

UTILIZAÇÃO DE GRÁFICOS DE CONTROLE PARA MELHORIA DE PROCESSO DE CALCINAÇÃO DE ANTRACITO EM UM FORNO ELÉTRICO DE UMA EMPRESA PRODUTORA DE INSUMOS PARA INDÚSTRIAS METALÚRGICAS

USING CONTROL CHARTS TO IMPROVE THE ANTHRACITE CALCINATION PROCESS IN AN ELECTRIC FURNACE AT A COMPANY THAT PRODUCES INPUTS FOR METALLURGICAL INDUSTRIES

¹Gabriel del Puppo ALTOÉ.

²Thalmo de Paiva COELHO JÚNIOR.

¹ArcelorMittal. E-mail: gabrielaltoe21@gmail.com.

²Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes). E-mail: thalmo@ifes.edu.br.

Artigo submetido em 09/10/2023 e aceito em 06/11/2023.

Resumo

No presente trabalho realizou-se o estudo de aplicação de gráficos de controle na melhoria de um processo de calcinação de antracito em um forno elétrico para a fabricação de pasta eletródica (Soderberg). Em apoio aos gráficos de controle, foram utilizadas as ferramentas de Padronização, Diagrama de Causa e Efeito e a metodologia Six Sigma para a identificação de problemas e propostas de melhoria para os mesmos. Adicionalmente, também foi apresentado o processo de calcinação do antracito, que quando realizado de forma correta, com material dentro da faixa de resistividade proposta, garante a qualidade final do produto produzido na fábrica de pasta. Os resultados deste trabalho mostraram que com a utilização do Gráfico de Controle juntamente com a Metodologia DMAIC do Six Sigma e o Diagrama de Causa e Efeito foi possível reduzir a quantidade de material fora da faixa de especificação de valores de 70% para 14%, uma redução de 56% que representa uma diminuição em média de 179,2 toneladas de material fora da especificação por mês, gerando uma queda na quantidade de material a ser reprocessado, que se traduz em economia para a empresa e capacidade de atender o fornecimento de material para fabricação de pasta eletródica.

Palavras-chave:

Gráfico de Controle. Calcinação. Resistividade Antracito. Melhoria.

Abstract

In the present work, the study of the application of control charts was carried out in the improvement of an anthracite calcination process in an electric oven for the manufacture of electrode paste (Soderberg). As a support for the control charts, the Standardization tools, Cause and Effect Diagram and the Six Sigma methodology were used to identify problems and proposals of improvement for it. Additionally, the anthracite calcination process was also presented, which when done correctly, with material within the proposed resistivity range, guarantees the final quality of the product produced at the pulp mill. The results of this work show that with the use of the Control Graph together with the Six Sigma DMAIC Methodology and the Cause and Effect Diagram, it was possible to reduce the amount of material outside the range of value specification from 70% to 14%, an 56% reduction, which represents an average decrease of 179.2 tons of material out of specification per month, generating a drop in the amount of

material to be reprocessed, which translates into savings for the company and the ability to supply material for the manufacture of electrode paste.

Keywords:

Control Chart; Calcination; Anthracite Resistivity; Improvement.

1 INTRODUÇÃO

O antracito tem suas diversas utilidades nos dias atuais que vão desde à utilização na forma eletricamente calcinada, bem como na produção de gás; na utilização como combustível em substituição ao coque (HALVORSEN, 1994; MING e HAIFENG, 2019; SIKORA et al. 2019).

Assim como qualquer processo, a melhoria no processo de produção de antracito pode ser obtida, entre outras iniciativas, na melhoria na área da saúde, na gestão de recursos (WOODS, 2019), na melhoria na área de negócios (COMAS et al, 2019) e ainda na melhoria de processos educacionais (ESLAMI e AHMADI, 2019).

É sabido que nos processos produtivos, o monitoramento e o controle da variabilidade são fundamentais para a melhoria da qualidade. De fato, com processos sob controle, os produtos destes processos apresentam mais qualidade e a linha de produção mais produtividade (MACIEL et al, 2014).

Atualmente, com a mudança dos paradigmas ocasionada pelas revoluções de mercado, onde a principal demanda é o foco no cliente. O enfoque passou a ser a qualidade e principalmente o melhor e mais preciso planejamento e controle da produção, produtos de melhor qualidade e que atendam a necessidade do cliente, fidelizam o cliente e geram crescimento das vendas, portanto, é o cliente que determina a sobrevivência das empresas no mercado (SILVA E NASCIMENTO, 2015).

Essa mudança de paradigma é descrita por FAESARELLA (2006) e faz com que a cada dia mais empresas se reestruturem, procurando novas formas de garantir sua sobrevivência, que somente é conseguida pela conquista da preferência do consumidor pelos seus produtos. A necessidade de garantir a preferência do cliente, figura, segundo FAESARELLA (2006), como a principal razão que leva as organizações a adotarem os programas de qualidade; por consequência do controle do processo.

O controle da produção e a análise dos processos produtivos reduzem a chance de processos mal planejados e administrados que produzem produtos e serviços de má qualidade (FAESARELLA, 2006), portanto que apresentam resultados não conformes.

Portanto, processos não controlados ou mal geridos ocasionam despesas às empresas reduzindo lucro e reduzindo a competitividade das empresas no mercado, pois se tratam de custos encobertos. (CAMPOS 1992). Portanto, esta pesquisa procurou responder: como utilizar gráficos de controle para melhoria de processo de calcinação de antracito em um forno elétrico de uma empresa produtora de insumos para indústrias metalúrgicas?

Devido à grande variação do processo de calcinação do antracito e grande quantidade de material fora da especificação, o presente trabalho tem como objetivo geral utilizar os gráficos de controle para melhoria de processo de calcinação de antracito em um forno elétrico de uma empresa produtora de pasta eletródica como insumo para indústrias metalúrgicas.

Além do objetivo geral, outros objetivos específicos são apresentados: Apresentar ferramentas de controle de qualidade e melhorias de processo; Apresentar o processo de calcinação do antracito com destinação à fabricação de pasta eletródica e produto final; Descrever a utilização do Gráfico de Controle através das análises de resistividades do forno calcinador e mostrando a funcionalidade dele no controle da operação do forno calcinador;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. FERRAMENTAS DE CONTROLE DE QUALIDADE PARA MELHORIA DE PROCESSO

Podemos definir, segundo RIBEIRO & TEN CATEN (2012) que o processo em si é uma combinação de equipamentos, insumos, métodos, procedimentos e pessoas, tendo como objetivo a fabricação de um bem ou o fornecimento de um serviço (efeito) e cada produto possui um número de elementos que, em conjunto, descreve sua adequação ao uso. Esses elementos são frequentemente chamados características da qualidade ou indicadores de desempenho (RIBEIRO DUARTE, 2012).

Segundo MONTGOMERY (1985), essas características da qualidade podem ser de diversos tipos: físicas, tais como comprimento, peso, voltagem e viscosidade; sensoriais, como gosto, aparência e cor; ou de orientação temporal, como confiabilidade, manutenção, utilidade e durabilidade. O controle de tais características garante ao produto um padrão de produção e permite a replicação deste padrão pelos parâmetros controlados, sendo que esses parâmetros podem ser controlados através de ferramentas de controle de processos.

O controle de processos inicia-se no controle de determinadas propriedades/especificações do produto que garante a padronização desse produto bem como a qualidade do mesmo. Assim, o controle de processos envolve, entre as diversas medidas, a melhoria do processo em si, onde se encontram variadas ferramentas; entre as mesmas destacam-se as tradicionais ferramentas de controle de qualidade. (FAESARELLA 2006)

Apesar do controle de qualidade que é amplamente conhecido hoje ter surgido por consequência da Segunda Guerra Mundial, na década de 20 do Século XX, técnicas estatísticas utilizadas para controle de qualidade já haviam sido desenvolvidas nos EUA, notadamente, a partir dos avanços tecnológicos de medição e da aplicação da técnica de cartas de controle desenvolvida por Shewhart. (FAESARELLA 2006)

A expansão da utilização das técnicas desenvolvidas por Shewhart, de técnicas estatísticas na Inglaterra (1935) e no Japão (1954) fez com que o controle da qualidade se tornasse fundamental no controle dos processos produtivos (RIBEIRO & TEN CATEN, 2012) com vistas para a melhoria do processo em si, uma vez que este controle passou a garantir que condições de execuções de processos produtivos fossem replicadas e, como consequência, a padronização dos seus produtos, com a menor variabilidade possível.

De uma maneira geral, os programas de qualidade têm dois componentes: os conceitos e princípios fundamentais que geram uma cultura organizacional propícia ao desenvolvimento da melhoria contínua e da qualidade total; as inúmeras metodologias e ferramentas da qualidade, que podem vir a ser aplicadas na implementação das ações nas diferentes fases do ciclo de

produção (FAESARELLA 2006), sendo assim, diferentes ferramentas podem ser aplicadas em momentos diferentes do ciclo produtivo.

Segundo FAESARELLA (2006), acerca das ferramentas para um controle e melhoria de processos, podemos descrever algumas classes, como:

a) Ferramentas Organizacionais: são as que visam a melhoria do processo com base na organização e padronização da operação, tais como: 5S; Brainstorm; 5W2H; Padronização; SETF1 – Ferramenta de priorização; Análise de valor; Benchmarking;

b) Ferramentas Estatísticas: são as que visam quantificar e controlar as operações, a exemplo: Folha de Verificação; Diagrama de Pareto; Diagrama de Causa e Efeito; Diagrama de Dispersão; Cartas de Controle (Gráficos de Controle); Capacidade de Processo (CP e CPK); Fluxograma; FMEA.

Além dessas ferramentas, existe o hoje já tradicional relatório A3 (SOBEK e JIMMERSON, 2004), bem como outras metodologias que focam na utilização de ferramentas para melhoria do processo, mas com filosofias específicas, que, nomeadamente, temos: Six Sigma; Lean Production; PDCA.

Dentre as ferramentas acima citadas, encontramos destaque nos Gráficos de Controle (ou Cartas de Controle), pois, através deles é possível o monitoramento da variabilidade do processo associado às características de interesse com o objetivo preservar a qualidade do processo e que se caracterizam pela matriz de covariância dos dados (SILVA et al, 2019).

Adicionalmente, optamos, observando o estudo de CUNHA e PEREIRA (2020), por dar destaque para as ferramentas: Padronização, Diagrama de Causa e Efeito e Six Sigma, pois: a Padronização utiliza padrões principalmente no controle do nível de desempenho, visando eliminar a causa fundamental dos problemas (FAESARELLA, 2006). Já o Diagrama de Causa e Efeito é uma ferramenta que identifica de forma objetiva potenciais causas para um fenômeno que se busca uma explicação (DE MORI et al, 2019). Por fim, o Six Sigma é uma metodologia que tem como objetivo estabelecer uma disciplina de utilização objetiva do pensamento estatístico com o propósito central de buscar melhorias de processos e produtos reduzindo as variações que geram defeitos, assim como permite uma visão por processos, o uso correto de medições e sustentação por uma estrutura de gerenciamento e condução de projetos (CUNHA e PEREIRA, 2020).

2.1.1 Padronização

Muitos problemas na indústria são causados pela falta de padrões, por exemplo, pela simples realização de uma tarefa, levando operários de turnos diferentes a realizarem a mesma tarefa de maneira diferente. A utilização de padrões nas empresas permite a replicação de atividades, garantindo a qualidade, reduzindo a chance de produtos fora de padrão, reduzindo a falha humana (segurança do trabalho) e contribuindo para o processo (SILTORI et al, 2020), Segundo FAESARELLA (2006), os padrões utilizados nas empresas podem ser divididos em:

a) Padrões de Sistema - documentos relativos à organização e ao conteúdo dos sistemas, procedimentos e métodos. Seu objetivo é garantir que o sistema será conduzido sempre da mesma maneira, possibilitando que todos saibam o que, como, onde, quando e por que fazer.

b) Padrões Técnicos - os padrões técnicos são especificações usadas no projeto do produto, projeto do processo, manutenção de equipamentos, operações das máquinas, gerenciamento dos estoques e das reclamações. Seu objetivo é fazer com que as informações fluam de forma simples e clara das áreas técnicas até os operadores.

2.1.2 Diagrama de Causa e Efeito

Conhecido também como diagrama espinha de peixe ou diagrama Ishikawa (devido ao seu criador), é usado quando se deseja de forma sistemática identificar, explorar e ressaltar as causas possíveis de um problema, representando a relação entre o efeito (resultado) e suas possíveis causas (SILVA E NASCIMENTO 2015), conforme ilustrado na Figura 1. O Diagrama de Causa e Efeito é uma metodologia de linha de base, precisa e estruturada para avaliar adequadamente as causas raízes de um determinado problema (ABBASI, 2020). Assim, todo problema tem causas específicas e essas causas devem ser analisadas e testadas, uma a uma, a fim de comprovar qual delas está realmente causando o efeito (problema) que se quer eliminar, anulando as causas, elimina-se o problema (FAESARELLA, 2006).

De acordo com FAESARELLA (2006), as causas principais podem ser divididas em 6 categorias principais, conforme segue:

- a) Método: expõe itens relacionados aos procedimentos operacionais como clareza e simplicidade dos procedimentos, facilidade de execução, ausência de passos essenciais ao desempenho da função, etc...
- b) Mão de obra: trata os aspectos físicos e mentais dos trabalhadores envolvidos no problema, a pontualidade, o absenteísmo, cumprimento das regras e o comportamento em geral.
- c) Máquina: refere-se aos equipamentos quanto a sua deterioração, manutenção, identificação, armazenagem, etc.
- d) Meio ambiente: aspectos relativos ao ambiente de trabalho como iluminação, resíduos, temperatura, vibração, pó, nas oficinas, escritórios, corredores, passagens e áreas ligadas ao problema em estudo.
- e) Material: abordam itens como situação dos fornecedores, fornecimento interno, condições de armazenagem, etc.
- f) Medida: detalham itens relacionados à medição como condições do instrumento de medida, condições de medição, frequência, inspeção, etc.

Ao concentrar na análise da causa raiz, tal procedimento oferece uma síntese visual com auxílio do diagrama das possíveis causas ligadas ao efeito (problema). Adicionalmente, mostra as dependências de causas e dos fatores subjacentes (ALAA, PASŁAWSKI e NOWOTARSKI, 2019).

O desenvolvimento do Diagrama de Causa e Efeito tem como origem um problema a ser analisado, onde em cada uma dessas seis ramificações, conforme a figura 1, são colocadas as possíveis causas de maneira condizente com a ramificação e, para cada causa, questiona-se com um “porquê” a fim de se aprofundar cada vez mais em cada uma dessas causas e em seguida investiga-las uma a uma a fim de chegar a raiz do problema (RIBEIRO & TEN CATEN, 2012).

2.1.3 Six Sigma

O Six Sigma (ou seis sigma) foi inicialmente desenvolvido e executado pela Motorola em 1987 (ALI 2018) e é definido como uma técnica sistemática e organizada para melhorar um processo estratégico, um novo produto ou desenvolvimento de serviço, que se concentra em métodos científicos e estatísticos para fazer reduções consideráveis nas taxas de defeitos determinadas pelo cliente.

A metodologia Six Sigma tem como princípio reduzir as quantidades de defeitos nos processos e também é apresentada como uma atividade estratégica que retém uma abordagem de negócio em medições financeiras. Trata-se de uma metodologia estruturada que desenvolve a qualidade através da melhoria contínua dos processos, seja na produção de um bem ou serviço (ROTONDARO, 2002).

Para PANDE et al. (2001), a estratégia Six Sigma apresenta um importante ciclo de melhoria conhecido como DMAIC (iniciais das palavras “define”, “measure”, “analyse”, “improve” e “control”). Observando o Quadro 01, de acordo com WERKEMA (2002), o DMAIC é dividido em cinco etapas, seguindo esta sigla, que se remete letra para letra aos objetivos de cada etapa, onde ao final permite-se um controle do desempenho dos processos.

Quadro 01: Descrição das Etapas do DMAIC.

Sigla	Etapas	Objetivos
D	Define (Definir)	Detalhar o problema e definir a meta do projeto.
M	Measure (Medir)	Mensurar o desempenho do processo, que durante a coleta de dados possibilita obter as primeiras ideias da causa do problema e identificar os pontos fortes e as oportunidades para sua melhoria.
A	Analyse (Analisar)	Analisar os dados coletados na fase anterior, identificar e organizar as causas potenciais do problema, quantificar a importância das causas potenciais.
I	Improve (Melhorar)	Propor, avaliar e implementar soluções potenciais com o objetivo de eliminar as causas fundamentais do problema prioritário analisado na fase anterior.
C	Control (Controlar)	Garantir o alcance da meta em longo prazo. São adotadas diversas ferramentas para controlar continuamente o desempenho dos processos.

Fonte: adaptado de Werkema, 2002.

2.2 PROCESSO DE CALCINAÇÃO

A matéria prima utilizada no processo de calcinação é o Antracito que, segundo HALVORSEN et al (1994), é um sólido escuro e ainda uma substância combustível formada pela decomposição parcial de vegetais, ausência de ar, sobre a influência de umidade, aumento de pressão a alta temperatura. Não é uma rocha, mas sim um fóssil de material vegetal selado entre camadas de rocha. O que diferencia o Antracito dos demais carvões minerais é seu alto

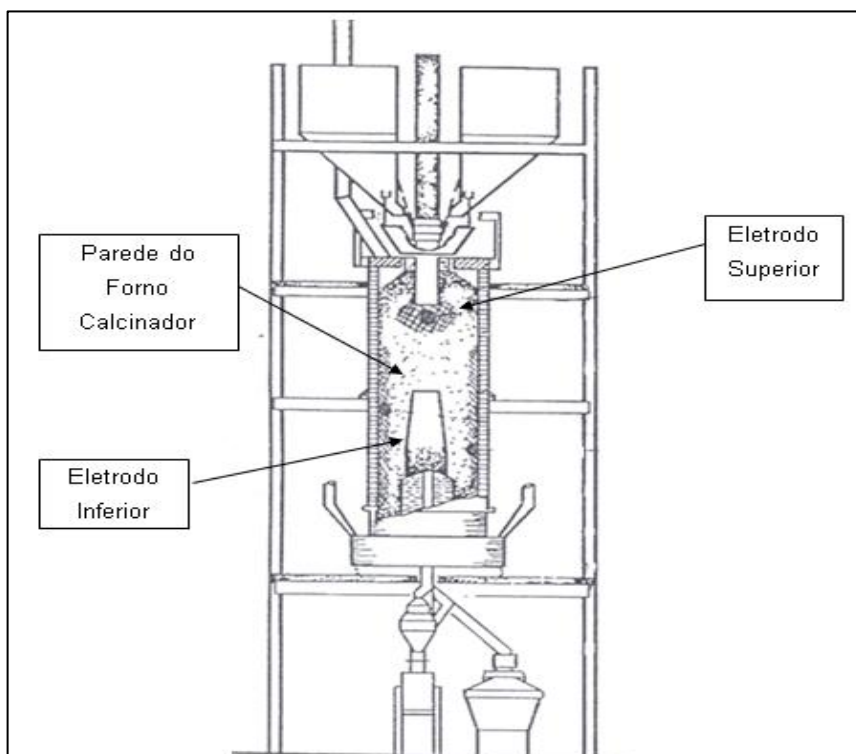
teor de carbono e baixo teor de voláteis. Segundo HALVORSEN et al (1994), o antracito bruto cru consiste em: Carbono (componente principal); Água (umidade); Voláteis (hidrocarbonetos); Cinzas (Si, Al, Fe, S, Ca, K, Ti, Mg).

O antracito bruto cru possui à alta resistividade elétrica (representada pelo símbolo Ωm no Sistema Internacional), sendo, segundo PORTO (2013), a resistividade elétrica (também resistência elétrica específica) uma medida da oposição de um material ao fluxo de corrente elétrica, ou seja, quanto mais baixa for a resistividade, mais facilmente o material permite a passagem de uma carga elétrica. Para que seja reduzida a resistividade elétrica do antracito cru, torna-se necessário um tratamento térmico, que é o objetivo do processo de calcinação do antracito.

A aplicação deste tratamento térmico (ou processo de calcinação de antracito em um forno elétrico) transforma o antracito cru, que é um material isolante, em antracito eletricamente calcinado (ECA), que por sua vez é um material condutor elétrico com diversas aplicações, principalmente na fabricação de eletrodos de Pasta de Soderberg, muito utilizados em fornos elétricos da indústria de ferro ligas (HALVORSEN 1994).

O processo de calcinação de Antracito em um forno elétrico, conforme ilustra a Figura 01, consiste na passagem de corrente elétrica através de uma coluna de antracito que se move entre dois eletrodos. Este processo elimina inicialmente a umidade, e por último os voláteis do antracito, ambos escapam pelo topo do calcinador, entrando na chaminé onde são queimados.

Figura 01: Descrição das Etapas do DMAIC.

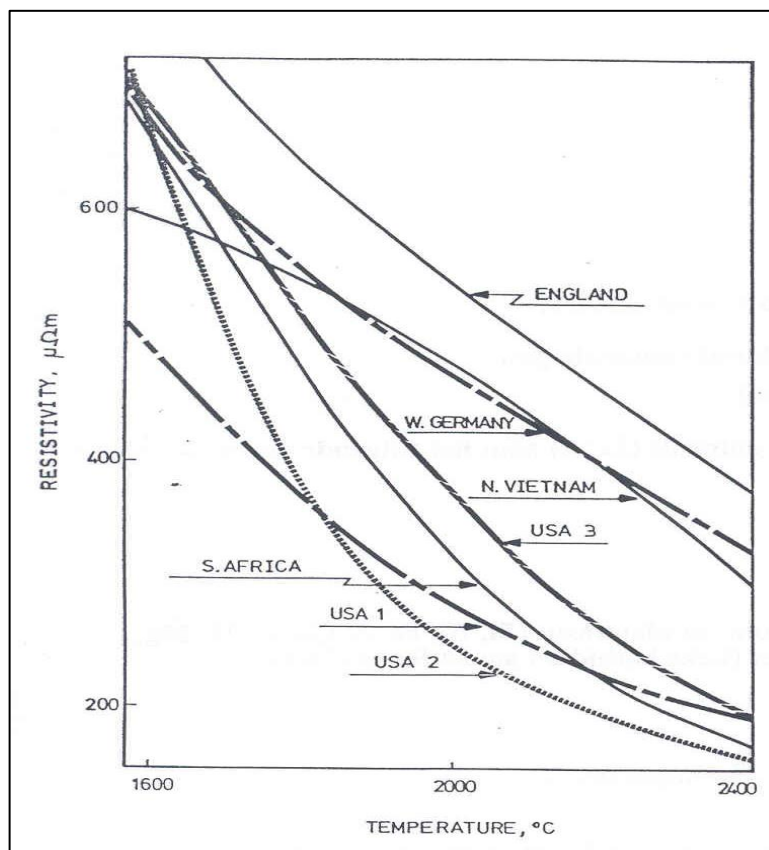


Fonte: Adaptado de Halvorsen, 1994.

Ao final do processo de calcinação do antracito, conforme HALVORSEN et al (1994) destacam, as propriedades esperadas para um ECA são: Alto teor de carbono; Visualmente se torna um pó seco (material sem umidade); Baixos teor voláteis (hidrocarbonetos); O conteúdo das cinzas em uma base de elementos será aproximadamente a do antracito bruto (Si, Al, Fe, S, Ca, K, Ti, Mg); Baixa resistividade elétrica ($\mu\Omega\text{m}$); Mais elástico que o antracito bruto; Baixa contração quando aquecido novamente; Parcialmente Grafitizado.

Ressalta-se que as propriedades de grão para grão do antracito calcinado podem variar bastante (resistência elétrica, conteúdo de grafite, elasticidade, contração/ expansão durante o aquecimento). Durante o processo de calcinação, cujo objetivo final é a produção de pasta eletródica, deve se monitorar a resistividade da carga no forno, que se dá pelo ajuste da Corrente elétrica em amperes (A) que passa na carga e pela descarga de material no forno em quilograma por hora (kg/h). Grandes quantidades de descarga tendem a esfriar o forno. Por outro lado, baixas correntes de operação não fornecem energia suficiente para a calcinação. Portanto, um ponto de equilíbrio operacional é sempre desejado. Os Antracitos são comumente classificados com base em sua origem; cada um possui um comportamento diante da calcinação, como pode ser visto na Figura 2, sendo alguns mais “fáceis” de calcinar que outros (HALVORSEN 1994).

Figura 02: Variação da resistividade de diferentes tipos de antracito de acordo com a temperatura de calcinação.



Fonte: Adaptado de Halvorsen, 1994.

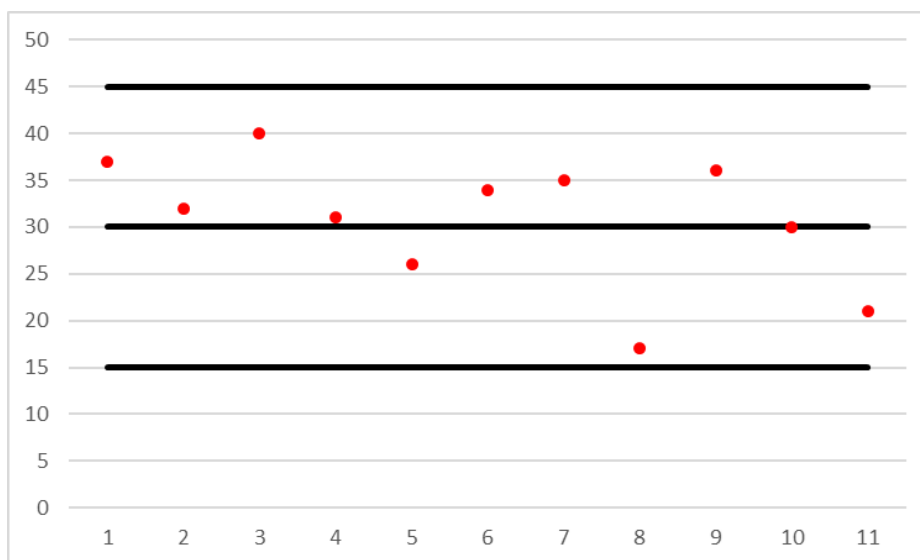
2.3 GRÁFICOS DE CONTROLE

Os gráficos (ou cartas) de controle surgiram como umas das primeiras ferramentas para controle de processo e foram desenvolvidos para a análise de dados provenientes de amostragem, substituindo a mera detecção e correção de produtos defeituosos pelo estudo e prevenção dos problemas relacionados à qualidade de um processo, visando impedir que produtos defeituosos fossem produzidos (RIBEIRO & TEN CATEN, 2012).

Assim, as amostras de um processo produtivo, coletadas periodicamente, são reunidas em grupos com o mínimo de variação, os grupos são selecionados e o valor médio de cada um é plotado no gráfico. Gráficos de controle são uma maneira de representar os dados coletados permitindo a avaliação pontual de cada análise em relação às tolerâncias do processo e aos parâmetros de produção do produto para aquele resultado. Estes gráficos permitem um controle maior da operação, gerando históricos e relatórios, facilitando visualizações de diversos períodos e comparar parâmetros utilizados em cada período, mostrando a eficiência de cada alteração realizada no processo, de maneira a garantir o controle e a otimização do processo.

Observado a Figura 03, um gráfico de controle contém três linhas horizontais: linha central (LM), que representa o valor médio da característica em estudo; e os limites superior (LSC) e inferior e controle (LIC). Na área entre esses limites de controle localizam-se as causas aleatórias do processo, que indicam que o processo está sob controle estatístico. Os pontos fora dos limites indicam a ocorrência causas especiais, que devem ser investigadas, pois indica que o processo não está sob controle (MONTGOMERY, 2009).

Figura 03: Exemplo de Carta De Controle.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os gráficos de controle são úteis para o gerenciamento do processo e redução da variabilidade, pois permitem distinguir as causas comuns das causas especiais (MACIEL et al, 2014) , sendo as causas comuns as variações dentro dos limites, tendo um processo controlado, e as especiais variações que extrapolam os limites, mostrando que o processo encontra se descontrolado e que resulta em um investigação.

3 LÓCUS, MATERIAIS E MÉTODOS DE PESQUISA

3.1 LÓCUS DE PESQUISA

A presente pesquisa foi realizada em uma empresa de insumos para a indústria metalúrgica localizada na região Sudeste. O setor onde se realizou a pesquisa nesta empresa foi o de fornos de calcinação. O forno pesquisado possui capacidade de 15 toneladas, produz aproximadamente 320 toneladas/mês e opera sob o princípio de arco elétrico. O produto deste forno é o antracito eletricamente calcinado (ECA) que é utilizado para a produção de pasta eletródica (de Soderberg).

3.2 RESISTIVIDADE E TESTE

Para o presente estudo, foi avaliada como característica determinante para o controle do processo de calcinação de antracito a resistividade do material apurada na saída do resfriador rotativo do forno.

Para esse teste, foi utilizado o procedimento interno de teste para a análise de resistividade de agregados secos. O valor da resistividade encontrado no material é o fator que determina a sua classificação como produto, sendo este valor uma especificação determinada pelo cliente, setor fábrica de pasta, portanto os limites do processo foram determinados e não calculados.

O teste consiste em recolher uma amostra de material na saída do forno com aproximadamente 5 kg e quartear a amostra em um quarteador (Figura 04) até obter uma amostra de 500 gramas, de acordo com o procedimento interno.

Figura 04: Quarteador de amostras.



Fonte: <https://www.comagequipamentos.com/quarteador-16c>

Essa amostra passa então por um processo de moagem em um moinho de galga (Figura 05) e, posteriormente, é peneirada em um jogo de peneiras composto nessa ordem por uma peneira superior de 0,850 mm, peneira de 0,212 mm e fundo.

Figura 05: Moinho de Galgas.



Fonte: <http://www.willmaquinas.com.br/maquinas/moinho-galga-melange/>

O material retido sobre a peneira de 0,212 mm deve ser armazenado em um recipiente que por sua vez é transferido para o aparelho de análise de resistividade e prensado com um peso de 300 kg, onde são aplicadas uma voltagem e uma determinada corrente sobre a amostra. Uma leitura da milivoltagem é realizada em um multímetro e, por fim, é calculado o valor da resistividade de acordo com a Equação 01, com base na altura da amostra.

Equação 01: Cálculo do Valor de Resistividade.

$$\rho = \frac{U * A}{i * l}$$

Fonte: Halvorsen 1994.

Sendo:

ρ - o valor da Resistividade da amostra ($\mu\Omega\text{m}$);

U - valor da Voltagem (mV) lida no multímetro;

A - área (mm²) da amostra, é um valor fixo devido a ser um corpo de prova.

i - valor da corrente (A) aplicada na amostra, é um valor fixo e programado em uma fonte de energia;

l - altura da amostra (mm), que é o valor medido no corpo de prova para o cálculo.

3.3 CONSTRUÇÃO DO GRÁFICO DE CONTROLE

O gráfico de controle foi construído utilizando planilha eletrônicas utilizadas na empresa pesquisada. Os dados foram obtidos via análise do teste de resistividade realizados pelos operadores dos fornos da empresa pesquisada e alimentam a base de dados; esta base por sua vez alimenta os gráficos que são gerados de maneira automática e disponibilizados para controle da operação do forno calcinador.

Esses dados são fornecidos a cada duas horas que é o período de intervalos entre cada análise de resistividade do material do forno, esse intervalo um padrão de amostragem interno baseado em ser tempo suficiente para que seja produzida pelo menos uma tonelada de material e tempo suficiente para que não tome o tempo dos operadores devido às outras atividades que eles realizam durante o turno. O tipo de gráfico escolhido foi do tipo Box Plot, pois serve para mostrar a variação dos dados no período do dia, com base em todos os resultados das análises.

A implantação do Gráfico de Controle levou como base o ciclo de melhoria DMAIC, assim, em cada etapa, foi realizado:

- a) Define: fornecer material dentro da especificação para a Fábrica de Pasta Eletródica e clientes externos;
- b) Measure: levantar dos dados do forno;
- c) Analyze: analisar os dados coletados e identificar comportamento do forno, revisão de procedimentos operacionais, investigação da operação quanto ao cumprimento dos procedimentos, avaliação do equipamento e análise das paradas não programadas;
- d) Improve: propor melhorias com base nas análises e investigações realizadas no item anterior;
- e) Control: monitorar dos dados após esse período.

4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

4.1 DESCRIÇÃO DA OBTENÇÃO DE DADOS

O acompanhamento da resistividade elétrica do ECA se deu pelo resultado da análise de resistividade, preenchido em relatório no computador onde foi gerado o gráfico de controle. O objetivo exigido pela empresa pesquisada é que não haja material fora da especificação de no máximo 800 $\mu\Omega$ m e no mínimo de 500 $\mu\Omega$ m, pois valores maiores que 800 $\mu\Omega$ m não atendem a fábrica de pasta e valores menores que 500 $\mu\Omega$ m consomem muita energia e elevam o custo de operação.

A análise, ilustrada na Tabela 01, foi realizada a cada duas horas e mostra a quantidade de análises dentro e fora da especificação no período de maio de 2019 a maio de 2020, contemplando o período antes, durante e depois da implantação do Gráfico de Controle.

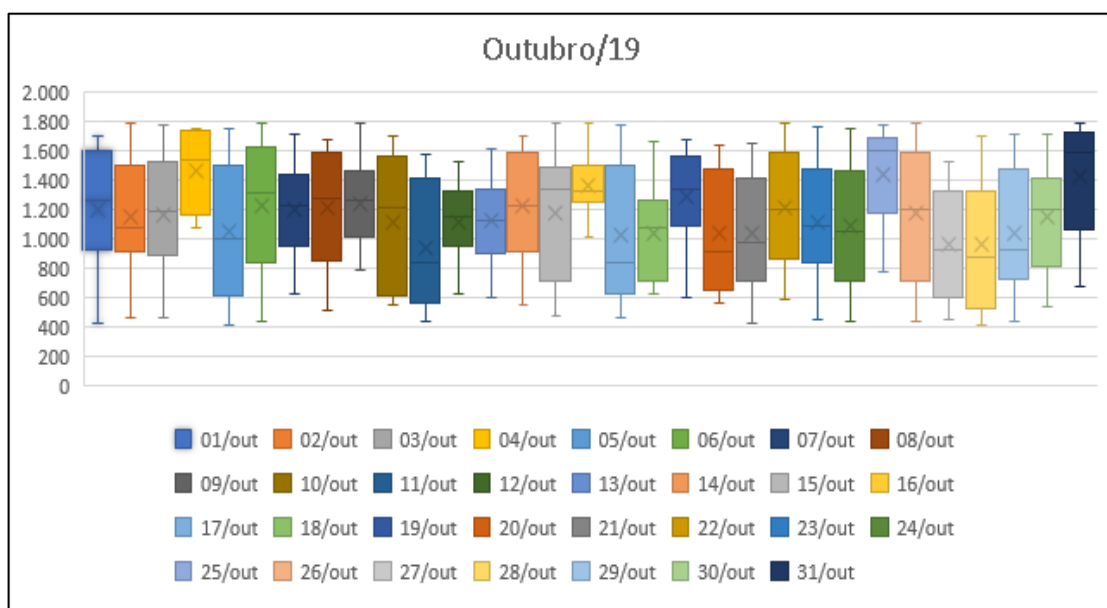
Tabela 01: Análises de Resistividade do forno a cada 2 horas.

	mai/19	jun/19	jul/19	ago/19	set/19	out/19	nov/19	dez/19	jan/20	fev/20	mar/20	abr/20	mai/20
Quantidade de análises menor que 800 $\mu\Omega m$	120	170	40	0	136	85	111	93	330	292	227	219	271
Quantidade de análises maior que 800 $\mu\Omega m$	230	137	345	375	227	287	249	279	42	10	53	82	28
% de Material fora de Especificação (>800 $\mu\Omega m$)	65,7%	44,6%	89,6%	100,0%	62,5%	77,2%	69,2%	75,0%	11,3%	3,3%	18,9%	27,2%	9,4%

Fonte: Elaborador pelo autor.

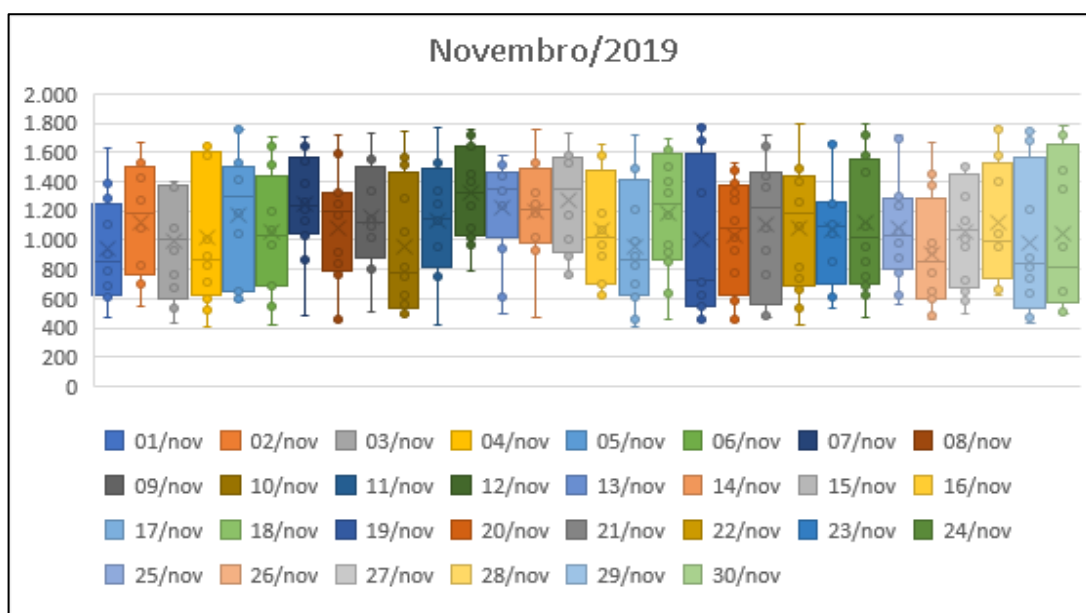
Com os dados apurados e esboçados na tabela 2 e mediante a necessidade de analisar a variação dos resultados por dia, foram construídos gráficos do tipo Box Plot, ilustrados nas Figuras 06, 07 e 08, respectivamente relativos a outubro, novembro e dezembro de 2019, onde permitiu-se observar os valores máximos e mínimos do dia. Assim, quanto maior a distância entre os máximos e mínimos do dia, maior a dispersão dos resultados neste dia. Destaca-se que, durante o período pesquisado, esta variação de resistividade esteve entre os valores de 400 a 1800 $\mu\Omega m$, sendo, portanto, considerada como alta variação, pois a meta da empresa seria valores entre 500 e 800 $\mu\Omega m$,

Figura 06: Variação de resistividade do ECA em outubro de 2019.



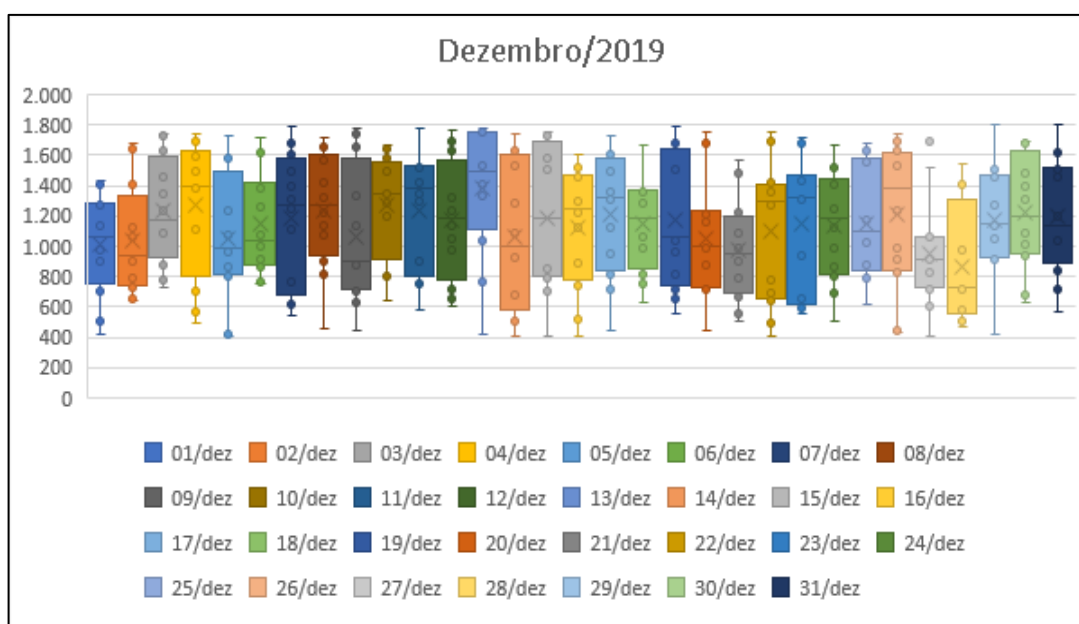
Fonte: Elaborador pelo autor.

Figura 07: Variação de resistividade do ECA em novembro de 2019.



Fonte: Elaborador pelo autor.

Figura 08: Variação de resistividade do ECA em dezembro de 2019.



Fonte: Elaborador pelo autor.

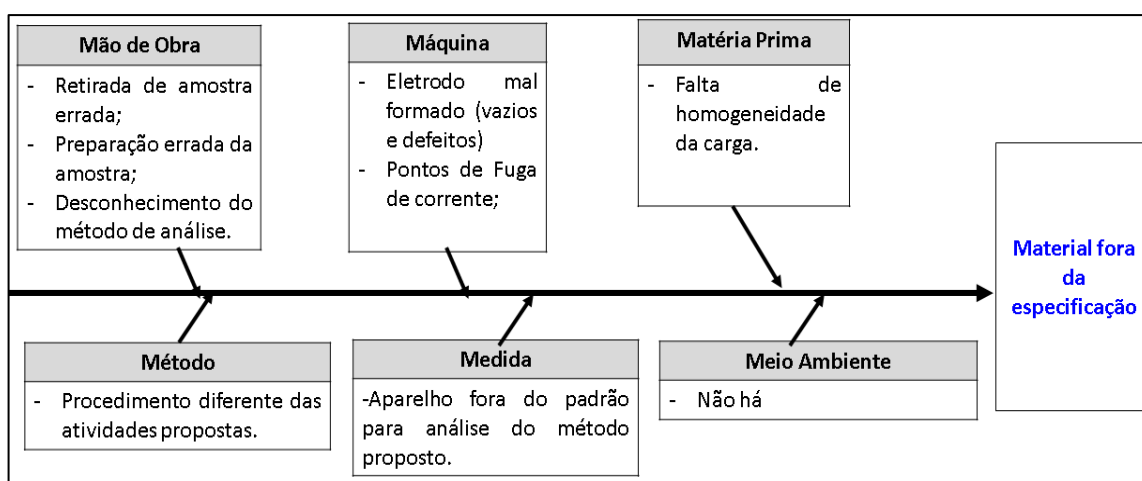
Após a realização dessas análises de variação de resistividade do ECA, no período de 3 (três) meses, foi elaborado o diagrama de causa e efeito, como pode ser visto no próximo tópico.

4.2 CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO

Com base nas análises dos resultados obtidos nos 3 primeiros meses, foi obtida uma grande quantidade de material fora da especificação, ou seja, respectivamente 77,2%, 69,2% e 75% de todo material que saiu do forno nesse período, como pode ser visto, anteriormente, na Tabela 01 e nos gráficos nas Figuras 06, 07 e 08.

Devido aos valores elevados de material fora da especificação, foi realizada uma reunião entre a operação e a gerência; construiu-se o diagrama de Ishikawa (ou Causa e Efeito) ilustrado na Figura 09, indicando as possíveis causas para essa quantidade de material fora da especificação que foram encontrados nesses meses pesquisados.

Figura 09: Diagrama de Causa e Efeito sobre Material Fora da Especificação



Fonte: Elaborador pelo autor.

Com base no diagrama proposto na Figura 09, pode-se observar algumas possíveis causas:

- Mão de Obra - operadores desconheciam ou executavam de maneira errada o procedimento correto de retirada, preparação e análise do material.
- Máquina - diversas quebras de eletrodo durante o período, levando à análise dos eletrodos quebrados e percebendo-se diversas malformações devido não haver um controle nem um procedimento de cozimento padronizado.
- Máquina - diversos pontos de fuga de corrente, isso quer dizer, energia que deveria estar passando na carga estava sendo dissipada pela estrutura.
- Matéria prima - material de entrada do forno com grande variação de granulometria em regiões diferentes do forno.
- Método - procedimento operacional defasado com as atividades propostas para operação do forno.
- Medida - aparelho de análise sem aferição de precisão.

A partir dessas análises de causas, partiu-se para a etapa de melhorias, como pode ser visto no próximo tópico.

4.3 APRESENTAÇÃO DAS MELHORIAS

Terminada a análise do Diagrama de Ishikawa e os dados levantados, finalizou-se a etapa três do DMAIC, de acordo com a Tabela 1, que trata da análise dos dados e das investigações. Com isso, para cada possível causa, foram propostas as melhorias: Treinamento dos operadores e conscientização sobre a importância da correta execução das tarefas de maneira correta; Elaboração do procedimento e padronização da operação de cozimento do eletrodo; Medições diárias de fuga de corrente e eliminação das possíveis causas da fuga. Procedimento de mistura da carga dos fornos. Revisão e atualização dos procedimentos que estavam desatualizados; Aferição da precisão dos equipamentos e certificação.

Nas melhorias propostas, pode-se notar a utilização da ferramenta de padronização de algumas tarefas reduzindo as variabilidades no processo. Tal ferramenta foi utilizada através da atualização e criação de procedimentos, de maneira a ficarem mais condizentes com a realidade da operação. Após essas etapas concluídas, iniciou-se a etapa de controle dos dados. O monitoramento do gráfico permitiu uma melhor visão do comportamento do forno levando a tomadas de decisões mais rápidas e mais seguras, já que todo o processo foi analisado e as melhorias feitas com base nas possíveis causas do problema.

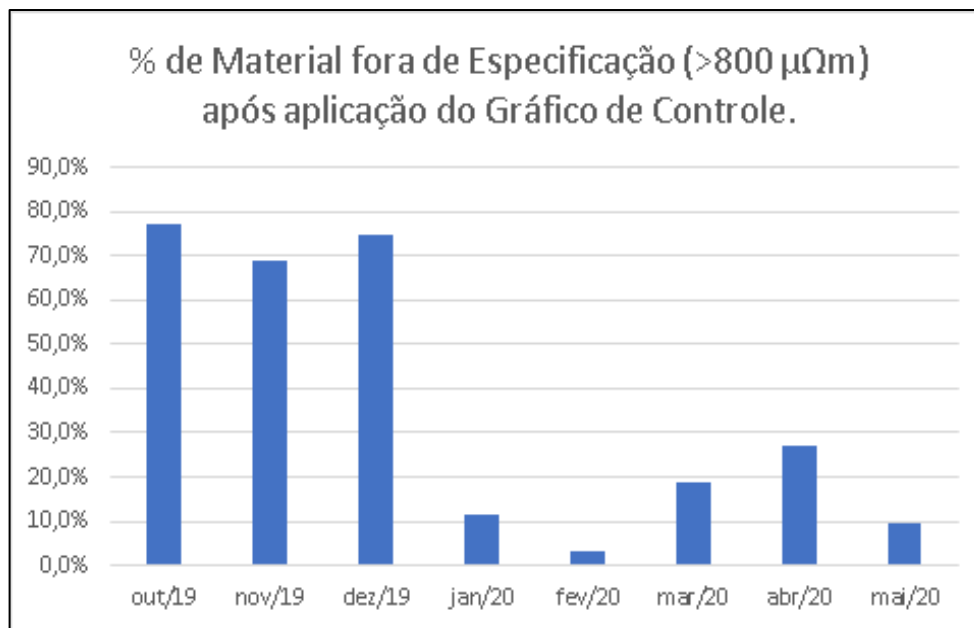
Com o gráfico, foi possível acompanhar a variação da resistividade, principalmente após alterações, como a de corrente, adequando assim a produção. Valores muito dispersos, ou seja variando muito entre a faixa de resistividade escolhida pela empresa de 500 à 800 $\mu\Omega\text{m}$, ou fora dessa faixa, levaram a investigações como temperatura na carcaça do forno, regiões com grandes diferenças de temperatura, que poderiam ser assimetrias do arco elétrico causando uma maior calcinação em uma região do forno e menor em outra, gerando um material heterogêneo. Com os gráficos das Figuras 10 e 11 foi possível notar essas variações.

Figura 10: Gráfico de % de Material Fora de Especificação antes da Aplicação dos Gráficos de controle



Fonte: Elaborador pelo autor.

Figura 11: Gráfico de % de Material Fora de Especificação após a Aplicação dos Gráficos de controle



Fonte: Elaborador pelo autor.

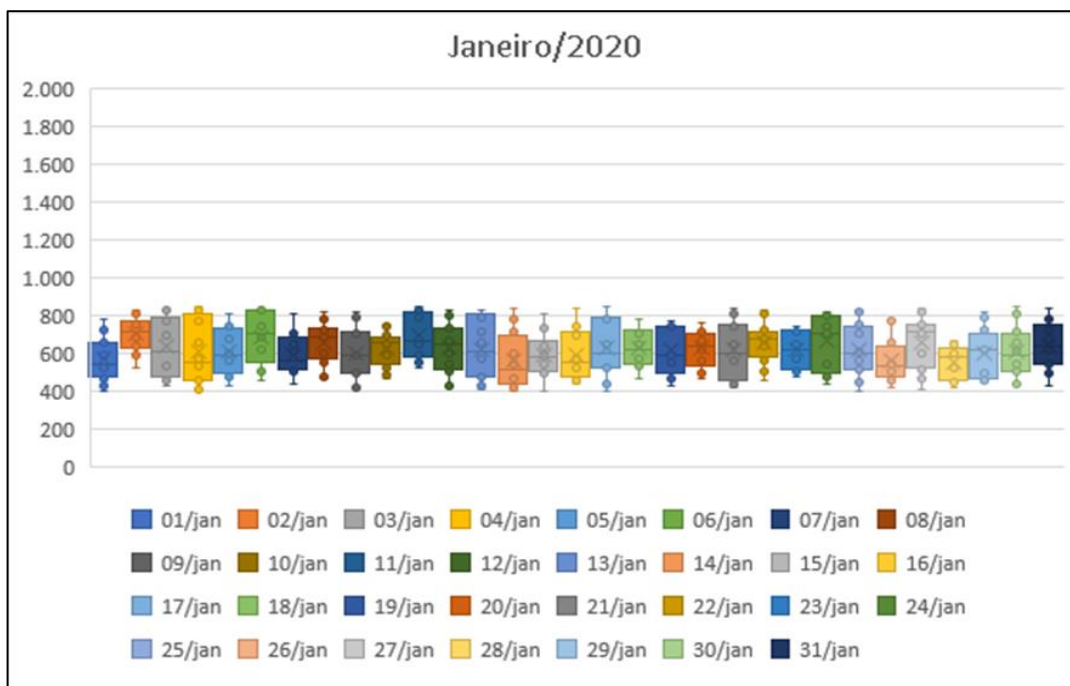
Nos 3 primeiros meses da utilização do Gráfico de Controle, buscou-se entender o comportamento do forno e fez a utilização das ferramentas Diagrama de Causa e Efeito e Metodologia Six Sigma e nos meses seguintes pode se ver o resultado da utilização da ferramenta de Gráfico de Controle e associação às outras ferramentas citadas, conforme demonstrado no Figura 11.

A partir de janeiro de 2020, observou-se uma redução significativa nos percentuais de material fora de especificação em relação ao período anterior a utilização dos gráficos, mostrando uma melhora no processo de produção, de dezembro de 2019 para janeiro de 2020, com queda de de 75% para 11,3%. Em fevereiro 2020 esta redução foi de 3,3% e em março de 18,9%, ou seja, percentuais significativamente melhores do aqueles de períodos anteriores, como pode ser visto na Figura 10.

Em abril de 2020, teve-se um aumento na quantidade de material fora da especificação, chegando à 27,2% de material fora de faixa, devido a problemas elétricos da fábrica e testes de materiais novos para calcinação, os quais não se conhecia o comportamento no forno, mas foi obtido um resultado satisfatório diante da gerência quando comparado a outros períodos, anteriores à aplicação dos gráficos de controle, como pode ser visto no gráfico da Figura 10.

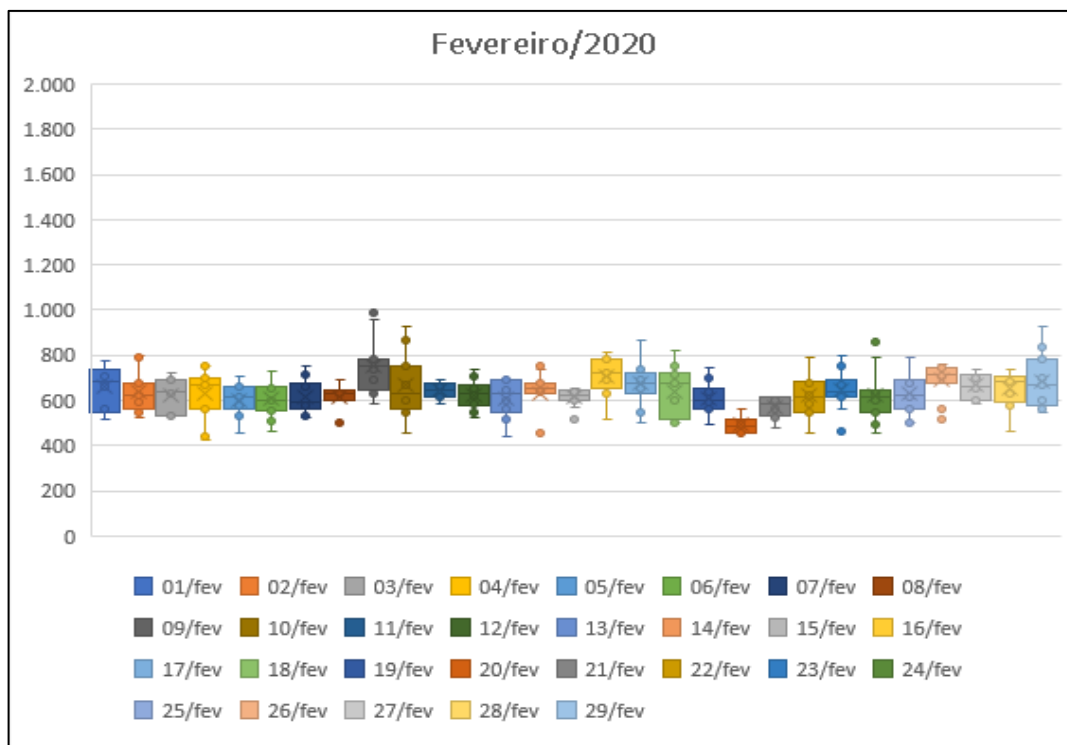
Em maio de 2020, retornou-se a carga normal do forno e obteve-se novamente um resultado de apenas 9,4% de material fora da especificação. Nas Figuras 12, 13 e 14, observou-se uma variação da resistividade no período de janeiro de 2020 a maio de 2020 na faixa de 400 a 1200 μΩm, apesar de valores fora da faixa estipulada de 500 à 800 μΩm, o percentual de material dentro da faixa de resistividade foi satisfatório.

Figura 12: Variação de resistividade do ECA em janeiro de 2020.



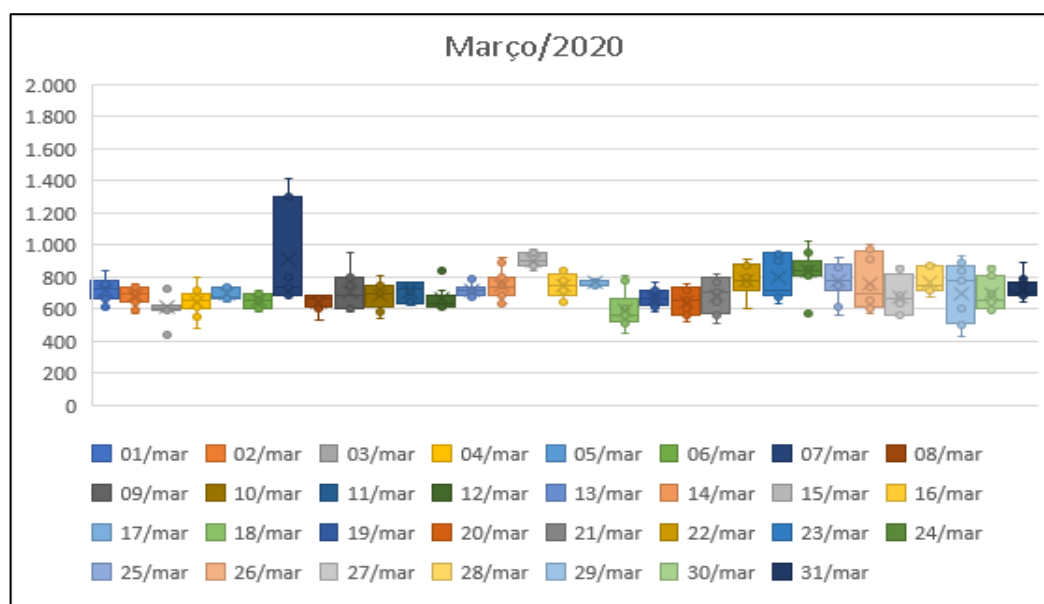
Fonte: Elaborador pelo autor.

Figura 13: Variação de resistividade do ECA em fevereiro de 2020.



Fonte: Elaborador pelo autor.

Figura 14: Variação de resistividade do ECA em março de 2020.



Fonte: Elaborador pelo autor.

A partir dos subsídios oferecidos pelo referencial teórico e das informações obtidas na análise dos dados, no próximo tópico é apresentada a conclusão deste artigo.

5 CONCLUSÃO

Com base nos dados apresentados, mostrou-se que a implementação do Gráfico de Controle, seguindo o ciclo de melhoria DMAIC, e com o auxílio do Diagrama de Causa e Efeito, foi possível investigar as causas do material fora de especificação e propor diversas melhorias em um processo de calcinação de Antracito.

Com utilização de Gráficos de Controle, foi gerada uma redução, utilizando a média da quantidade de material fora da especificação nos três primeiros meses e nos cinco meses seguintes da implantação do Gráfico de Controle, de material fora de especificação da ordem de 56 % sendo, portanto, uma redução média por mês de 179,2 toneladas de material fora de especificação.

Com essa redução da quantidade de material reprovado, foi possível garantir o abastecimento do setor fábrica de pasta eletródica, com material dentro da especificação, evitando paradas e atrasos na produção, reduzir os custos de operação de calcinação do material onde antes da do gráfico a quantidade de material variava de 40% a 100% de material reprovado, gerando um custo de recalcinação desse material para adequação do mesmo, e após a aplicação do gráfico e monitoramento do processo foi possível reduzir para valores de 3,3% até 27,2 %, sendo esse valor de 27,2% um teste com um tipo diferente de antracito, valores abaixo dos valores alcançados anteriormente, comprovando a eficácia da feramente aplicada e atingindo os objetivos do estudo, além disse observando os gráficos dos meses de janeiro até maio possuem

poucos pontos abaixo de 500 $\mu\Omega$ m, garantindo assim que não haja consumo excessivo de energia elétrica na calcinação.

6 REFERÊNCIAS

ABBASI, O, GOLABCHI, M., JAFFARI, K.G., NOORZAI, E. **Explorando as causas dos atrasos na indústria de construção usando um diagrama de causa e efeito: estudo de caso para o Irã.** 2020

ALAA, AL-Saedi; PASŁAWSKI, Jerzy; NOWOTARSKI, Piotr. **Quality Management to continuous improvements in the process of Ready-Mix Concrete production.** IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Tamil Nadu, v. 518, n. 2, 2019.

ALI, A., Y. **Six Sigma-DMAIC and Food Waste Hierarchy-Based Framework for Reducing Food Waste in University Canteens in Ethiopia,** International Journal of Research in Industrial Engineering, 2018.

CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução. 5ed. São Paulo: LTC, 2002.**

CAMPOS, VICENTE F. (1992) “TQC – Controle da Qualidade Total (no estilo japonês)”, Belo Horizonte.

COMAS, A.S., OSORIO, L.E.V., VARGAS, M.P., GARCÍA, M.C., RODADO, D.N., PALACIO, A.T., **Diagnostic tool for radical improvement in business processes;** IOPSCIENCE; 2019.

CUNHA, C., R., C. PEREIRA, V. L. P., **Aplicabilidade da Metodologia Six Sigma em Projetos na Indústria. Gestão e Gerenciamento, p. 41-51,** abr. 2020

DE MORI, C., MIRANDA, M., Z., GUARIENTI, E., M., **Problemas de Qualidade na Produção Agrícola e Armazenagem de trigo: Aplicação do Diagrama de Causa e Efeito.** EMBRAPA- Rio Grande do Sul, 2019.

DUNCAN, A.J.: **Quality Control and Industrial Statistics, 4th ed.,** Irwin, Homewood, ILL,(1974)

ESLAMI, R., AHMADI, S.,**Investigating the Role of Educational Media on Secondary School Students’ Learning Process Improvement in Jahrom City,** Journal of Humanities Insights, 2019.

FAESARELLA, I.S.; SACOMANO, J.B.; CARPINETTI, L.C.R.; **Gestão da Qualidade: Conceitos e Ferramentas.** USP. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Produção, 2006.

FLEURY, A.; FLEURY, M.T. L.(1995) **Aprendizagem e inovação organizacional: As expectativas de Japão, Coréia e Brasil.** São Paulo, Atlas.

HALVORSEN, S.A.: **Process Theory for Calcining Furnaces,** 1994;

MIN, Z. HAIFENG, Z., **Discussion on the Feasibility of Industrial Fuel Gas Prepared by Lurgi Gasification Which Used Anthracite as Raw Material,** IntechOpen, (2019)

- MITCHELL, E. **CSR performance: driven by TQM implementation, size, sector** International Journal of Quality & Reliability Management, v. 24, n. 7, p. 722-737, 2007.
- MONTGOMERY, D.C.: **Design and analysis of experiments**. John Wiley and Sons, New York, 2nd ed.(1984).
- MONTGOMERY, D.C. **Introduction to Statistical Quality Control**. John Wiley and Sons, New York. (1985),
- MONTGOMERY, D. C. **Introdução Ao Controle Estatístico Da Qualidade (4 ed.)**. Rio de Janeiro: LTC,2009.
- MACIEL, T.H., BRANCO, G.M., WERNER, L. **CARTAS DE CONTROLE MULTIVARIADAS: ESTUDO DE CASO EM VINÍCOLAS ITALIANAS**, UERJ, Rio de Janeiro 2014.
- PANDE, P.S., NEUMAN, R. P., CAVANAGH, R.R. **Estratégia Seis Sigma: como a GE, a Motorola e outras grandes empresas estão aguçando seu desempenho**. Rio de Janeiro: Qualitymark, p. 134-235, 2001.
- RIBEIRO, J. D., & TEN CATEN, C. S. **Série monográfica qualidade: Controle estatístico do processo**. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2012.
- ROSA, A.F.P; SOUZA, R.S, ROYER, R.:**Roteiro para Aplicação Do Lean Seis Sigma na Melhoria de Processos Industriais**; R. Gest. Industr., Ponta Grossa, v. 15, n. 1, p. 86-100, jan./mar. 2019.
- ROTONDARO, R. G.**Seis Sigma: Estratégia Gerencial para melhoria de processos, produtos e serviços**. São Paulo: Atlas, p. 11-46, 2002.
- SILTORI, P.F.S., RAMPASSO, I.S., MARTINS, V.W.B., ANHALON, R., SILVA, A.L.F., NOGUEIRA, E.L., CAMPOS, W.S., JUNIOR, J.B.O., ALBUQUERQUE, M.M.: **Using Control Charts for Variables**, Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications, 2019.
- SILVA, D., PINTO, J.S.: **Analysis of ISO 9001 certification benefits in Brazilian companies**, Journal Quality Total Management and Business Excellence, 2019.
- SIKORA, M., JANÍK, P., PUSTEJOVSKA, P., JURSOVÁ, J. **The Anthracite as Sinter Fuels**, Sciendo, (2019)
- SILVA, P.G., NASCIMENTO, M.M.M., **Diagrama de Ishikawa e técnicas de planejamento e controle da produção em uma empresa varejista do setor têxtil em Marabá-PA**; 2015.
- SOBEK II, D.K., JIMMERSON, C. **A3 Reports: Tool for Process Improvement**. IIE Annual Conference. Proceedings, 2004.
- WERKEMA, M. C. **Criando a Cultura Seis Sigma**. Rio de Janeiro: Qualitymark, p.13-45, 2002.
- WOMACK, J.P., JONES, D.T., ROSS, D.**How lean production can change the world**. N. Y. Times Mag. 23, 20–38. (1990).
- WOODS, M.D., **Improving quality and safety in healthcare**, Clin Med, p. 47–56, 2019.