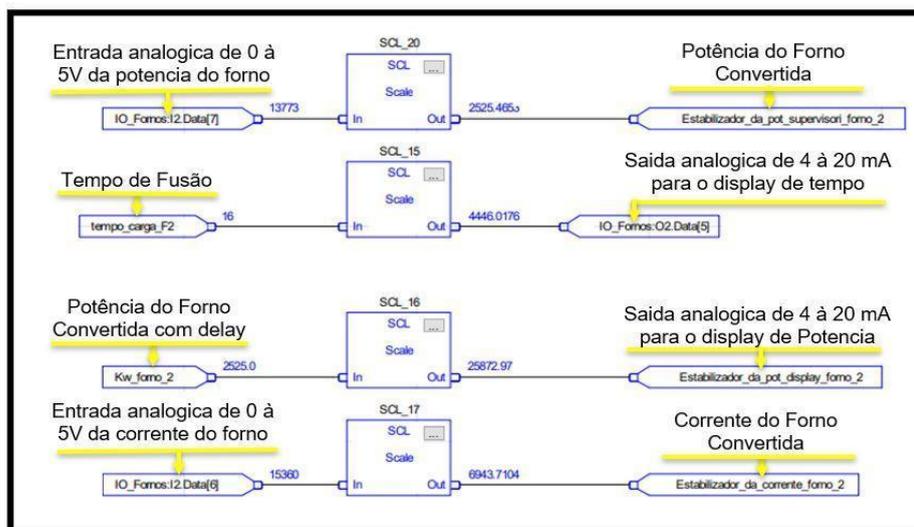
Figura 14 - Bloco lógico da tolerância de aditivos



Fonte: Autores (2021)

A programação da parte de consumo dos fornos tem basicamente o mesmo complemento inicial que a balança de aditivos. É utilizado uma placa de entrada analógica que adquire o sinal de 0-5V do forno e transforma nos seus valores reais para a utilização na lógica de programação. O bloco de escala, mostrado na Figura 15, também é usado para a saída do cartão analógico, que manda um sinal de 4-20mA para que possa ser visto no display, a potência e o tempo de fusão.

Figura 15 - Bloco lógico de escala do forno



Fonte: Autores (2021)

3.3 APERFEIÇOAMENTO DO CONTROLE DE PESAGEM DOS MATERIAIS

Nas fundições o processo de pesagem dos materiais é um dos itens que influenciam na eficiência do forno fusor, pois pode ser adicionado peso superior ao utilizado na receita.

No processo antigo havia como base, um quadro onde o técnico responsável indicava o peso de cada material que o operador deveria utilizar, conforme Figura 18.

Figura 18 - Quadro de pesagem

Cinzento		Nodular	
Forno		Forno	
Carburante bala 1=	KG		KG
Carburante bala 2=	61 KG		KG
Fesi pedra=	KG		KG
Carbeto (SiC)=	16 KG		KG
Fesi granulado=	15 KG		KG
Pirita=	KG		KG
Calcarea=	10 KG		KG
Manganês=	3 KG		KG

Fonte: Autores (2021)

Porém com esse tipo de controle, poderia haver falha do operador, uma vez que seria possível o mesmo colocar materiais a mais nesse peso, já que o método de pesagem era apenas com uma balança sem nenhum tipo de controle para informar se está dentro do desejado, conforme a Figura 19.

Figura 19 - Balança utilizada para pesagem



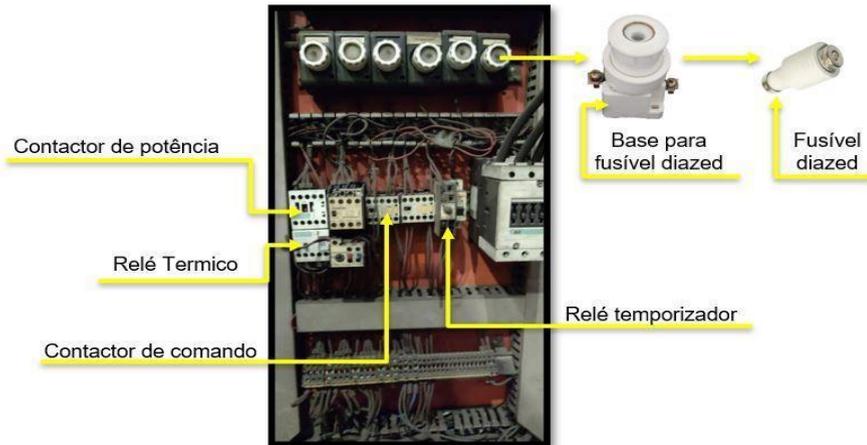
a) Base da balança

b) Display da Balança

Fonte: Autores (2021)

Foi realizada a retirada de todo o sistema de pesagem antigo que não era mais utilizado. O mesmo era ultrapassado, com componentes que já estavam quase em desuso junto com os cabos desativados conforme a Figura 20, que poderiam dificultar uma possível manutenção.

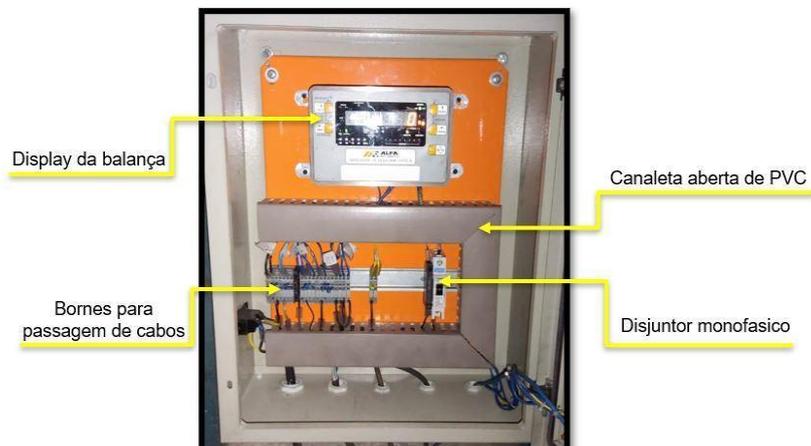
Figura 20 - Painel com cabos desativados



Fonte: Autores (2021)

A melhoria realizada foi no processo de pesagem dos aditivos de cada carro de carga, confeccionando um painel novo e automatizado que possui uma balança com a saída de 4 a 20mA conforme a Figura 21, que envia esse sinal para o CLP principal realizar os cálculos e destinar as informações para a IHM.

Figura 21 - Interior do painel de pesagem dos aditivos



Fonte: Autores (2021)

Para interagir com todo o sistema, foi adicionado um supervisor conforme a Figura 22 ,com o propósito juntar todas as informações do processo de fusão em um único lugar, proporcionando um melhor gerenciamento pelo técnico, e facilitando na alteração das receitas com envio imediato ao operador.

Figura 22 - Supervisor



Fonte: Autores (2021)

Para que o operador de pesagem dos aditivos saiba qual a pesagem correta a ser efetuada, foi criado uma tela no supervisor onde o técnico da fusão adiciona a quantidade de material desejada tanto como aditivos ou sucata, podendo até mesmo verificar os materiais que estão sendo pesados conforme a Figura 23.

Figura 23 - Tela para adicionar e visualizar os pesos

DOSADOR DE ADITIVOS		TALHA MANUAL		DE/DO	
CARRO DE CARGA 2		CARRO DE CARGA 3		CARRO DE CARGA 4	
CARGA DE SUCATA		CARGA DE SUCATA		CARGA DE SUCATA	
	Desejado	Pesado		Desejado	Pesado
Sucata Fina	900	0	Sucata Fina	900	0
cavaco	200	0	cavaco	200	0
Sucata Grossa	1100	0	Sucata Grossa	1100	0
Ferro Gusa Cinzento	600	0	Ferro Gusa Cinzento	600	0
Ferro Gusa Nodular	0	0	Ferro Gusa Nodular	0	0
Retorno Cinzento	1300	0	Retorno Cinzento	1300	0
Retorno Nodular	0	0	Retorno Nodular	0	0
CARGA DE ADITIVOS		CARGA DE ADITIVOS		CARGA DE ADITIVOS	
	Desejado	Pesado		Desejado	Pesado
Carburante Nodular	0	72	Carburante Nodular	0	0
Carburante Cinzento	67	0	Carburante Cinzento	67	67
Carbeto	12	0	Carbeto	12	12
Ferro Manganês	5	3	Ferro Manganês	5	5
Fosf (granulado)	10	0	Fosf (granulado)	10	10
Pirita	5	0	Pirita	5	5
Calcareo	7	7	Calcareo	7	7
Pesagem Concluída					

Identifica para qual carro vai a carga que esta sendo pesada

Fonte: Autores (2021)

Já com a automatização do sistema, o técnico não precisa marcar a pesagem no quadro, já que aparece automaticamente na IHM (Interface Homem Máquina). O início do processo de pesagem dos aditivos começa com operador da ponte rolante, onde se tem quatro botões para cada carro de carga a ser abastecido, conforme a Figura 24.

Figura 24 - Botões da ponte de carregamento



Fonte: Autores (2021)

Ao apertar por exemplo o botão do carro 2, aparecerá para o operador responsável pela pesagem dos aditivos uma tela com a escrita “Pedido de aditivo para o carro de carga 2” conforme a Figura 25, para que o mesmo saiba o destino da carga que será executada a pesagem.

Figura 25 - Tela da IHM com o botão do pedido de carga do carro 2



Fonte: Autores (2021)

Se o operador da ponte finalizar a pesagem de sucata para o carro 2, e começar a pesagem para o carro 4 sem que o operador dos aditivos ainda não tenha finalizado a pesagem da carga do carro 2, automaticamente ficará em espera

até finalizar a pesagem anterior pelo sequenciador que foi acrescentado no programa, e assim sucessivamente para os outros carros de carga.

É obrigatório que o operador faça a pesagem correta do material que foi solicitado, e caso não seja feito corretamente a pesagem, não será feita a liberação para o próximo a ser pesado, fazendo com que o operador adicione ou retire o aditivo que foi adicionado recentemente, conforme a Figura 26.

Figura 26 - Pesagem do material



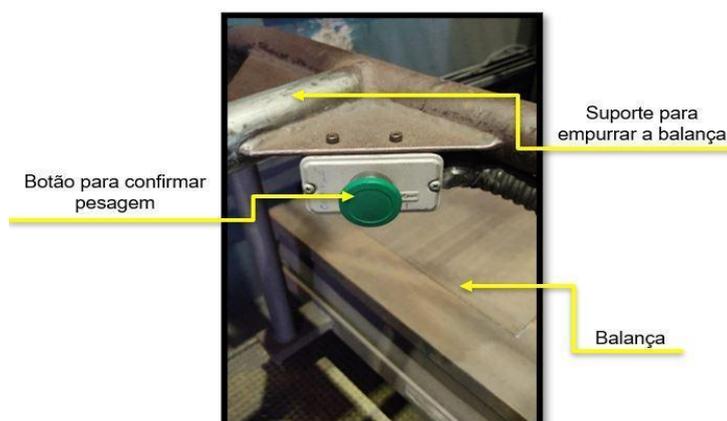
a) Carga fora do especificado

b) Carga de acordo com o especificado

Fonte: Autores (2021)

Para que ocorra a confirmação da carga dentro do solicitado, existe um botão onde o operador aciona, no próprio carro de pesagem conforme a Figura 27, onde só aceitará a confirmação do peso se o mesmo estiver dentro da tolerância adicionada pelo técnico responsável pelo processo.

Figura 27 - Botão no carro da balança



Fonte: Autores (2021)

Ao finalizar todo o processo de pesagem dos materiais que foi solicitado, aparecerá uma tela indicando ao operador que a pesagem foi finalizada e a talha liberada para subida conforme a Figura 28, deixando o mesmo movimentar o equipamento e descarregar o aditivo pesado no carro pré definido.

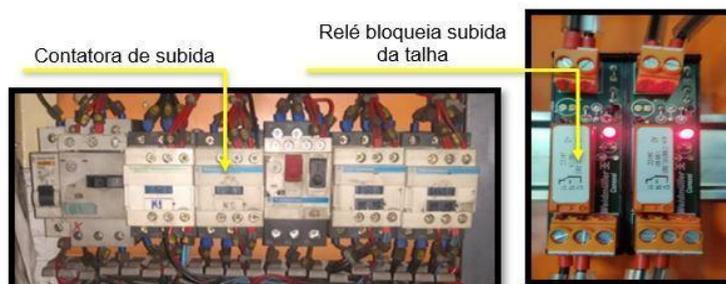
Figura 28 - Final da pesagem



Fonte: Autores (2021)

Foi adicionado um relé em série com o comando da contactora de subida da talha conforme a Figura 29, fazendo com que a mesma fique bloqueada até o término de pesagem de todos os materiais solicitados. Após o CLP identificar que o processo finalizou, ele irá desacionar o relé liberando a talha para a movimentação.

Figura 29 - Comando da talha de aditivos



a) Painel da talha

b) Relé de bloqueio

Fonte: Autores (2021)

Na ponte de carregamento foi estabelecido basicamente o mesmo sistema de pesagem para as sucatas metálicas, onde a única diferença é a continuação da pesagem com o material no eletroímã. Para fazer o controle de pesagem foi retirado o sistema de monitoramento antigo e instalado uma IHM nova conforme a Figura 30

Figura 30 - IHM da ponte de carregamento



a) Antes

b) Depois

Fonte: Autores (2021)

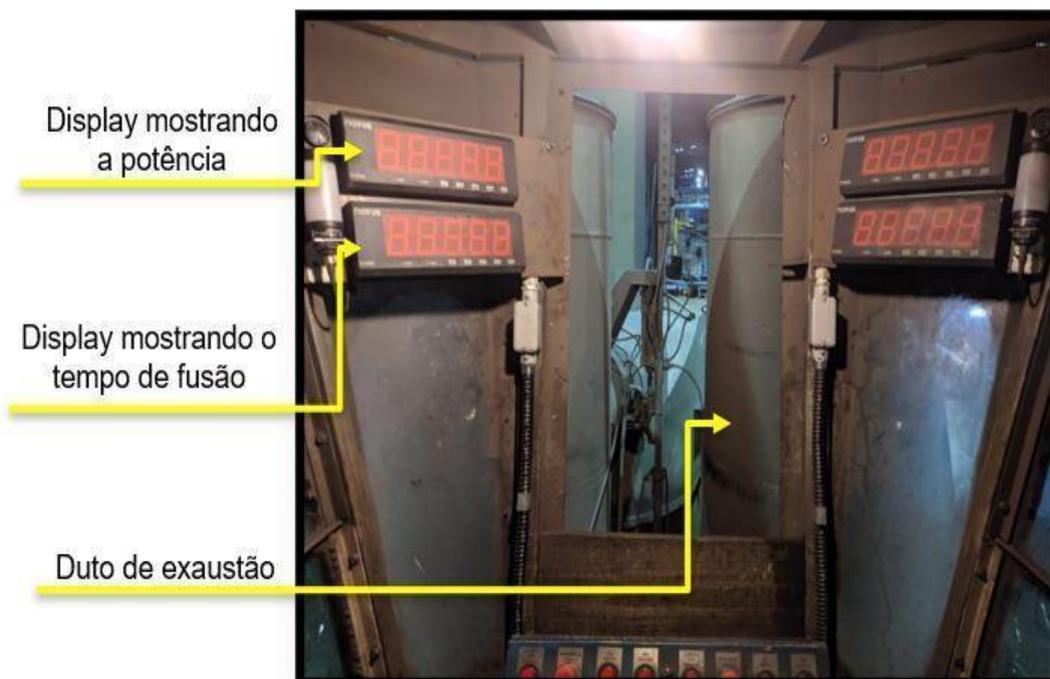
A troca do sistema de pesagem da sucata da ponte de carregamento fez com que o operador consiga verificar melhor o peso dos materiais e gerenciando o que está sendo pesado, Fazendo com que ele não se perca no processo e a carga fique dentro da tolerância solicitada pelo técnico responsável

3.4 ESTABELECEM MÉTODOS DE INDICADORES DE DESEMPENHO PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Os métodos indicadores de desempenho, têm como principal função melhorar o rendimento na produtividade e também gerar uma redução no consumo de energia por fusão, fazendo com que o processo se torne mais eficiente, diminuindo o custo final de tonelada de ferro líquido fundido.

3.4.1 Display de monitoramento dos fornos

Para que o operador do forno saiba por quanto tempo está ocorrendo a fusão e qual é a potência do forno, foram acrescentados dois displays no painel de comando conforme a Figura 31, ambos recebem um sinal de 4 a 20mA, que varia de acordo com os valores de mínimo e máximo que são configuráveis.

Figura 31 - Displays para monitoramento

Fonte: Autores (2021)

O indicador de potência tem um papel importante nesse ambiente, pois o operador pode verificar se o forno está com alguma irregularidade, caso reduza a potência como por exemplo, pouco metal dentro do forno elevando a corrente e desgastando o refratário, ou até mesmo um potenciômetro com problema.

3.4.2 Coluna luminosa de status do forno

Às vezes o operador esquece de ligar o forno quando ele realiza o carregamento, por isso foi adicionado um display que mostra a potência, fazendo assim, que o mesmo saiba se o forno está funcionando ou até mesmo se tem algum problema na parte de inicialização. E para identificar que o mesmo está com o comando ligado sem potência, foi instalado uma coluna luminosa com a cor verde conforme a Figura 32.

Figura 32 - Instalação das colunas luminosas



Fonte: Autores (2021)

A coluna luminosa com a sinalização em verde também pode identificar ao operador que o forno está bloqueado para o basculamento, pois o mesmo tem que estar totalmente desligado para bascular, evitando que algum material metálico que esteja no chão caia no barramento de alimentação da bobina.

3.4.3 Abastecimento do forno

Para o controle de abastecimento dos fornos, a torre luminosa gera um sinal na cor amarela, onde o sinal contínuo identifica a hora de abastecer e o sinal intermitente para suspender o abastecimento. Para elaborar esta sinalização foi realizado um estudo de várias fusões durante uma semana, gerando um relatório e em seguida foi filtrado as sete mais eficientes. Com base nesses dados, foi gerado uma tabela, e a partir dela foi elaborado um gráfico de tempo versus corrente, de onde retirou-se os coeficientes para as equações. O gráfico foi dividido em três partes, para a equação ficar com o coeficiente de determinação mais próximo de um.

Para fazer o gráfico do limite superior no início da fusão foi utilizado a seguinte equação:

$$3600 + 5x + 0,018x^2$$

Para fazer o gráfico do limite inferior no início da fusão foi utilizado a seguinte equação:

$$1800 + 2,2x + 0,025x^2$$

Para fazer o gráfico do limite superior no meio da fusão foi utilizado a seguinte equação:

$$6250 + 2,27x - 0,0004x^2$$

Para fazer o gráfico do limite inferior no meio da fusão foi utilizado a seguinte equação:

$$3800 + 3,98x - 0,00085x^2$$

Para fazer o gráfico do limite superior no final da fusão foi utilizado a seguinte equação:

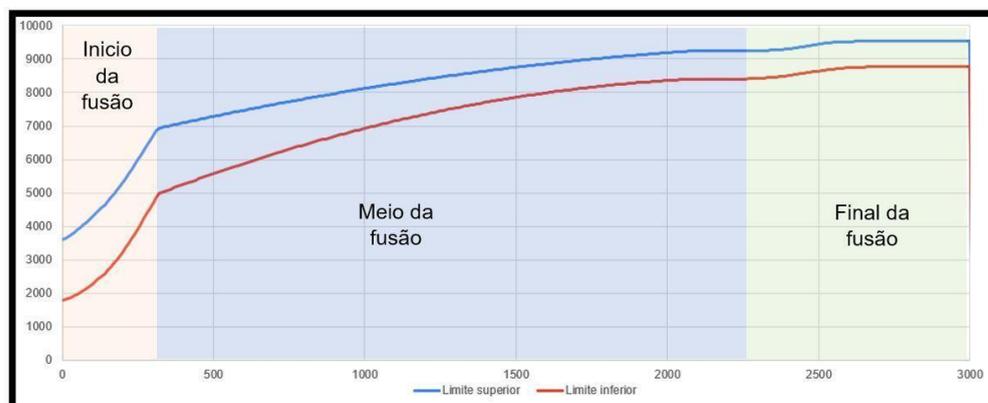
$$9540 + \frac{(-300)}{1 + \left(\frac{x}{2460}\right)^{50}}$$

Para fazer o gráfico do limite inferior no final da fusão foi utilizado a seguinte equação:

$$8790 + \frac{(-400)}{1 + \left(\frac{x}{2460}\right)^{35}}$$

As equações utilizadas servem para identificar os limites máximos e mínimos da corrente conforme o tempo das fusões. Na Figura 33, representa os limites onde se a corrente ultrapassar irá acender a sinalização amarela podendo ser na condição intermitente ou contínua.

Figura 33 - Limite superior e inferior da corrente



Fonte: Autores (2021)

O gráfico serve para controlar o aumento de corrente uniforme, não ocasionando picos crescentes ou decrescentes de corrente, gerenciando a quantidade de carga não ultrapassando o limite mínimo representado pela linha vermelha e o limite máximo representado pela linha azul do gráfico.

3.5 CÁLCULO DO *KEY PERFORMANCE INDICATOR* (KPI) CONSIDERANDO UMA CARGA DE 4 TONELADAS

Para que seja possível verificar a eficiência entre a fusão tradicional e a otimizada, trabalhou-se com base em uma fusão de 4,2 toneladas, e esse comparativo foi medido com o indicador de KPI, que neste caso, é o indicador de eficiência nos fornos a indução, que é medido através da relação entre potência consumida(kWh) por tonelada de metal fundido(Ton).

$$KPI = \frac{\text{Potência consumida(kWh)}}{\text{Tonelada de metal fundido(Ton)}} \quad (3)$$

Pode ser verificado que para produzir uma carga de 4,275 toneladas de ferro líquido foi consumida uma potência de 2.354kWh, resultando em um KPI de 550,64.

Já nas fusões anteriores, este indicador estava entre 655, pois se tinha um consumo de 2.657kWh para um fusão de um pouco mais de 4 toneladas, o que se pode concluir, que não se estava tendo um aproveitamento na fusão.

3.6 IMPLEMENTAÇÃO VISUAL DO TÉRMINO DA FUSÃO

Muitas fusões passam da temperatura de 1500 °C, pois o processo estabelece um tempo de 47 minutos para a fusão. Algumas terminam antes, porém o operador espera chegar no tempo pré-definido. Para que não precise esperar o tempo estabelecido, foi realizado um acompanhamento da corrente em relação a temperatura, conforme a Tabela 1, já que quanto mais líquido o ferro mais elevada será a corrente.

Tabela 1 - Corrente versus temperatura

Temp. (°C)	Corrente (A)
505	2944
574	3444
710	3997
811	4457
883	5230
984	5480
1118	6061
1161	6537
1279	7063
1439	7764
1532	7910

Fonte: Autores (2021)

É possível verificar que a média de consumo, antes da instalação do sinal luminoso, conforme a Figura 34, era de 2760 kWh e atualmente é de 2536 kWh. Houve uma redução de consumo, uma vez que várias fusões tiveram seus tempos reduzidos, pois conforme o operador abastece o forno, não precisa chegar no tempo pré definido, reduzindo assim o consumo de energia, e consequentemente ganhando em média 2 minutos para iniciar a próxima fusão.

Figura 34 - Término da fusão

Fonte: Autores (2021)

3.7 APRESENTAÇÃO DO GRÁFICO DE FUSÃO

Os dados obtidos para realizar a confecção dos gráficos, foram retirados do relatório de cada fusão, anexado no sistema de supervisório instalado. O relatório consta com mais de 3100 linhas de dados, conforme a Figura 35, para que tenha uma boa precisão em seu consumo e eficiência.

Figura 35 - Valores de corrente do término da fusão

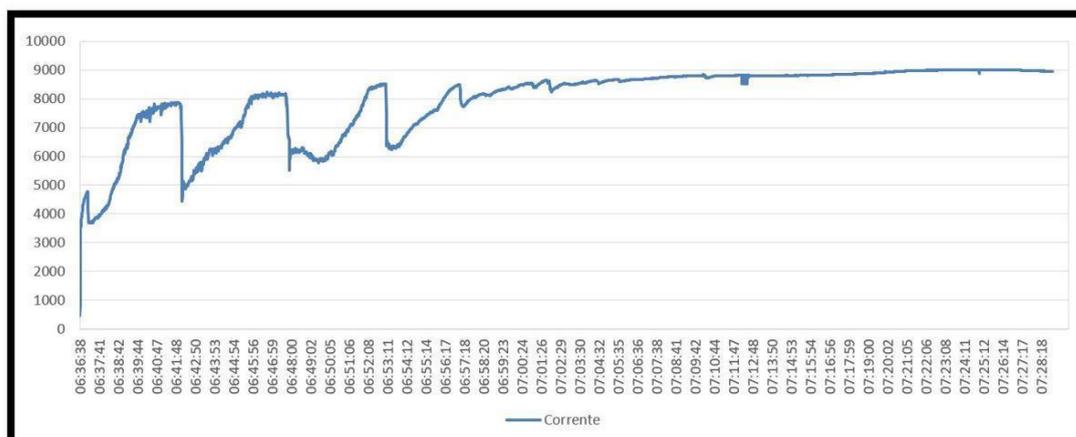
1	Time	Corrente
3128	07:28:44	8962
3129	07:28:45	8960
3130	07:28:47	8956
3131	07:28:47	8959
3132	07:28:48	8956
3133	07:28:50	8956
3134	07:28:50	8958
3135	07:28:51	8957
3136	07:28:53	8956
3137	07:28:53	8956
3138	07:28:54	8958
3139	07:28:56	8957

Fonte: Autores (2021)

A partir dos dados adquiridos, é possível gerar relatórios gráficos da corrente quase que instantaneamente, proporcionando a análise do consumo de energia praticamente em tempo real, conseguindo verificar se houve alguma oscilação brusca da corrente elétrica da fusão que está em andamento ou já foi concluída.

No processo anterior como não havia nenhum tipo de controle no quesito de abastecimento e término da fusão, fazendo com que a mesma não possuísse uniformidade, ocorrendo atrasos e até mesmo um consumo elevado de energia conforme Figura 36.

Figura 36 – Gráfico de corrente da fusão normal

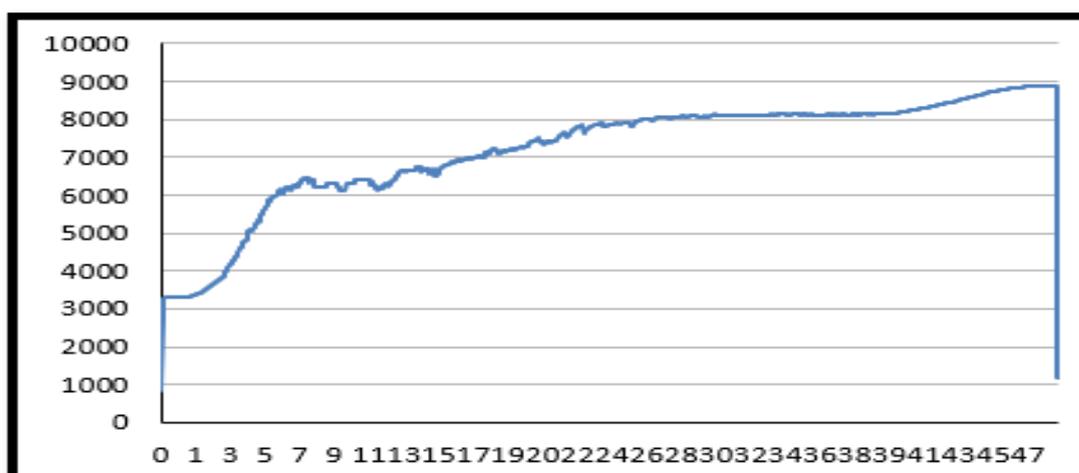


Fonte: Autores (2021)

Ao analisar o gráfico acima, nota-se aumentos bruscos de corrente. Isso ocorreu porque o operador demorou para abastecer o forno, deixando o ferro no estado líquido, ocupando um menor espaço, tendo uma relação direta com o aumento da corrente. E também pode-se notar que há uma redução brusca na corrente, identificando que o operador abasteceu o mesmo em excesso.

Com a otimização da fusão, obteve-se o controle no abastecimento e término da fusão, deixando-a uniforme, conforme a Figura 37, diminuindo o consumo e o tempo de fusão.

Figura 37 – Gráfico de corrente da fusão otimizada



Fonte: Autores (2021)

Nota-se uma diferença entre os gráficos acima, que com o controle no abastecimento, a corrente tem uma pequena variação até o momento que chega no seu limite máximo. Já na Figura 36, se tem uma maior variação, essas seriam as perdas relacionadas ao tempo de abastecimento.

3.8 QUADRO COMPARATIVO ENTRE A FUSÃO TRADICIONAL E OTIMIZADA

Pode-se notar na Tabela 2, que com a automatização obtêm-se melhores resultados em tempo de fusão, consumo e peso obtendo também o KPI da fusão. A comparação visa ressaltar os valores obtidos antes e depois da otimização, exibindo a melhora nas fusões realizadas.

Tabela 2 - Quadro comparativo

FUSÃO OTIMIZADA				FUSÃO TRADICIONAL			
Tempo do Forno ligado	Consumo (KWh)	Peso (ton)	KPI	Tempo do Forno ligado	Consumo (KWh)	Peso (ton)	KPI
45,12	2266	4,120	550,00	53,26	2425	3,880	625,00
44,29	2280	4,140	550,72	52,58	2425	3,880	625,00
47,17	2320	4,215	550,41	48,55	2424	3,920	618,37
47,05	2298	4,175	550,42	51,22	2524	3,995	631,79
46,55	2211	4,015	550,69	48,37	2391	3,880	616,24
46,25	2225	4,045	550,06	50,58	2445	3,875	630,97
47,13	2310	4,195	550,66	49,09	2395	3,920	610,97
45,21	2227	4,045	550,56	54,51	2451	3,920	625,26
45,73	2246	4,080	550,49	50,05	2452	3,970	617,63
45,89	2255	4,100	550,00	53,41	2561	3,895	657,51

a) Fusões otimizadas

b) Fusões tradicionais

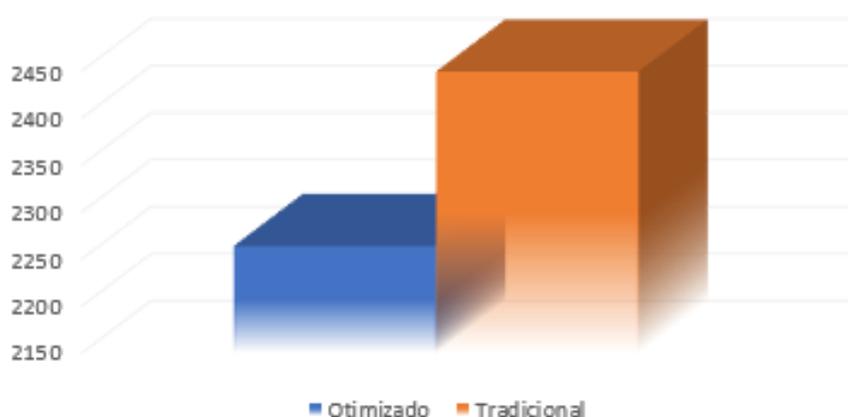
Fonte: Autores (2021)

Adquiriu-se um ganho na eficiência do forno muito significativo de consumo por tonelada de metal fundido, e com essa redução teve um acréscimo de mais ou menos 3 fusões diárias, podendo ser fundido 12 toneladas a mais, contendo ainda uma redução de 2800 kWh diárias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados mostram o quanto se perdia, e quanto pode-se ser mais eficiente atacando em alguns pontos do processo de fusão. O consumo médio de uma fusão não otimizada fica em torno de 7,5% a mais do que uma com todo o controle, conforme nota-se na Figura 38.

Figura 38 - Potência Média Consumida



Fonte: Autores (2021)

Depois de acompanhar e entender todo o processo ocorrido na fusão, nota-se que o operador tem uma parcela de influência na eficiência do forno.

Também verificou-se que a falta de otimização resulta na inconsistência interferindo muito na eficiência, diferente de um sistema otimizado, que acarreta em um processo de fusão mais preciso, e conseqüentemente a prevenção de falhas que possivelmente acarretaria em uma produção menos lucrativa, dado que teve um consumo por fusão acima do ideal.

Das 52 fusões diárias, 80% não estão de acordo com o indicador de desempenho e 20% estão conforme. Parte deste resultado é influenciado em razão da operação que o operador adota, que implica diretamente nos indicadores de eficiência. A otimização aplicada nos fornos pode elevar sua eficiência, trazendo um resultado positivo não só para o consumo de energia em uma fusão, mas também em um produto de maior qualidade.

CONCLUSÃO

O processo de pesagem tem impacto direto na eficiência do forno e também na qualidade final do produto. Com a melhoria implementada, consegue-se ter um controle melhor nestes dois pontos, pois os valores que antes eram feito a mão em um quadro, passam a ser digitais, e se essas informações não forem seguidas, bloqueará o processo de carregamento do forno, fazendo com que o operador tenha que seguir as etapas corretamente.

Os indicadores de desempenho têm papel importante na eficiência do forno, sem um display para o monitoramento de tempo e potência do forno, pode-se usar um tempo maior do que o necessário, ou até mesmo uma potência menor no forno do que o ideal para fundir o metal contido. Também foi instalado um torre luminosa, com função de indicar o status para abastecer ou parar o abastecimento.

Na fusão tradicional, pode-se ver no gráfico as variações da corrente elétrica, esta que está ligada a falta de controle no abastecimento do forno. Já com a otimização, tendo um maior controle neste ponto, nota-se no gráfico que a corrente elétrica não sofreu tanta variação, conseqüentemente reduziu-se as perdas neste processo.

O supervisório faz com que o operador possa ter um relatório de todos os processos e falhas no decorrer da fusão, tendo também a opção de modificar o valor da pesagem dos materiais. O Controle Lógico Programável (CLP), é o responsável por simplificar o comando elétrico e fazer várias lógicas de acionamentos e vários cálculos utilizados no processo.

Através do cálculo do indicador (KPI), consegue-se ter uma visão do aproveitamento energético do forno. Nas fusões antes da otimização, produzia-se menos e tinha um maior consumo. Depois da otimização, este resultado ficou melhor, pois teve uma maior produção com menos consumo, isto por fusão, ficando o indicador dentro do ideal para as fusões.

Antes da implementação, o operador não conseguia ver quando chegava o término da fusão, tendo que esperar até o tempo definido, isso ocasionando perdas. Com a implementação, o operador visualiza o término da fusão, não precisando esperar o tempo definido, e resultando em uma redução de consumo por fusão.

A implementação da comunicação Ethernet, trouxe várias vantagens, pois fez a comunicação entre os equipamentos responsáveis por todo processo de fundição, desde a pesagem, com a instalação da IHM para ter um melhor controle, até a balança, onde o acesso torna-se difícil, assim sendo possível por comunicação wifi.

A soma de todas as melhorias para obter uma melhor desempenho no processo e também uma melhor eficiência energética, pode-se notar efetivamente no quadro comparativo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CUSA, Y. G. **Eficiência energética em empresas do setor de ferroligas**. Salvador, 2018.

HAYT, W. H., BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. 8ª ed. AMGH, 2013.

HERMANN.; KROES, J. **Energy efficiency using induction furnaces**. Alemanha, 2010.

HERMENEGILDO, M. K. **Determinação da concentração de metais presentes em areia verde de fundição: estudo de caso da fundição Tupy s.a**. Florianópolis, 2011.

JUNIOR, M. T. C. **Construção de um forno cadinho fixo de baixo custo para fundir metais não ferrosos**. Cruz das Almas, 2016

JUNKER, O. **Einfluss der Betriebs – und Fahrweise auf den Energieverbrauch beim induktiven Schmelzen**. Alemanha, 2006.

KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. Editora Blucher, edição digital 2018.

MARQUES, V. P. N. **Polinômios e aproximações de função**. São Carlos, SP, 2017

MATTOS, T. G. O. F. **O estudo das funções polinomiais no ensino médio**. Campos dos Goytacazes, RJ, 2017

MME, **Pesquisadores analisam o processo de fundição em Aperibé, RJ**, 2015, disponível em <<https://www.gov.br/fundacentro/ptbr/assuntos/noticias/noticias/2015/7/entrevista-joao-apolinario-e-flavio-bentes>>. Acesso em 13/06/2021.

OLIVEIRA, C. J.; SANTOS, A. C. S. **Eletricidade e magnetismo II**. Eduece, 2015.

PARMENTER, D. **KEY PERFORMANCE INDICATORS**. 3ª ed. Wiley, Hoboken, New Jersey, 2015.

PETRUZELLA, F. D. **Controladores lógicos programáveis**. 4ª ed. AMGH, 2014.
PROCEL, **Programa nacional de conservação de energia elétrica**, 1997, disponível em <<https://bucket-gw-cni-static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/FornosEltricosalnduo.pdf>>. Acesso em 12/08/2021.

REVISTA ABIFA. **Fundição e matérias-primas**, 2020, disponível em <<https://www.abifa.org.br/wp-content/uploads/2020/12/Revista-Abifa-Novembro.pdf>>. Acesso em 14/06/2021.

REVISTA AUTOMAÇÃO. **Ethernet industrial e wireless crescem e derrubam o bus de campo**, 2019, disponível em <<https://revista-automacao.com/market-overview/23517-ethernet-industrial-e-wireless-crescem-e-derrubam-o-bus-de-campo>>. Acesso em 13/06/2021.

RIBEIRO, A. S. **Proposta de implementação de intertravamento do sistema elevatório das plataformas**. Salvador, 2016.

RODRIGUES, R. A; SILVA, E. R. **Máquina de tratamento térmico por indução eletromagnética**. Rio Verde, 2017.

SANTANA, A. S. **Identificação dos principais defeitos de fundição através da aplicação de ferramentas da qualidade: estudo de caso em uma fundição de peças metálicas**. Vitória, 2016.

SERPA, G. S. **Uso de ethernet em automação industrial**. São Carlos, 2011.

SOUZA T. M., Silva V. A., Cruz F. A. O. **Funções de 1º e 2º Grau, Exponenciais e Logaritmos**. Rio de Janeiro, 2017.

WEISS, A. **Processos de Fabricação Mecânica**. 1ª ed. Curitiba, 2012.