MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto –UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Produção

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA NA ANÁLISE DA RECUPERAÇÃO METALÚRGICA EM UMA MINERADORA DE ITABIRA – MG

Priscila Jardim Mariano Cabral

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

JOÃO MONLEVADE

Julho, 2019

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto –UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Produção

Priscila Jardim Mariano Cabral

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA NA ANÁLISE DA RECUPERAÇÃO METALÚRGICA EM UMA MINERADORA DE ITABIRA – MG

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Produção na Universidade Federal de Ouro Preto.

Professora Orientadora: Prof. MSc. Elisângela Fátima de Oliveira

JOÃO MONLEVADE

Julho, 2019

C117a Cabral, Priscila Jardim Mariano.
Aplicação da metodologia seis sigma na análise da recuperação metalúrgica em uma mineradora de Itabira-MG [manuscrito] / Priscila Jardim Mariano Cabral. - 2019.

67f.: il.: color; grafs; tabs; Quadros; Siglas.

Orientadora: Profª. MScª. Elisângela Fátima de Oliveira.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia de Produção.

1. Indústria mineral. 2. Produção enxuta. 3. Metalurgia - estimativas. I. Oliveira, Elisângela Fátima de . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Titulo.

CDU: 658.5

Catalogação: ficha.sisbin@ufop.edu.br

ATA DE DEFESA

Aos 10 dias do mês de Julho de 2019, às 18 horas, no Laboratório banco de dados/Redes deste instituto, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso pela aluna Priscila Jardim Mariano Cabral, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores Daniel Francisco Bastos Monteiro e Thiago Geraldo dos Santos. O (a) aluno (a) apresentou o trabalho intitulado: "APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA NA ANÁLISE DA RECUPERAÇÃO METALÚRGICA EM UMA MINERADORA DE ITABIRA – MG". A comissão examinadora deliberou, pela:

(X) Aprovação

( ) Aprovação com Ressalva - Prazo concedido para as correções:_____

( ) Reprovação com Ressalva - Prazo para marcação da nova banca:_____

( ) Reprovação

Do (a) aluno (a), com a nota 9,5. Na forma regulamentar e seguindo as determinações da resolução COEP 04/2017 foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) aluno (a).

João Monlevade, 10 de Julho de 2019.

Elisângela F. de Oliveira
Elisângela Fátima de Oliveira

Daniel F.B. Monteiro
Daniel Francisco Bastos Monteiro

Thiago Geraldo dos Santos
Thiago Geraldo dos Santos

Priscila Jardim Mariano Cabral
Priscila Jardim Mariano Cabral

TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado "APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA NA ANÁLISE DA RECUPERAÇÃO METALÚRGICA EM UMA MINERADORA DE ITABIRA – MG " é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem o devido referenciamento ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade,10 de julho de 2019

Priscila Jardim Mariano Cabral

Priscila Jardim Mariano Cabral

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Seis Sigma como programa estratégico e operacional..... 19
Figura 2 - Processos: Original e com Variação Reduzida..... 21
Figura 3 - Significado da qualidade Seis Sigma – Curto prazo..... 22
Figura 4 - Significado da qualidade Seis Sigma – Longo prazo 22
Figura 5 - Ilustração do Conceito de Recuperação Metalúrgica 26
Figura 6 – Macroprocesso Minério de Ferro 27
Figura 7 - Fluxo do método DMAIC..... 30
Figura 8 - Definição de meta pelo Simulador..... 36
Figura 9 - Estratificação do problema 42
Figura 10 - Simulador para dados de 2017..... 42
Figura 11 - Mapeamento de Processo..... 46
Figura 12 - Ishikawa para o Foco (Elevado % Ferro no Rejeito)..... 47
Figura 13 - Ishikawa para o Foco (Horas de Transbordo)..... 47
Figura 14 - Ishikawa para o Foco (% de Ferro no rejeito da flotação)..... 48
Figura 15 - Ishikawa para o Foco (% Lama) 48
Figura 16 - *Dashboard* 57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Análise Histórica do Indicador Recuperação Metalúrgica em 2017..... 34
Gráfico 2 – *Boxplot* do Indicador Recuperação Metalúrgica em 2017 35
Gráfico 3 - Histograma do Indicador Recuperação Metalúrgica..... 35
Gráfico 4 - Análise do Indicador Principal em relação a meta proposta..... 37
Gráfico 5 - Teste de Normalidade 39
Gráfico 6 - Análise de Variabilidade..... 40
Gráfico 7 - Análise de Desempenho Recuperação Metalúrgica..... 40
Gráfico 8 - Análise Histórica % de Ferro no Rejeito Global..... 43
Gráfico 9 - Análise Histórica % de Ferro no Rejeito Flotação..... 44
Gráfico 10 - Análise Histórica % Lama 45
Gráfico 11 - Análise Histórica Perdas Físicas..... 45
Gráfico 12 - Verificação do alcance da meta (% de Ferro no Rejeito Global)..... 53
Gráfico 13 - Verificação do alcance da meta (% de Lama)..... 53
Gráfico 15 - Verificação do alcance da meta (% de Ferro no Rejeito da Flotação)..... 54
Gráfico 14 - Verificação do alcance da meta (Perdas Físicas)..... 54
Gráfico 16 - Verificação do alcance da meta (Recuperação Metalúrgica)..... 55
Gráfico 17- Análise Comparativa de Desempenho 58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Atividades e Ferramentas do DMAIC..... 24
Quadro 2 - Contrato do projeto..... 31
Quadro 3 - Cronograma do Projeto 33
Quadro 4 - Detalhamento e meta do indicador principal..... 36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Escala Sigma (longo prazo) x Defeitos por milhão x Nível de Qualidade..... 23
Tabela 2 - Estatística descritiva do indicador Recuperação Metalúrgica em 2017..... 34
Tabela 3 – Análise Histórica do Indicador 37
Tabela 4 – Memória de Cálculo dos Ganhos do Projeto 38
Tabela 5 - Matriz Comprovação de Causas..... 49
Tabela 6 - Priorização das Soluções 50
Tabela 7 - Plano de Ação..... 51
Tabela 8 - Memória de Cálculo após o projeto 56

LISTA DE SIGLAS

AF – Alta Frequência

Al2O2 – Dióxido de Alumínio

CE - Conceição

DMAIC – Definir, Mensurar, Analisar, Melhorar e Controlar.

DOE - Planejamento de Experimentos

Fe - Ferro

KPI - Key Performance Indicator

MgO – Óxido de Magnésio

OCAP – Out Of Control Plan

PAF – Peneiramento de Alta Frequência

PCP - Planejamento e Controle de Produção

PDCA – Plan, Do, Check, Act

PI – Process Book

RJ - Rejeito

ROM – Run of Mine

RVT – Registro de Validação Técnica

RESUMO

A globalização reforça a necessidade por parte das empresas em aprimorarem seus processos e produtos para se manterem competitivas no mercado, que está cada dia mais dinâmico e exigente. Na indústria mineral não é diferente, sua sobrevivência está intimamente relacionada à otimização de seus processos produtivos, visando o melhor aproveitamento de suas reservas e a redução dos custos. A necessidade do estudo é vislumbrada pelo desdobramento estratégico da empresa, que propõe uma análise dos processos via grupos de melhoria contínua. Os projetos Seis Sigma, por sua abordagem estratégica, são considerados um pilar para este desdobramento. O objetivo geral da pesquisa é aplicar a metodologia Seis Sigma visando promover uma melhoria na performance do processo de beneficiamento da empresa estudada. Por meio de um estudo de caso, a metodologia foi implementada com intuito de nortear o projeto nas fases do DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar). Como resultados, obteve-se a melhora na performance do indicador principal e ganhos secundários relacionados ao mesmo, o que demonstrou a eficiência dos resultados propostos pela metodologia quando aplicada de maneira adequada.

Palavras-chave: Indústria Mineral, Seis Sigma; DMAIC.

ABSTRACT

Globalization reinforces the need for companies to improve their processes and products to stay competitive in the increasingly dynamic and demanding market. In the mineral industry it is no different, its survival is closely related to the optimization of its productive processes, aiming at the best use of its reserves and the reduction of costs. The need of the study is glimpsed by the strategic deployment of the company, which proposes an analysis of the processes through groups of continuous improvement. Six Sigma projects, for their strategic approach, are considered a pillar for this deployment. The general objective of the research is to apply the Six Sigma methodology to promote an improvement in the performance of the productive process of a company. Through a case study, the methodology was implemented in order to guide the project in the DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve and Control) phases. As results, the improvement in the performance of the main indicator and related secondary gains was obtained, which demonstrated the efficiency of the results proposed by the methodology when applied properly.

Keywords:. Mineral industry, Six Sigma; Dmaic.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14

1.1 Problema de Pesquisa 15

1.2 Objetivos 15

1.2.1 Objetivo Geral 15

1.2.2 Objetivos Específicos 16

1.3 Justificativa 16

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO 18

2.1 Metodologia Seis Sigma - Contextualização; aplicações e vantagens 18

2.2 Estratégias de Negócio e o Seis Sigma 19

2.3 Nível Sigma e o Método DMAIC 20

2.4 O Minério de Ferro e a Recuperação Metalúrgica 25

3. METODOLOGIA DE PESQUISA 27

3.1 Caracterização do Objeto de Estudo 27

3.2 Contextualização da Pesquisa 28

3.3 Procedimentos Metodológicos 29

3.3.1 Coleta e análise de dados 29

3.3.2 Validação dos Dados 30

4. DESENVOLVIMENTO 31

4.1 Etapa D – Definir 31

4.1.1 Termo de Abertura do Projeto 31

4.1.2 Detalhamento do indicador principal 33

4.1.3 Definição da Meta 36

4.1.4 Cálculos dos ganhos financeiros previstos do projeto 37

4.2 Etapa M – Medir 38

4.2.1 Análise da confiabilidade dos dados 38

4.2.2 Determinação do nível sigma e controle do processo 39

4.2.3 Estratificação do Problema e definição de focos de atuação 41

4.2.4 Definição de metas específicas 42

4.2.5 Análise da Variação dos Focos 43

4.3 Etapa A – Analisar 46

4.3.1 Levantamento e priorização das causas 46

4.3.2 Comprovação das causas 49

4.4 Etapa I – Melhorar 50

4.4.1 Definir possíveis soluções 50

4.4.2 Plano de Ação 51

4.5 Etapa C – Controlar 52

4.5.1 Verificação do alcance das metas e comportamento do indicador principal 52

4.5.2 Cálculo dos ganhos financeiros reais do projeto 55

4.5.3 Padronização, Monitoramento e Ações Corretivas 56

4.5.4 Análise comparativa do Desempenho 57

5. CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS 59

REFERÊNCIAS 61

APÊNDICES 63

APÊNDICE A – PI PROCESS BOOK 63

APÊNDICE B – MATRIZ DE PRIORIZAÇÃO ESFORÇO X IMPACTO 64

APÊNDICE C – OCAP (OUT-OF-CONTROL-PLAN) 67

1. INTRODUÇÃO

Em 1930, nos Estados Unidos, inventado pelo Dr. Walter A. Shehart, da "*Bell Telephone Laboratories*", nascia o controle da qualidade moderno, com a aplicação industrial do gráfico de controle para análise de dados resultantes de inspeção. Entretanto, a Segunda Guerra Mundial foi o grande estimulante para a aplicação do controle de qualidade em um maior número de indústrias norte-americanas (WERKEMA, 2013).

Após a derrota do Japão na Segunda Guerra Mundial, as forças norte-americanas identificaram problemas em relação à qualidade do sistema telefônico do Japão e então, determinaram que a indústria de telecomunicações japonesa implantasse um programa eficiente de qualidade com o objetivo de eliminar os defeitos e a falta de uniformidade na qualidade dos equipamentos produzidos. A partir de então, as forças de ocupação norte-americanas começaram a "educar" as indústrias do Japão, o que gerou dificuldades e restrições pelo modelo não ter sofrido modificações para se adequar melhor à cultura japonesa (WERKEMA, 2013).

Ao passar dos anos, pesquisadores e usuários japoneses perceberam que o controle da qualidade dependia altamente de fatores humanos e culturais e, como em qualquer ramo do conhecimento, são universais e aplicáveis em todo mundo, devendo apresentar diferenças entre um país e outro. A partir de então, foi desenvolvido um modelo que fazia a fusão entre sistema norte-americanos e o método japonês, que evoluiu para o Controle da Qualidade Total (WERKEMA, 2013).

Em relação à evolução do controle da qualidade moderno tem-se um marco bastante importante, o nascimento do Seis Sigma na Motorola. Em 1987, a Empresa Motorola criou a metodologia Seis Sigma, com o objetivo de aumentar a competitividade da empresa. O sucesso da metodologia foi confirmado com a conquista do Prêmio Nacional de Qualidade *Malcolm Baldrige*, bem como a obtenção do ganho de bilhões de dólares após a implementação (PYZDEK; KELLER, 2011).

A utilização do Seis Sigma no Brasil está crescendo a cada dia, as empresas que possuem unidade de negócio no exterior já implementavam a metodologia há mais tempo e, realizavam a capacitação de seus funcionários no exterior, porém hoje, como grande parte destas empresas já implementam em unidades nacionais, realizam a capacitação por consultorias nacionais ou pessoas treinadas da sua própria equipe. A

partir da divulgação pelas empresas dos resultados obtidos, observou-se um impulso em relação à aderência de várias organizações que sequer tinham ideia do que se tratava o programa (WERKEMA, 2013).

A concepção de que o programa Seis Sigma é uma abordagem para melhoria da qualidade, que proporciona um impacto positivo no desempenho do negócio, se formou não apenas na indústria de manufatura, mas também em operações de serviços, revelando que o Seis Sigma está inserido no âmbito das discussões estratégicas das organizações (SANTOS; MARTINS, 2008).

1.1 Problema de Pesquisa

A sobrevivência da indústria mineral está intimamente relacionada à otimização de seus processos produtivos, visando o melhor aproveitamento de suas reservas e a redução dos custos. Para isto, a maximização da recuperação metalúrgica e a melhoria da qualidade dos produtos é de primordial importância. A recuperação metalúrgica representa o percentual do metal de interesse que é recuperado no produto. A queda na recuperação metalúrgica pode ser provocada por vários fatores como a elevação dos teores de ferro no rejeito, a queda na qualidade do concentrado ou perdas físicas das caixas.

Mediante o problema apresentado, faz-se necessário aumentar o percentual da recuperação metalúrgica, que é medida pela relação entre os Teores de Ferro na alimentação e no concentrado pelas massas de sólidos na alimentação e no concentrado: indicador do tipo quanto maior melhor. Diante desse contexto, a pesquisa visa responder a seguinte pergunta: Através da aplicação da metodologia Seis Sigma, é possível otimizar as variáveis que impactam na recuperação metalúrgica do minério de ferro?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é aplicar a metodologia Seis Sigma visando promover uma melhoria na performance do processo de beneficiamento da empresa estudada.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o resultado pretendido, os objetivos secundários deste estudo são:

- ✓ Compreender o processo produtivo da organização estudada através do mapeamento de processos;
- ✓ Definir as ferramentas do método DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) que se enquadram no contexto desta pesquisa;
- ✓ Identificar as variáveis que impactam no processo de recuperação metalúrgica;
- ✓ Estratificar os indicadores de processo que impactam na variável Recuperação Metalúrgica;
- ✓ Propor soluções com base nestes indicadores e no impacto destes nas variáveis recuperação metalúrgica, complexidade, custo e prazo;
- ✓ Estimar ganhos econômicos no processo com a implantação da metodologia DMAIC.

1.3 Justificativa

O Planejamento Estratégico é um dos principais focos de atenção da alta administração das empresas, pois trazem resultados significativos quando se tem a atuação sistemática em relação a este mecanismo. O objetivo geral deste planejamento está direcionado a tomada de decisão positiva para enfrentar ameaças e aproveitar as oportunidades encontradas em seu ambiente. Pequenas, médias e grandes empresas, devem decidir os rumos que sejam mais adequados aos seus interesses (ALDAY, 2000).

A globalização reforça a necessidade de as empresas aprimorarem seus processos e produtos para se manterem competitivas e atenderem às expectativas de um mercado dinâmico e de acionistas cada vez mais exigentes que buscam maximizar seus lucros. O Seis Sigma é uma iniciativa que vem ao encontro dessas expectativas. Seis Sigma é, portanto, uma ferramenta estratégica de gerenciamento que tem sido adotada pelas empresas, revolucionando os negócios nas grandes corporações. Essa metodologia vem se aplicando nos processos operacionais e transacionais com o objetivo de melhorá-los, atacando as causas raízes e alcançando o nível de qualidade requerido pelos clientes. É também aplicada na criação de novos processos e produtos (ARIENTE et al., 2005).

A necessidade do presente estudo é vislumbrada, principalmente, pelo desdobramento estratégico da empresa, que propõe uma análise sistemática dos processos via grupos de melhoria contínua, que trabalham com metodologias Seis Sigma, PDCA e Kaizen, identificando necessidades de melhorias, com o objetivo de otimizar recursos e maximizar os lucros. Envolve a priorização dos critérios competitivos, a análise do cenário interno e externo, o acompanhamento de indicadores, a definição dos processos críticos e de suas capacidades, propostas de atuação e, quando viável, a padronização das atividades e abrangência a todas as Unidades da Organização.

Especificamente, o projeto tem origem da área de Tratamento de Minério, que deve otimizar seu desempenho, aumentando a concentração de ferro no seu produto e a reduzindo no rejeito. A Usina da Mineradora estudada foi projetada para atingir uma recuperação metalúrgica na ordem de 80% e desde sua estabilização em 2015 pratica em média 76,57%. Considera-se um problema crítico, pois a maximização deste indicador está diretamente associada à competitividade, envolvendo margem líquida de retorno e a sobrevivência das operações. Se mantido o patamar de desempenho atual, possivelmente não será possível atingir a produção orçada, além de reduzir a vida útil das barragens de rejeito.

Para deslocar a média e reduzir a variabilidade da recuperação metálica, faz-se necessário, uma análise mais específica do indicador, visto as variadas ações implementadas historicamente, sem sucesso. Outra questão a destacar é a sinalização futura da redução do teor de ferro na alimentação das plantas produtivas informada pelo Planejamento de Mina, a maximização deste indicador se torna mais importante ainda para a manutenção e evolução do desempenho da Usina.

A escolha do setor de mineração para a aplicação da metodologia Seis Sigma se deu pela oportunidade, já que a pesquisadora é parte integrante do time da empresa. Além disso, trata-se de um setor e empresa propícios para a aplicação da metodologia, tanto pela gama de oportunidades de melhoria, quanto pela disponibilidade de insumos para análise/tratamento de dados e suporte da aplicação das ações propostas. O presente trabalho é de grande relevância para a área de Engenharia de Produção, já que utiliza-se de métodos aplicados e repassados durante a graduação, sendo destrinchados desde métodos estatísticos à ferramentas de Qualidade.

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

O referencial teórico da presente pesquisa foi baseado nos conceitos fundamentais relacionados à metodologia Seis Sigma, com a finalidade de analisar o método, desdobrar sua estratégia e conhecer o DMAIC e suas ferramentas. Essa descrição torna-se importante para se promover uma revisão de conceitos, aprimorando a execução do projeto.

2.1 Metodologia Seis Sigma - Contextualização; aplicações e vantagens

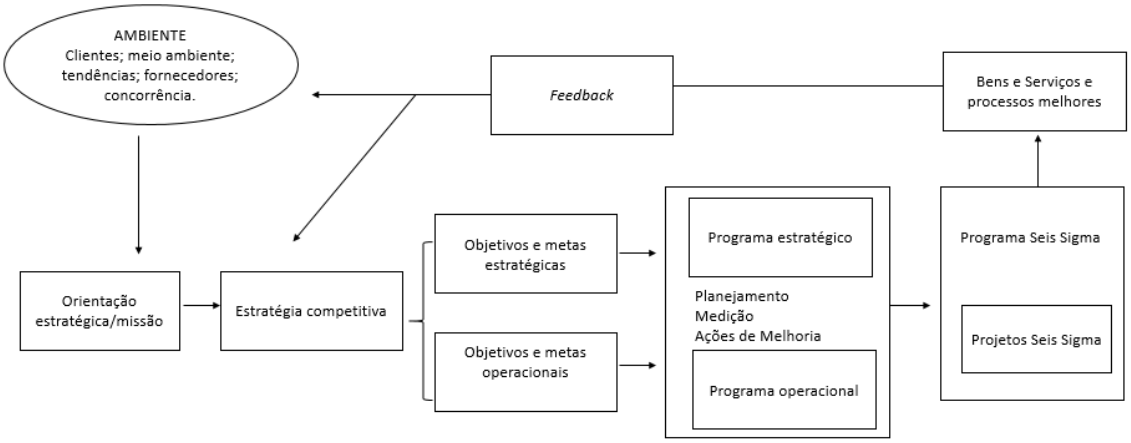
Em meados dos anos 80, a metodologia Seis Sigma foi difundida pela Motorola com o propósito de ser uma metodologia voltada para o controle da qualidade total, com a abordagem em eliminação de erros, satisfação de clientes e falhas no processo produtivo. Porém, o conceito em relação a esta metodologia evoluiu e se tornou mais abrangente, principalmente relacionada a ações gerenciais e estratégicas da sua implantação (SANTOS; MARTINS, 2009).

O pensamento estatístico e os seus métodos passaram a ser valorizados como meios essenciais para se atingir os objetivos de algumas organizações, preconizando o alinhamento estratégico como catalizador. Isso ocorreu pela crescente necessidade das empresas em buscar diminuição dos custos de produção, a eliminação de desperdícios e a redução de variabilidade nos processos críticos para o negócio (SANTOS; MARTINS, 2008).

Utilizando-se uma abordagem estatística e estratégica, o Seis Sigma deve ser implantado somente se houver um plano de ações para melhoria da qualidade desenvolvido e orientado aos objetivos da empresa. Ressalta-se a importância de se capacitar uma equipe de especialistas, a fim de se obter sucesso na implantação da metodologia (SANTOS; MARTINS, 2009).

A Figura 1 abaixo, demonstra como o programa está inserido no contexto da gestão da qualidade e da gestão estratégica na organização, que contempla um conjunto de atividades como de planejamento, medição e priorização de ações de melhoria. Trata-se de um processo dinâmico e que ocorre por meio de ação do ambiente e seus agentes, sob a orientação estratégica e missão da organização, culminado assim em uma estratégia competitiva com definição de objetivos e metas (SANTOS; MARTINS, 2009).

Figura 1- Seis Sigma como programa estratégico e operacional



Fonte: Adaptado de Santos e Martins (2009)

Em síntese, o Seis Sigma é uma metodologia sistemática, voltada para negócios, que gera um aumento significativo de rentabilidade via ganhos dos produtos, garantia de qualidade, satisfação do cliente e produtividade. Tem como objetivo principal conquistar zero erros na performance da empresa, obtendo um nível mínimo de falhas na produção (TÁVORA, 2009).

São benefícios dessa metodologia que a tornam atrativas: aumento da eficiência dos processos de produção com a redução dos custos associados com inspeção, retrabalho, insatisfação dos clientes e desperdício; foco em processos; melhoria contínua; foco no cliente; mudança de cultura; redução da variação e comprometimento (SANTOS; MARTINS, 2008).

Os reflexos positivos da implantação do Seis Sigma também têm sido discutidos na literatura com aplicações em variados segmentos como o de serviços hospitalares, instituições financeiras, serviços de transporte de carga e passageiros, dentre outros (SANTOS; MARTINS, 2009).

2.2 Estratégias de Negócio e o Seis Sigma

A contribuição da manufatura para a organização é atingida via desdobramento de decisões estratégicas em áreas operacionais a fim de alinhar os recursos da empresa com a estratégia competitiva (CARPINETTI, 2000). Os projetos Seis Sigma, por meio de sua abordagem estratégica da metodologia, podem ser considerados um pilar para esse desdobramento (MARTINS; SANTOS, 2008).

Os pontos relevantes ao desdobramento estratégico e à priorização dos projetos de melhorias para uma Organização estão associados à priorização das dimensões competitivas do negócio, fundamentada nas expectativas dos clientes e no posicionamento da empresa no mercado; a seleção dos processos, considerando o impacto nos indicadores estratégicos; e, por fim, os projetos de melhoria selecionados, que devem contribuir para melhorar o desempenho dos processos críticos e a estratégia de negócio (CARPINETTI, 2000).

A crescente competição global que o setor industrial enfrenta está associada as mudanças tecnológicas e às novas variedades de produtos. Esta condição gera um novo cenário, com uma maior competitividade entre as indústrias, que estão focadas em implementar novas tecnologias e práticas de gerenciamento mais eficazes (CARPINETTI, 2000).

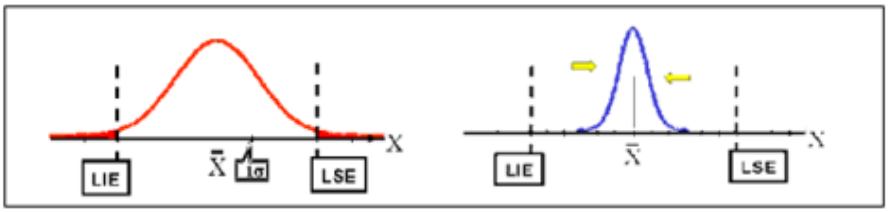
O início das atividades da mineração se deu com a lavra dos depósitos, utilizando-se materiais de alto teor, sem a necessidade de sofisticação no beneficiamento. Contudo, com a escassez desses depósitos, exauridos com o tempo, as dificuldades aumentaram, exigindo-se uma elevação do nível de conhecimento nesse contexto (ROVETA, 2013).

Diante desse contexto de tecnologias e práticas, tem-se, por exemplo, o beneficiamento do minério, onde o objetivo principal é separar o material valioso, contido no mineral, daquilo que não tem utilidade: as impurezas. Além de “limpar" o minério, o processo de beneficiamento o deixa com um tamanho (granulometria) que é o especificado pelo mercado (ANDRADE; CARVALHO, 2007).

2.3 Nível Sigma e o Método DMAIC

O Seis Sigma consiste em melhoria dos processos, reduzindo a variabilidade até um nível de 3,4 ppm – partes por milhão (6 desvios padrão) da média até a especificação superior ou inferior (SCATOLIN, 2005). A Figura 2 apresenta a demonstração ilustrativa dessa redução de variabilidade:

Figura 2 - Processos: Original e com Variação Reduzida



Fonte: Scatolin (2015)

Sigma, letra grega σ, é utilizada para medir a variabilidade de um processo, mediante o cálculo do desvio padrão, feito conforme a seguinte equação (1):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=j}^{n}(Xi - \bar{X})^2}{n-1}}$$

Onde,

Xi= resultado individual do processo;

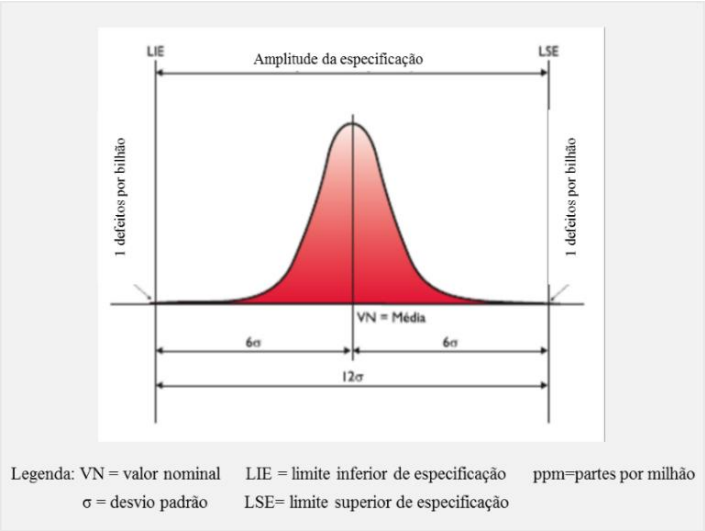
$\bar{X}$ = média dos resultados do processo;

n = número de resultados avaliados.

Werkema (2012) afirma que para ter significado, a análise do desvio padrão de um processo deve ser comparada com alguma referência e, que, quando comparado com os limites de especificações, surge à escala Sigma, que mede a qualidade do processo.

Ainda segundo Werkema (2012), um processo centralizado, onde o valor nominal é igual à média dos dados, com nível de desempenho Seis Sigma, ocorre quando a distância entre a média e o limite inferior/superior de especificação é igual a 6 σ. Afirma-se que, nessa condição, o número de defeitos por bilhão é igual a dois. Abaixo, na Figura 3, pode-se verificar tal comportamento:

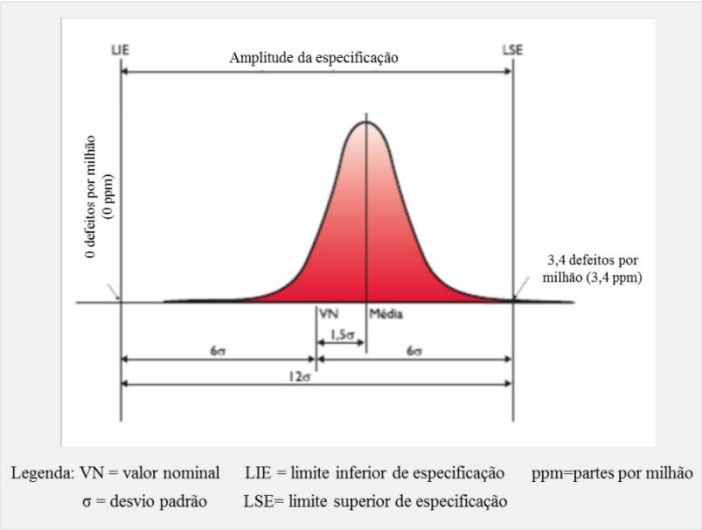
Figura 3 - Significado da qualidade Seis Sigma – Curto prazo



Fonte: Adaptado de Werkerma (2012)

Porém, conforme Rotondaro et. al. (2002) é complexo manter um processo centralizado em longo prazo. Dessa forma, admite-se que o nível Seis Sigma em longo prazo se desloca até 4,5 desvios padrões entre a média e o limite inferior/superior de especificação, o que pode ser visualizado na Figura 4. Nessa situação, o número de defeitos em Partes Por Milhão (PPM) passa a ser 3,4.

Figura 4 - Significado da qualidade Seis Sigma – Longo prazo



Fonte: Adaptado de Werkerma (2012)

Segundo Rotondaro et. al. (2002), o nível sigma mede a capacidade do processo em atuar sem falhas, de forma que quanto menor o nível sigma maior a quantidade de defeitos por milhões. Tal relação pode ser analisada na Tabela 1:

Tabela 1- Escala Sigma (longo prazo) x Defeitos por milhão x Nível de Qualidade

ESCALA SIGMA	DEFEITOS POR MILHÃO (PPM)	NÍVEL DE QUALIDADE (%)
UM SIGMA	691462	30,90
DOIS SIGMAS	308537	69,10
TRÊS SIGMAS	66807	93,30
QUATRO SIGMAS	6210	99,38
CINCO SIGMAS	233	99,977
SEIS SIGMAS	3,4	99,99966

Fonte: Adaptado de Werkema (2012)

O modelo estatístico pode ser considerado como uma forte estratégia de negócios que aplica uma abordagem disciplinada para capturar variabilidade dos processos, usando a aplicação de ferramentas e técnicas estatísticas e não estatísticas de forma exigente (ROTONDARO *et. al.* 2002)

Conhecer os passos para implementação da ferramenta é essencial à execução do projeto, assegurando resultados mais assertivos. Uma das principais metodologias utilizadas para implementação do Seis Sigma é o DMAIC, que é utilizada para um processo já existente. Há 5 passos importantes incluídos nesse método, são eles: *Define* - Definir, *Measure* - Medir, *Analyze* - Analisar, *Improve* - Melhorar e *Control* - Controlar. ” (SCATOLIN, 2005).

Os autores Pizdek e Keller (2011) e Werkema (2013) explicam de forma detalhada as etapas do DMAIC e, por isso, são as principais referências bibliográficas utilizadas em todo o projeto para suporte. Definem que os principais objetivos da Fase Definir é desenvolver o termo de abertura do projeto, contemplando: definição do escopo, os objetivos, o cronograma; o processo e os seus stakeholders, os membros da equipe e a assinatura do patrocinador (*Sponsor*). Além disso, é nessa etapa que se deve reunir e treinar a equipe.

Os objetivos da Etapa Medir incluem a definição do processo para garantir que este esteja claramente definido; definir os indicadores, para garantir meios confiáveis de medir o processo, relativo às entregas do projeto; estabelecer a linha de base do processo, para quantificar os resultados operacionais atuais como forma de verificar as

necessidades definidas e para suportar os resultados de melhoria; avaliar o sistema de medição, para validar a confiabilidade dos dados para o esboço de conclusões significativas (PYZDEK; KELLER, 2011).

A etapa de Análise inclui analisar o fluxo de valor para identificar maneiras de eliminar a lacuna entre o desempenho atual e o desejado; analisar as fontes de variação que contribuem para essa lacuna; determinar as correlações entre requisitos do cliente e itens de influência no processo e, usar as técnicas de *benchmarking* para avaliar os melhores produtos e serviços semelhantes (PYZDEK; KELLER, 2011).

Na Etapa Melhorar, o objetivo principal é a implantação do novo sistema. Deve-se priorizar as várias oportunidades, caso exista mais do que uma proposta e, uma vez que a abordagem escolhida tenha sido determinada, o novo design do processo ou produto é definido e os ajustes estabelecidos. É sugerido a avaliação dos riscos e potencias modos de falha (PYZDEK; KELLER, 2011).

E, por fim, na Fase Controlar, os objetivos principais são: validar estatisticamente se o novo processo atende aos objetivos e benefícios buscados ao longo do projeto; desenvolver e implantar um plano de controle para institucionalizar o novo processo e; documentar as lições aprendidas e as descobertas do projeto (PYZDEK; KELLER, 2011).

O DMAIC é um método ordenado de solução de problemas onde as etapas são constituídas por variadas atividades e ferramentas, que possibilitam resultados confiáveis e um controle da qualidade dos processos (WERKEMA, 2013). O Quadro 1 contempla atividades e possíveis ferramentas a ser utilizadas:

Quadro 1 - Atividades e Ferramentas do DMAIC

Fase	Atividades	Possíveis Ferramentas
Definir	Definir com precisão o escopo do projeto;	Mapa de raciocínio; Termo de Abertura; Gráfico Sequencial; Carta de Controle; Métricas do Seis Sigma; SIPOC.
Medir	Determinar a localização ou foco do problema;	Avaliação sistema de medição; Estratificação; Carta de controle; Histograma; Boxplot; Folha de Verificação; Índice de Capacidade.

Analisar	Determinar as causas fundamentais do problema prioritário associado a cada uma das metas definidas na etapa anterior;	Fluxograma; Mapa de Processo; Mapa de Produto; Brainstorming; Diagrama de causa-efeito; Teste de hipóteses; Matriz de Priorização; Diagrama de causa-efeito;
Melhorar	Propor, avaliar e implementar soluções para cada problema prioritário;	Brainstorming; Diagrama de Causa e Efeito; Matriz de Priorização; Plano de ação: 5W1H.
Controlar	Garantir que o alcance da meta seja mantido em longo prazo.	Métricas Seis Sigma; Gráfico sequencial; Gráfico de Pareto; Carta de Controle; Avaliação sistema de medição; OCAP;

Fonte: Adaptado de Werkema (2013)

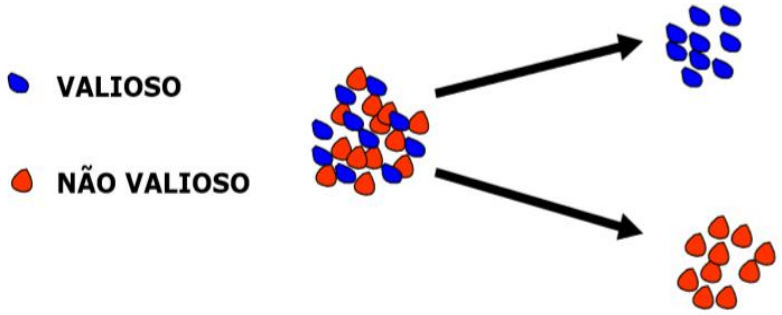
2.4 O Minério de Ferro e a Recuperação Metalúrgica

O termo minério de ferro possui uma abrangente lista de significados, o que dificulta o entendimento da finalidade do seu uso, já que sua terminologia pode ser encontrada denominando variados materiais. Em relação à fins comerciais e políticos, são considerados minério de ferro os minerais que estão sendo ou poderão vir a ser explorados em função de seu teor de ferro contido (SALES, 2012).

O Brasil é o quinto país no *ranking* em relação às reservas mundiais lavráveis, suas reservas estão localizadas, em sua quase totalidade, nos estados de Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul, sendo Minas Gerais e Pará os principais estados produtores. O minério de ferro brasileiro possui vantagens em relação ao minério de outros países, pelo fato de possuir altos teores de ferro e baixos teores de elementos contaminantes (sílica, alumina, fósforo, entre outros), o que facilita os processos siderúrgicos (SALES, 2012).

Ainda conforme Sales (2012), nota-se que a cada vez mais as empresas de mineração estão focadas em estudar alternativas para a redução do volume de rejeitos descartados para as barragens. A maneira mais visada atualmente é a recuperação metalúrgica, que é a recuperação dos minerais-minério que naturalmente seguem para o rejeito, integrando como parte do produto concentrado da planta. A recuperação metalúrgica, além de aumentar a recuperação mássica, impulsiona ganhos de ordem ambiental.

Figura 5 - Ilustração do Conceito de Recuperação Metalúrgica



Fonte: Adaptado de Andrade e Carvalho (2007)

> A recuperação metalúrgica de um processo de concentração é um parâmetro de extrema importância. Deve-se sempre procurar maximizá-lo, objetivando-se aumentar a produção de carga metálica por unidade de minério alimentado, tal que seja traduzida em maior margem de lucro. Contudo, isso deve ser feito com o devido planejamento para que não haja perda de qualidade do produto final (TURRER, 2004, p. 1).

Turrer (2004) também destaca que, com o aumento da recuperação metalúrgica consequentemente haverá diminuição do volume de material descartado como rejeito. O autor ressalta que a produção de rejeito interfere na vida útil das bacias e que, esta redução pode ser significativa a longo prazo.

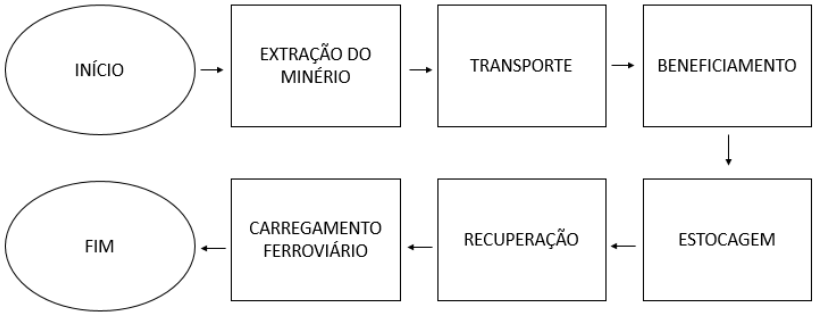
3. METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1 Caracterização do Objeto de Estudo

O objeto de estudo da pesquisa é uma mineradora, fundada em 1942, em Itabira, Minas Gerais, pelo Governo Federal. Em 1997 foi privatizada e, atualmente, possui plantas em 13 estados do Brasil e em mais de 30 países, empregando mais de 110 mil pessoas, entre próprios e terceiros.

Situada na linha de frente no ranking da produção mundial de minério de ferro, pelotas e níquel, a Mineradora estudada possui importantes operações nas áreas de Logística, Energia e Siderurgia. O principal negócio da empresa é o minério de ferro, o seu macroprocesso é identificado conforme demonstra a Figura 6:

Figura 6 – Macroprocesso Minério de Ferro



Fonte: Próprio autor (2019)

Para que produto final seja produzido e entregue dentro das especificações do cliente, de forma simplificada, deve-se ocorrer a extração do minério na mina; o transporte do produto até a Usina via caminhões fora de estrada; o transporte do minério via correias transportadoras até o pátio de estocagem; e, por fim, o carregamento do trem de carga para expedição do produto.

Durante este fluxo, o minério passa pelo processo de Beneficiamento, onde o produto é submetido a variadas etapas, com o objetivo de se conquistar as características recomendadas, como por exemplo, granulometria e teor de ferro; passando também pelo processo de recuperação. A pesquisa tem o foco no processo de recuperação do metal minério de ferro, sendo necessário o entendimento e o conhecimento destes processos, de modo a identificar os fatores de interferência na recuperação metalúrgica.

A recuperação metalúrgica é controlada e mensurada diariamente pela organização, dada a sua relevância. Os dados são disponibilizados por um sistema

interno, denominado *ProcessBook* PI, aplicativo que permite aos usuários criarem e visualizarem diagramas de fluxo de processo. Dessa forma, os profissionais podem verificar as variações e, a partir de então, pesquisar os motivos pelos quais teve-se alta ou baixa recuperação durante os dias. Estes profissionais conseguem ainda, fazer relações via dados disponibilizados por sistemas, como: o funcionamento das máquinas, o tipo de operação e as intercorrências com os recursos relacionados a atividade em dias específicos.

A pesquisa foi realizada no setor de Tratamento do Minério, que tem como objetivo adequar o produto às especificações do mercado, principalmente de acordo com a granulometria e concentração de mineral de interesse. Este setor é constituído por diversas operações, cuja principal função é melhorar a qualidade do produto final, aumentando o teor de ferro no produto e o diminuindo no rejeito.

3.2 Contextualização da Pesquisa

Os procedimentos da pesquisa são classificados quanto a sua natureza, objetivos, procedimentos técnicos e perspectiva de abordagem. A natureza da pesquisa pode ser classificada como básica ou aplicada (TURRIONE; MELLO, 2012). O presente trabalho tem natureza aplicada, pois busca utilizar conhecimentos teóricos da área de Qualidade, utilizando-se metodologia de melhoria contínua para elaborar ações que objetivam ganhos em processos e ganhos financeiros em uma mineradora, objeto de estudo, localizada na cidade de Itabira, Minas Gerais - MG.

Em relação aos objetivos, a pesquisa pode ser classificada como explicativa, descritiva, normativa ou exploratória (TURRIONE; MELLO, 2012). O objetivo mais adequado ao trabalho é o de pesquisa exploratória, já que é realizada uma análise da literatura para dar suporte em todas as etapas do projeto. Segundo Gil (2010), uma pesquisa exploratória objetiva a busca por uma familiaridade maior com o problema, para que assim, o mesmo se torne mais explícito.

O procedimento técnico ou método de pesquisa do projeto segue como uma experimentação, esta, segundo Prodanov e Freitas (2013), manipula variáveis relacionadas com o objetivo de estudo, com isso, é proporcionado o estudo entre as causas e efeitos de um fenômeno previamente determinado.

Em relação a abordagem, esta pode ser classificada como quantitativa, qualitativa ou combinada (SAMPIERI et al, 2006). Como a coleta e análise dos dados

foram realizadas com a utilização de *software* estatístico e análises dos processos, com observação participante (interferindo no desenvolvimento das atividades), a abordagem que mais se adéqua a este trabalho é o quantitativo.

3.3 Procedimentos Metodológicos

Para que os objetivos do trabalho fossem alcançados e, principalmente para se obter uma organização em relação à realização das atividades a pesquisa foi executada seguindo-se as seguintes etapas: coleta, análise e validação de dados.

3.3.1 Coleta e análise de dados

Através da identificação da natureza, abordagem, procedimentos técnicos e objetivos, definiu-se a estratégia de pesquisa como estudo de caso. O método "Estudo de Caso" é utilizado em estudos exploratórios, sendo bastante útil quando se quer analisar de forma mais aprofundada os fatos para obtenção de grandes conhecimentos sobre o objeto estudado (SANTOS, 2012). Este método preserva as características reais dos acontecimentos, como ciclo de vida, processos organizacionais e administrativos o que torna a pesquisa mais fiel a realidade (YIN, 2005).

Para a realização da coleta de dados da pesquisa, foi estabelecido como base histórica do projeto o comportamento da Recuperação Metalúrgica na área de Tratamento de minério no ano de 2017. Estes e outros dados pertinentes a pesquisa, como os indicadores secundários, tiveram os valores extraídos do *PI Process Book*, *software* de controle de variáveis oficial da empresa, o qual fornece dados históricos e online dos seus principais indicadores operacionais (exemplo de visão do *software* no APÊNDICE A).

As análises dos dados e a plotagem dos gráficos, são realizadas baseadas em análises estatísticas feitas com o auxílio do *software Minitab*® versão 2017, disponibilizados pela organização objeto de estudo. A metodologia utilizada para melhoria do processo é o Seis Sigma, para a realização do método, seguiu-se o método DMAIC como direcionador das atividades, conforme fluxo abaixo:

Figura 7 - Fluxo do método DMAIC

Fonte: Próprio autor (2019)

3.3.2 Validação dos Dados

Para a realização da validação dos dados, os líderes participaram das discussões relacionadas à resultados, com acesso ao andamento e finalização das etapas, a fim de se verificar de forma prematura possíveis desvios e intercorrências. Quando há incoerências e discrepâncias pontuadas, a correção é realizada tão logo identificadas, para que o prosseguimento das ações siga o curso normal de execução. Os líderes também validam o projeto na sua forma final, analisando não só os resultados, mas, também, as ações que foram implementadas.

4. DESENVOLVIMENTO

Neste tópico, serão descritas as atividades executadas em cada etapa da metodologia Seis Sigma, demonstrando as ferramentas aplicadas e os seus resultados.

4.1 Etapa D – Definir

Nesta etapa iniciante, utilizou-se dos seguintes tópicos a fim de se formalizar o projeto: desenvolvimento do termo de abertura com a definição do escopo, objetivos, cronograma, equipe envolvida e premissas. Além disso, realizou-se o detalhamento do indicador principal, a definição da meta do projeto e o cálculo dos ganhos financeiros.

4.1.1 Termo de Abertura do Projeto

O Termo de Abertura do projeto foi realizado com o objetivo de identificar as suas características, definir o escopo e limitações, além de documentar a abertura do projeto e seus compromissos. É imprescindível que este esteja com as definições claras e, além disso, validado entre a equipe. Abaixo, o documento elaborado:

Quadro 2 - Contrato do projeto

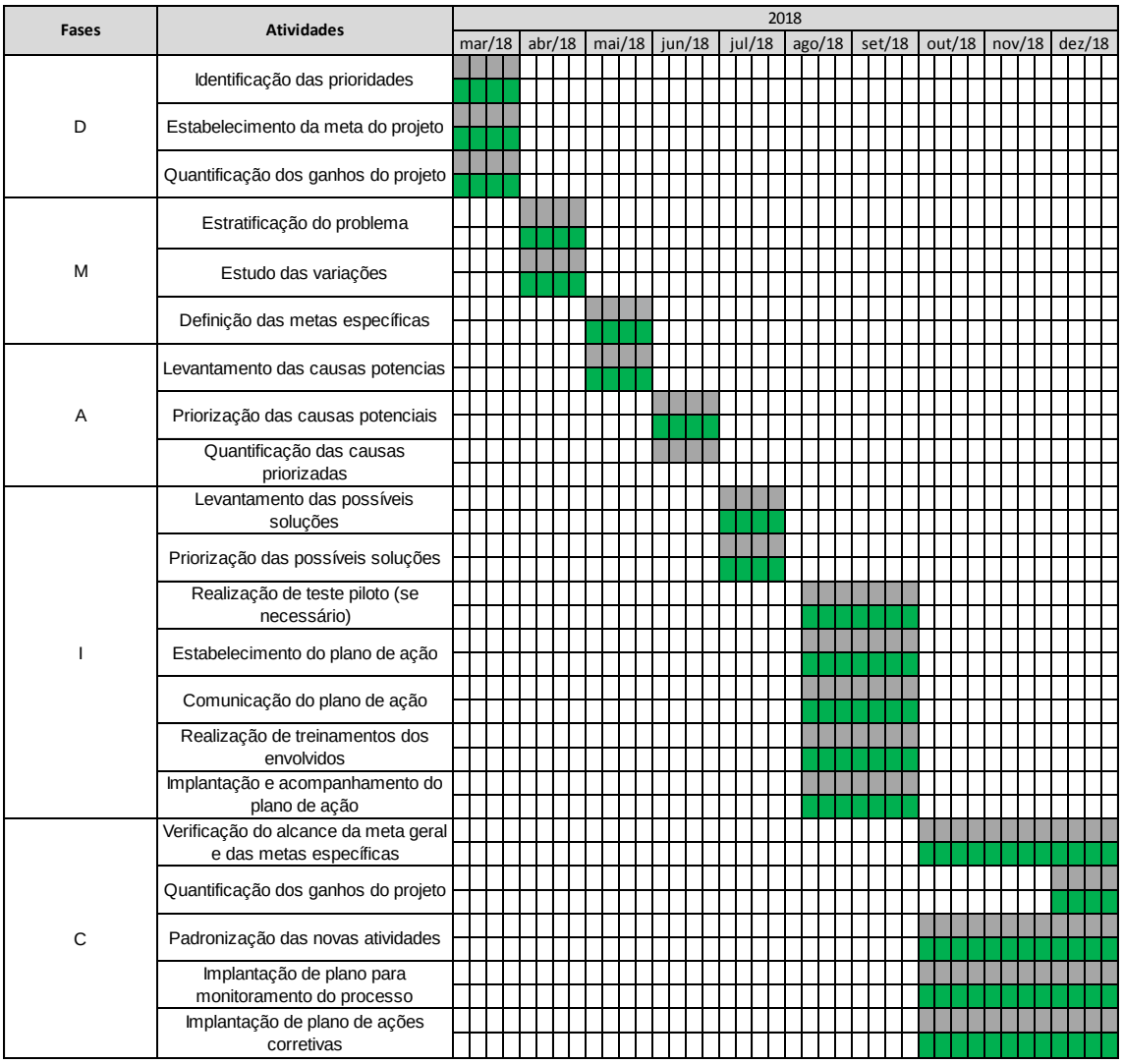
<table>
<tr><th>Projeto 6σ</th><th>Escopo do projeto – Contrato</th></tr>
<tr><td>Título do projeto: Aumento da Recuperação Metalúrgica de CE2</td><td>Data de início: Março/2018.</td></tr>
<tr><td>Líderes do projeto: RS / WJ</td><td rowspan="4">Business case: A Usina CE2 foi projetada para atingir uma recuperação metalúrgica de 80% e, desde sua estabilização em 2015, evolui, praticando em média 76,57%. Se mantido o patamar de desempenho atual, possivelmente não será possível atingir a produção orçada, além de reduzir a vida útil das barragens de rejeito.</td></tr>
<tr><td>Sponsor: LG</td></tr>
<tr><td>Orientador: FL</td></tr>
<tr><td>Equipe envolvida: AP; MC; RG; AG; LA; P J.</td></tr>
<tr><td>Problemas no processo:
Queda na recuperação metalúrgica da usina de CE2.</td><td>Desafios:
Identificar e priorizar as variáveis que mais influenciam na recuperação metalúrgica.</td></tr>
<tr><td>Premissas:
O percentual do Ferro no Alimentado será mantido em 41%; O percentual de Ferro no Concentrado será mantido em 68,43%;</td><td>Meta do projeto:
Aumentar a recuperação metalúrgica em 1,42% (de 77,93% para 79,35%) sem afetar a qualidade do produto final até dezembro 2018</td></tr>
<tr><td>Principais marcos do projeto: Aplicação das etapas do DMAIC.</td><td>Prazo de finalização do projeto: Dezembro/2018.</td></tr>
</table>

Fonte: Próprio autor (2019)

A partir da definição do tempo total do projeto (março a dezembro de 2018), elaborou-se o cronograma detalhado, contendo todas as etapas e seus respectivos prazos. Com essa definição, o orientador do projeto agenda as consultorias mensais e realiza a chamada RVT – Registro de Validação Técnica, a fim de identificar problemas e validar a evolução do projeto. Caso o andamento do trabalho esteja atrasado, o projeto é destacado com o farol vermelho no Portal de Melhoria Contínua (software voltado para marcos de consultoria), caso contrário, o projeto é destacado com o farol verde.

A classificação "farol" fica registrada no portal e disponível para os envolvidos, inclusive ao *Sponsor* – aquele que patrocina o projeto e tem o interesse maior em que se execute todas as etapas com sucesso. Abaixo, o Quadro 3 contendo o cronograma validado, onde a cor cinza representa o que foi planejado e, a cor verde, representa a execução real das atividades. Como se pode verificar, o projeto teve o andamento conforme o planejado, isso porque não houveram intercorrências maiores, que inviabilizassem a conformidade em relação aos prazos.

Quadro 3 - Cronograma do Projeto

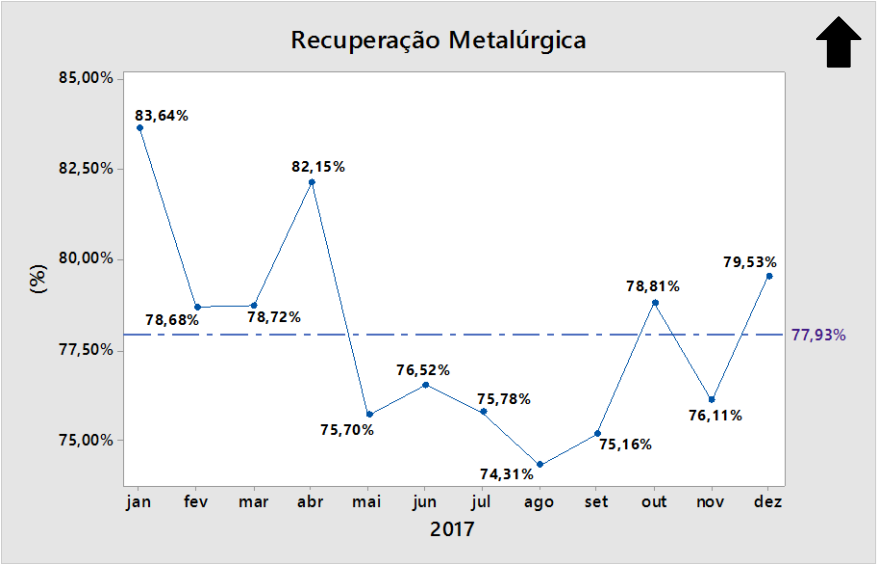


Fonte: Próprio autor (2019)

4.1.2 Detalhamento do indicador principal

Ainda na etapa “Definir” é necessário a apresentação do indicador principal em que se deseja alcançar melhorias. Logo, para melhor entender o indicador Recuperação Metalúrgica (%), foi realizado um levantamento dos dados históricos mensais de janeiro a dezembro de 2017 (*baseline*), elaborando um gráfico em série temporal para representação dos valores obtidos. Abaixo, o Gráfico 1:

Gráfico 1 - Análise Histórica do Indicador Recuperação Metalúrgica em 2017



Fonte: Próprio autor (2019)

Realizado ainda a análise descritiva, que apresenta dados importantes em relação ao indicador como a média, quartis, mínimo máximo e desvio padrão (Tabela 2).

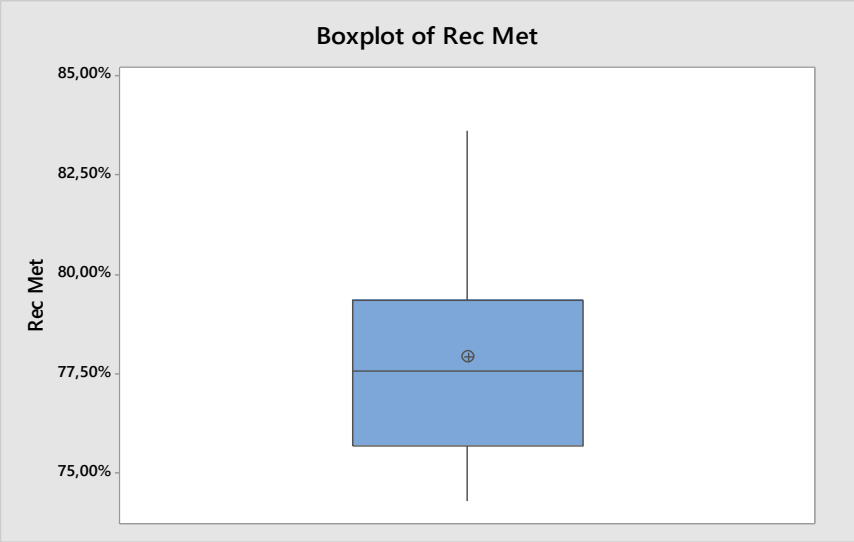
Tabela 2 - Estatística descritiva do indicador Recuperação Metalúrgica em 2017

N° de Dados	Média	Desvio Padrão	Mínimo	1° Quartil	Mediana	3° Quartil	Máximo
12	77,93	2,87	74,31	75,72	77,60	79,35	83,64

Fonte: Próprio autor (2019)

Após análise do gráfico e da análise descritiva, pode-se afirmar que o indicador apresenta alta variabilidade com range de 74 a 83%. A média está em 77,93% e a recuperação metalúrgica variou no intervalo de 74,31% a 83,64% entre janeiro a dezembro de 2017. Para estes dados, também foi calculado o *BoxPlot* apresentado abaixo:

Gráfico 2 – *Boxplot* do Indicador Recuperação Metalúrgica em 2017

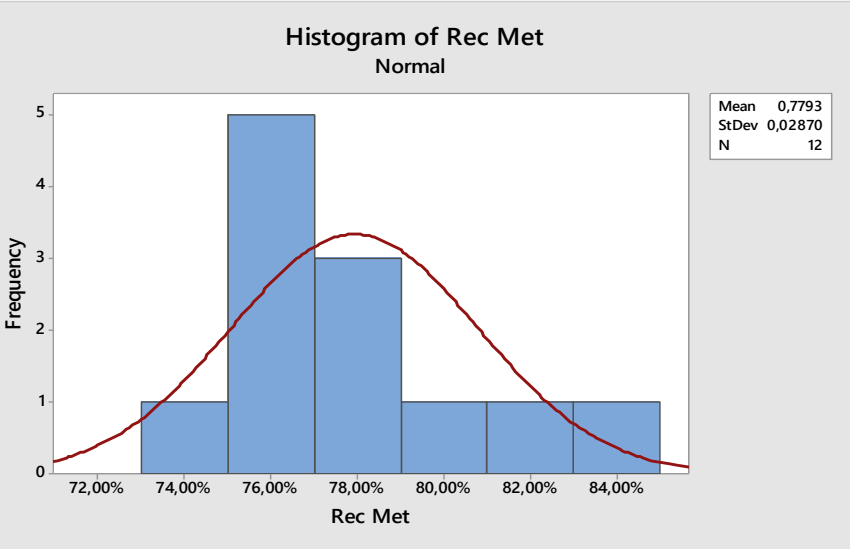


Fonte: Próprio autor (2019)

Verifica-se que 25% dos dados são menores ou iguais a 75,72%, 50% menores ou iguais a 77,60% e 75% dos dados menores ou iguais a 79,35%. Ainda, pode-se afirmar que 50% dos dados estão entre 75,72% e 79,35%. Pode-se verificar também que não há presença de *outliers* no *boxplot*.

E, por fim, elaborou-se o Histograma abaixo, a fim de se visualizar a forma da distribuição dos dados e identificar dispersão. Observa-se um pico de dados em cerca de 76% e a dispersão de dados a partir de cerca de 74% a 84%, com um leve deslocamento para direita. Além disso, afirma-se o valor do desvio padrão de 2,87.

Gráfico 3 - Histograma do Indicador Recuperação Metalúrgica



Fonte: Próprio autor (2019)

4.1.3 Definição da Meta

A fim de se elucidar o indicador recuperação metalúrgica, indicador principal, elaborou-se o Quadro 4, que contém a descrição do indicador do projeto, sua fórmula de cálculo e a meta proposta.

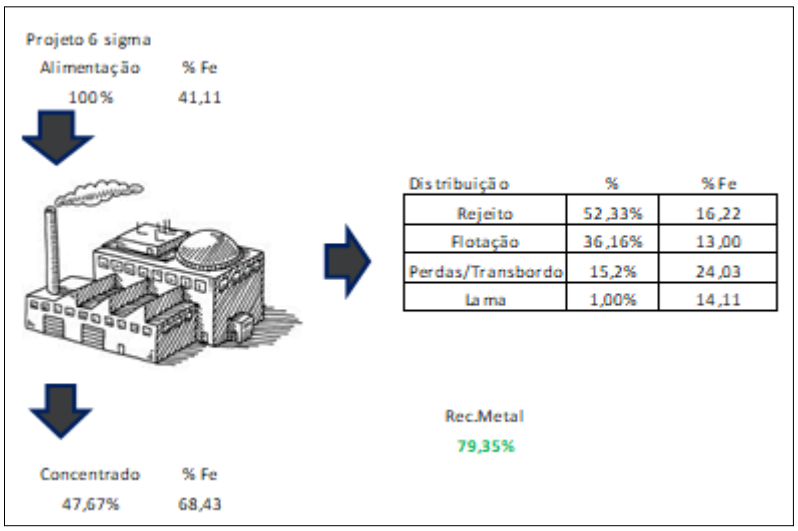
Quadro 4 - Detalhamento e meta do indicador principal

Descrição	Forma de cálculo	Meta
A recuperação metalúrgica representa o percentual do metal de interesse que é recuperado no produto. A queda na recuperação metalúrgica pode ser provocada por vários fatores (elevação dos teores de ferro no rejeito, queda na qualidade do concentrado ou perdas físicas das caixas).	Rec Metal = (C/A x c/a) x 100 Legenda: a: Teor % Ferro na alimentação. c: Teor % Ferro no concentrado. A: Massa de sólidos na alimentação. C: Massa de sólidos no concentrado.	Rec Metal = 79,35%

Fonte: Próprio autor (2019)

Para a definição da meta utilizou-se o simulador elaborado pelos engenheiros integrantes do projeto, onde foram inseridos os valores referentes ao percentual do Ferro no Alimentado (41,11%) e o percentual de Ferro no Concentrado (68,43%) estabelecidos nas premissas. Após a inserção desta base de dados no *Microsoft Excel®*, o simulador calcula o melhor valor de recuperação metalúrgica a ser executado para as premissas estabelecidas, demonstrado na Figura 8.

Figura 8 - Definição de meta pelo Simulador



Fonte: Próprio autor (2019)

Estabeleceu-se que, para a descrição do alcance da meta, será realizada a média do indicador durante três meses do período de verificação do projeto igual ou melhor

que a meta. Abaixo, a Tabela 3 apresenta o comparativo entre a média histórica e a meta, identificando o percentual de aumento esperado.

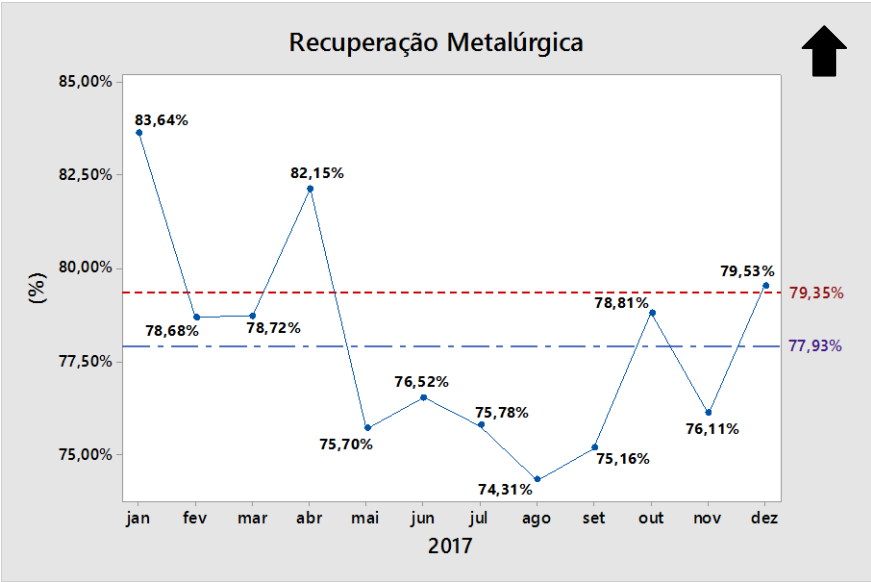
Tabela 3 – Análise Histórica do Indicador

Média Histórica	Orçamento 2018	Meta Simulador	% de aumento
77,93%	78,98%	79,35%	1,42%

Fonte: Próprio autor (2019)

Elaborou-se o gráfico em série temporal, Gráfico 4, com o intuito de verificação visual em relação a meta proposta e a média histórica, onde a meta do projeto está destacada em vermelho e a média obtida na *baseline* destacada na cor azul.

Gráfico 4 - Análise do Indicador Principal em relação a meta proposta



Fonte: Próprio autor (2019)

O indicador "Recuperação Metalúrgica (%)" é do tipo "Maior Melhor", verifica-se que a sua média na *baseline* manteve-se abaixo da meta proposta e, além disso, que em apenas três meses (janeiro, abril e dezembro), por motivos específicos, a meta foi superada. Ou seja, afirma-se que a meta proposta é factível, porém desafiadora.

4.1.4 Cálculos dos ganhos financeiros previstos do projeto

Para validação dos ganhos financeiros do projeto, a Gestão Econômica emitiu o seguinte parecer: " Entendemos que o projeto propõe uma redução da massa e do teor

de ferro no rejeito e, consequente aumento da massa produzida (mantendo o teor do produto) ”. Logo, foi ponderado:

- ✓ Atualização da margem unitária da Usina com base na primeira submissão do orçamento de 2018 para US$31,5/tonelada;
- ✓ Atualização do câmbio utilizado para o orçamento de 2018 para 3,35;
- ✓ Ganho estimado para 2018 revisado para R$ 5,857M após atualização das premissas (em verde);
- ✓ Sendo um minério de boa qualidade e com boa aceitação no mercado, os cálculos foram mantidos em ganho potencial em produção/vendas;

Tabela 4 – Memória de Cálculo dos Ganhos do Projeto

Variáveis	Realizado 2017	Orçado 2018	Projeto 6 Sigma	Ganho Estimado (t)
Massa Alimentada	24.813.459	25.290.656	25.290.656	
Massa do Concentrado	11.885.010	12.000.000	12.056.163	56.163
RM da Usina	47,90%	47,4%	47,67%	
Teor de Ferro da Alimentação	42,21	41,11	41,11	
Teor de Ferro do concentrado	68,63	68,43	68,43	
Recuperação Metalúrgica	77,87%	78,98%	79,35%	
Teor de Ferro no rejeito	17,93%	16,44%	16,22	

Fonte: Próprio autor (2019)

Em síntese, validado as seguintes métricas: aumento de 0,5% de recuperação em massa; o percentual de ferro no rejeito de 16,44% para 16,22% e ganho previsto de 56.163 toneladas de massa do concentrado.

4.2 Etapa M – Medir

A fim de se garantir o cumprimento dos objetivos da etapa Medir da metodologia Seis Sigma, foram executadas as seguintes atividades: análise da confiabilidade dos dados, determinação do nível sigma e controle do processo, estratificação do problema e definição dos focos de atuação e, por fim, a definição das metas específicas e a análise de variação dos focos.

4.2.1 Análise da confiabilidade dos dados

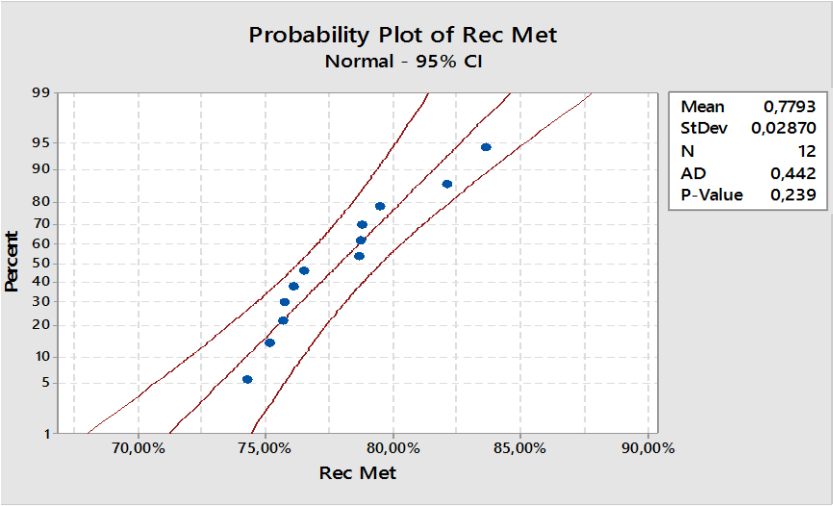
Em relação a confiabilidade dos dados utilizados no projeto para o esboço de conclusões significativas, afirma-se que estes são confiáveis, pois, trata-se de dados oriundos de amostras auditáveis. Os laboratórios da empresa atendem às normas

internacionais de qualidade, que seguem o método beta SPM, que considera o processo de amostragem, preparação e medição para o resultado analítico, cuja confiabilidade é de 95%. Após análise, estes dados são lançados em software de controle *on line* da planta produtiva.

4.2.2 Determinação do nível sigma e controle do processo

Para identificar o real comportamento do processo, os dados referentes ao período histórico foram inseridos no *software Minitab®* para o teste de normalidade (Gráfico 5), que demonstrou, com 95% de confiança, que os dados seguem uma distribuição normal, uma vez que se constatou um valor superior a 0,05 para o *P-Value* (0,239).

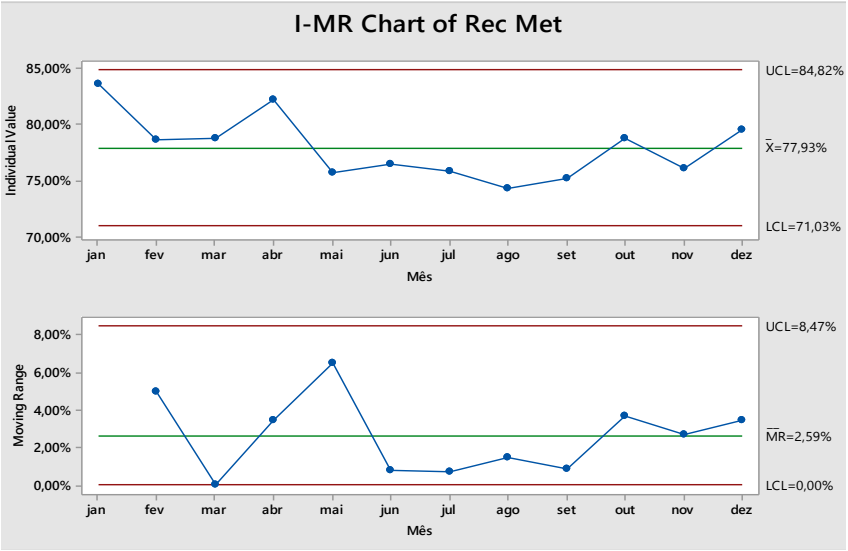
Gráfico 5 - Teste de Normalidade



Fonte: Próprio autor (2019)

Com isso, foi possível construir uma carta de controle X-AM (Gráfico 6), com intuito de verificar a estabilidade dos dados e possíveis presenças de causas especiais no processo.

Gráfico 6 - Análise de Variabilidade

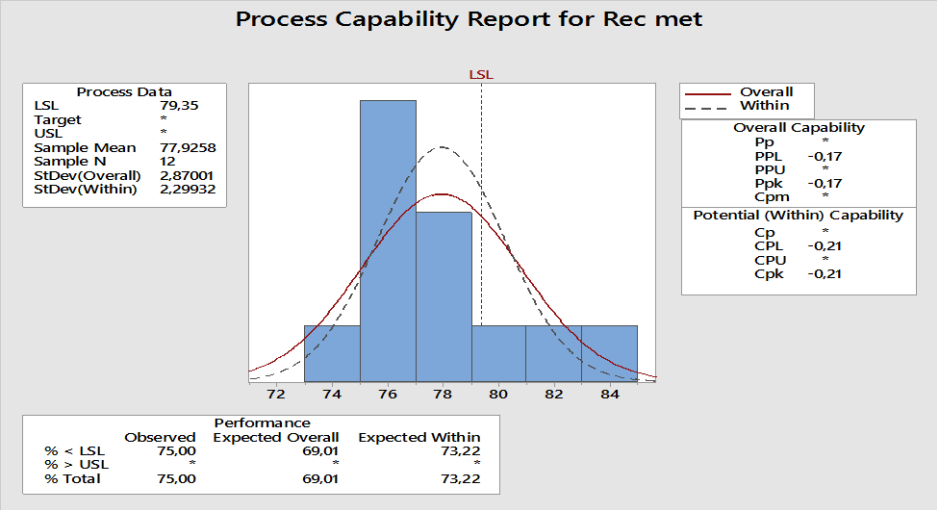


Fonte: Próprio autor (2019)

Através da análise de variabilidade acima, pode-se verificar que não há causas especiais, os dados encontram-se dentro dos limites, o que caracteriza um problema sistêmico.

Para a definição do nível sigma, foi realizada a análise do desempenho para a Recuperação Metalúrgica (Gráfico 7), em que foi verificado os dados referentes ao período histórico. Esta análise permitiu quantificar o atendimento as especificações, definida somente pela a meta do projeto como o limite inferior, visto que o indicador é do tipo quanto "maior, melhor".

Gráfico 7 - Análise de Desempenho Recuperação Metalúrgica



Fonte: Próprio autor (2019)

A partir dos resultados apresentados acima, tem-se que o percentual de dados abaixo da meta do projeto, é de: para os dados do período histórico, 75,00%; para o esperado, considerando a variabilidade natural (causas comuns), 73,22%; e considerando a variabilidade total (causas comuns e especiais), 69,01%. O valor de *Ppk*, índice que mede o desempenho do processo, é baixo, assim como o valor de *Cpk*, índice relacionado a capacidade, o que indica alto índice fora das especificações.

Posteriormente a verificação do valor de *Ppk*, calculou-se o nível Sigma do processo, conforme a Equação 2 abaixo, obtendo o valor de 0,99. Esse número significa que o processo possui 691.462 defeitos por 1 milhão e um nível de qualidade de 30,90%.

$$\boldsymbol{Equa}\text{ção } (\mathbf{2}): \mathit{Nível\ Sigma} = 3Ppk + 1{,}5$$

$$\mathit{Nível\ Sigma} = 3 * (-\,0{,}17) + 1{,}5$$

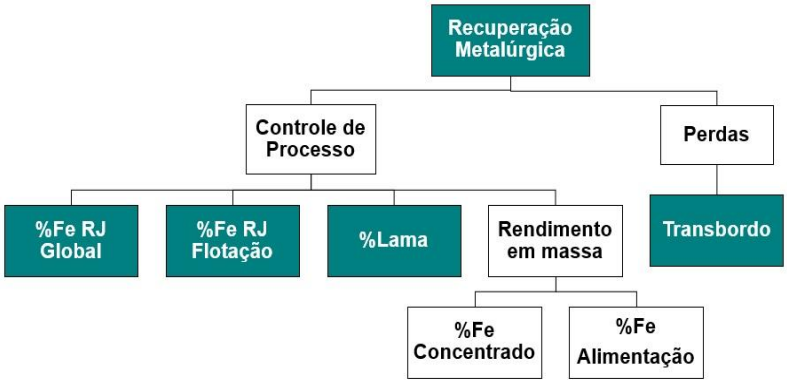
$$\mathit{Nível\ Sigma} = 0{,}99$$

4.2.3 Estratificação do Problema e definição de focos de atuação

Para realizar uma análise mais específica, foi necessário estratificar o indicador alvo do projeto “Recuperação Metalúrgica” em um primeiro nível de estratificação “Controle de Processo” e “Perdas Físicas”, que estão relacionadas as maiores perdas do processo e que impactam diretamente no indicador principal. Dessa forma, consegue-se identificar mais especificamente quais são os fatores que interferem no processo e que há a possibilidade de adequação através de fatores humanos.

A estratificação foi realizada em três níveis, três estratos. Os indicadores destacados em verde, foram analisados historicamente e fizeram parte das metas específicas do projeto. Os indicadores desdobrados de “Rendimento em Massa” são premissas do projeto e, por isso, se manterão com os valores especificados: para o % de Ferro no Concentrado 68,43% e para o % de Ferro no Alimentado 41,11% e não serão focos de atuação.

Figura 9 - Estratificação do problema

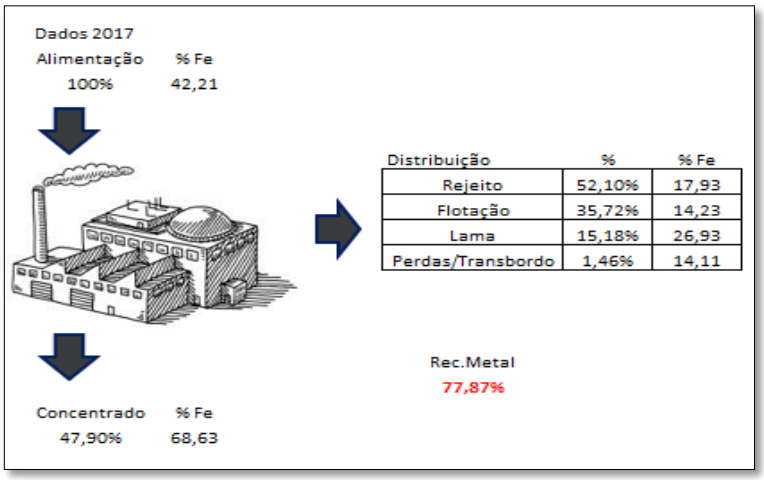


Fonte: Próprio autor (2019)

4.2.4 Definição de metas específicas

Simulou-se o resultado do indicador recuperação metalúrgica, utilizando-se teores de ferro do alimentado e concentrado praticados em 2017 para verificação dos valores obtidos e seus resultados, como mostra na Figura 10, abaixo:

Figura 10 - Simulador para dados de 2017



Fonte: Próprio autor (2019)

Verifica-se uma meta alcançada de 77,87% para o indicador principal "Recuperação Metalúrgica", confirmando a necessidade de se adequar os percentuais dos indicadores secundários para o alcance da meta proposta.

As metas específicas foram estipuladas também a partir do simulador (conforme visto na Figura 8, subtópico "Definição da Meta"). Diante do exposto através do simulador, obtendo-se a meta proposta de 79,35% de recuperação metalúrgica, e

considerando-se a média histórica em 2017, deve-se praticar as seguintes metas específicas:

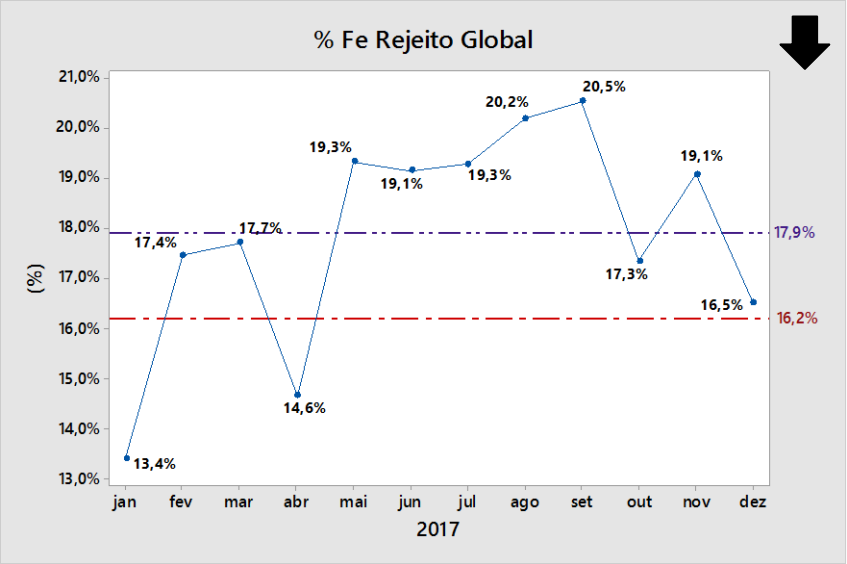
- ✓ Reduzir o % Fe no Rejeito Global de 17,90% para 16,22% até dezembro de 2018;
- ✓ Reduzir o % Fe de Rejeito na Flotação de 14,10% para 13,00% até dezembro de 2018;
- ✓ Reduzir Perdas Físicas (Horas de Transbordo) de 36,7 horas para 24,03 horas até dezembro de 2018;
- ✓ Reduzir o % Lama de 16,31% para 14,11% até dezembro de 2018;

Através do simulador, pode-se afirmar que as quatro metas específicas sustentam a meta geral.

4.2.5 Análise da Variação dos Focos

Abaixo a análise da variação dos focos a fim de se verificar o comportamento dos dados ao longo do ano de 2017 (*baseline*) e a meta proposta, onde a meta está na cor vermelha e a média histórica na cor roxa. O primeiro foco analisado é o indicador % de ferro no rejeito global, indicador do tipo quanto "menor, melhor".

Gráfico 8 - Análise Histórica % de Ferro no Rejeito Global



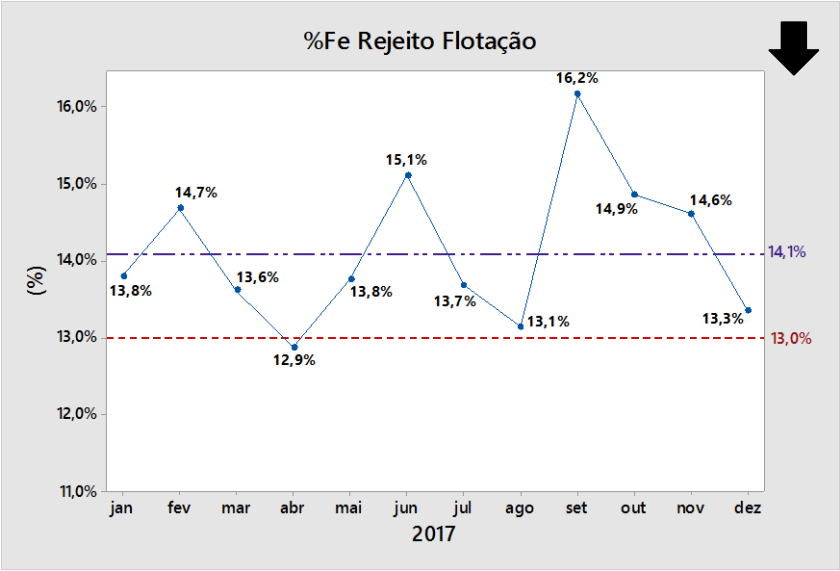
Fonte: Próprio autor (2019)

Para o indicador % Fe no Rejeito Global: os dados variam de 13,39% a 20,52%, a média calculada é 17,90% e a meta proposta é 16,22%, verifica-se que a meta é

desafiadora, porém factível, já que em dois meses (janeiro e abril/2017) foi possível superá-la.

O segundo foco analisado no Gráfico 9, trata-se do indicador % Ferro no Rejeito da Flotação, indicador do tipo quanto “menor, melhor”.

Gráfico 9 - Análise Histórica % de Ferro no Rejeito Flotação

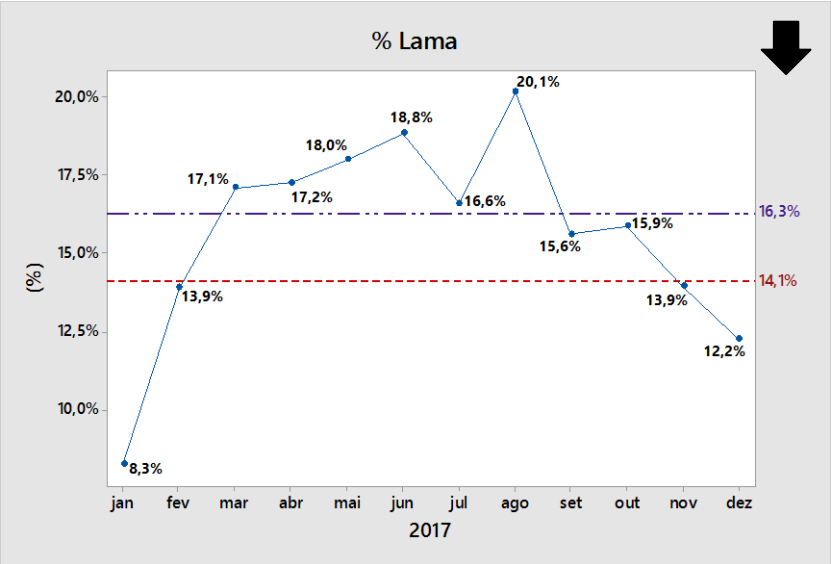


Fonte: Próprio autor (2019)

Para o indicador % Ferro Rejeito da Flotação: os dados variam de 12,85 % a 16,17%, a média calculada é 14,10% e a meta 13,00%, verifica-se que a meta é desafiadora, porém factível, já que em um mês (abril/2017) foi possível superá-la e em outros meses os valores obtidos estiveram próximos à meta proposta.

O terceiro foco analisado é o indicador % Lama, indicador do tipo quanto “menor, melhor”. Segue visualização no Gráfico 10:

Gráfico 10 - Análise Histórica % Lama

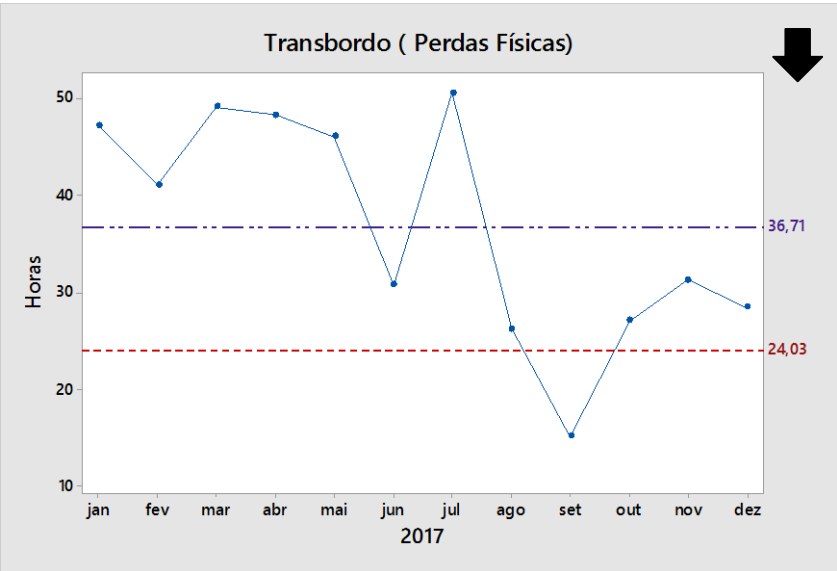


Fonte: Próprio autor (2019)

Para o indicador % Lama, os dados variam de 8,26% a 20,147%, a média calculada é 16,30% e a meta proposta de 14,10%, verifica-se que a meta é desafiadora, porém factível, já que em quatro meses (janeiro, fevereiro, novembro e dezembro/2017) foi possível superá-la.

O último foco analisado é o indicador Perdas Físicas (h), indicador do tipo quanto "menor, melhor".

Gráfico 11 - Análise Histórica Perdas Físicas



Fonte: Próprio autor (2019)

Para o indicador Perdas Físicas (h) os dados variam de 15,1 horas a 50,5 horas, apresentando alta variabilidade, a média calculada é 36,71 horas e a meta 24,03 horas, verifica-se que a meta é desafiadora, pois em apenas um mês (setembro/2017) foi possível superá-la.

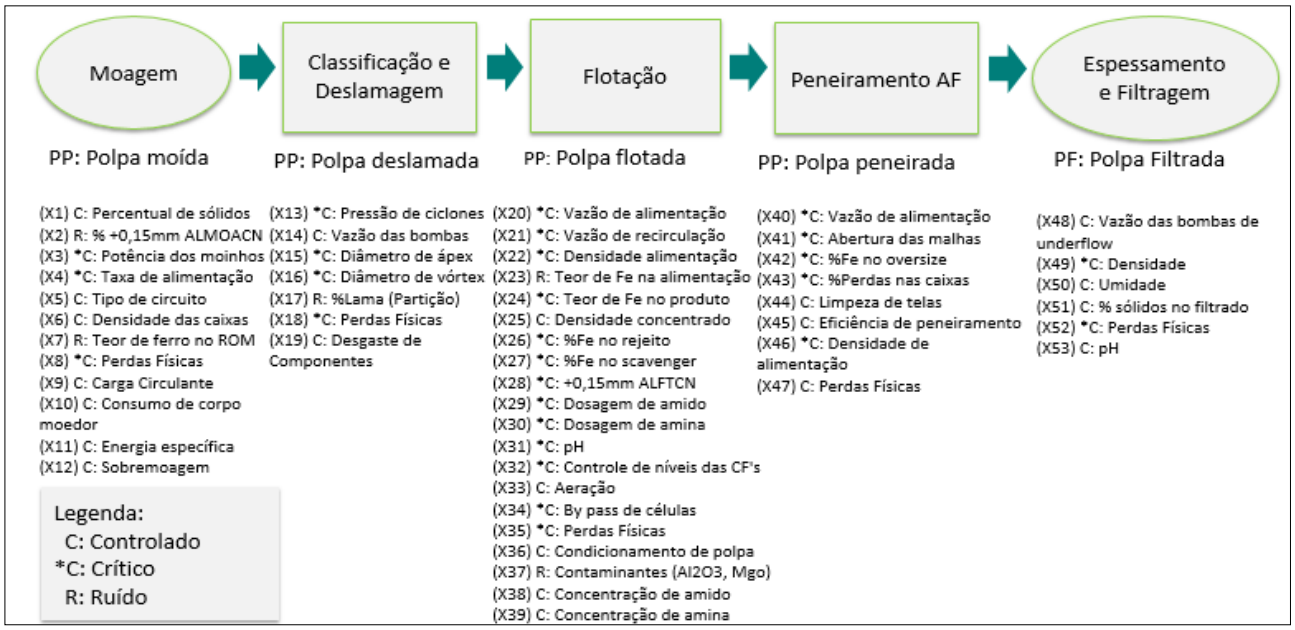
4.3 Etapa A – Analisar

Para analisar as fontes de variação que contribuem para o espaçamento entre desempenho atual e ideal e, identificar itens de influência no processo, nessa etapa foram realizadas a análise do processo (mapeamento); a construção do Diagrama de *Ishikawa* para identificação de possíveis causas relacionados a cada foco estabelecido; elaboração da matriz de priorização; e por fim, quantificação/comprovação das causas priorizadas.

4.3.1 Levantamento e priorização das causas

A fim de se analisar o processo, estabeleceu-se o seu fluxo identificando as variáveis que influenciam na recuperação metalúrgica desde a moagem até o peneiramento de alta frequência (identificando os X's do processo). Para a sua execução, realizou-se um brainstorming com a participação da equipe do projeto, especialistas técnicos e envolvidos no processo da Usina. Leia-se no mapeamento da Figura 11: C (variáveis controladas), *C (variáveis críticas) e R (variáveis ruído, onde a equipe não possui autonomia para atuar), conforme demonstrado na figura abaixo:

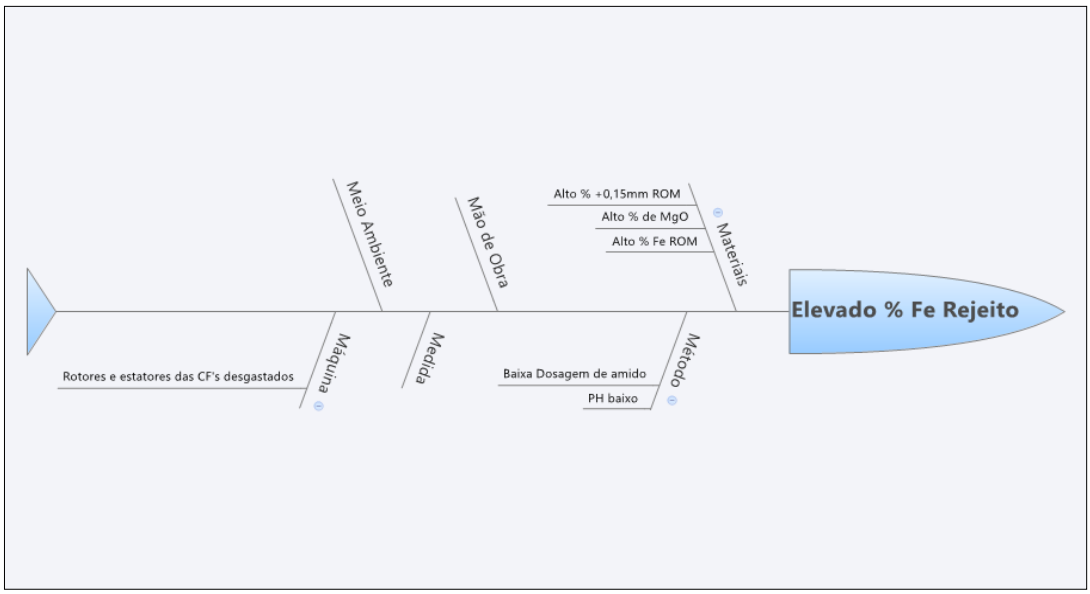
Figura 11 - Mapeamento de Processo



Fonte: Próprio autor (2019)

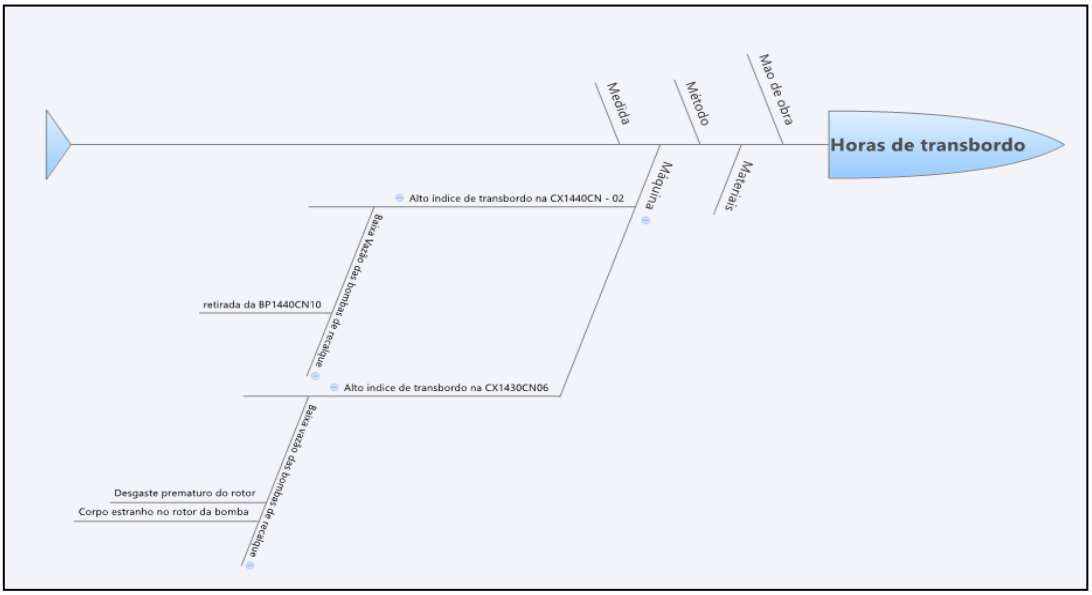
Além disso, foi realizado para cada indicador foco o Diagrama de *Ishikawa*, relacionando-se possíveis causas a cada “M”- Máquina, Método, Meio Ambiente, Mão-de-obra, Material e Medida. Nas Figuras de 12 a 15, os diagramas elaborados:

Figura 12 - Ishikawa para o Foco (Elevado % Ferro no Rejeito)



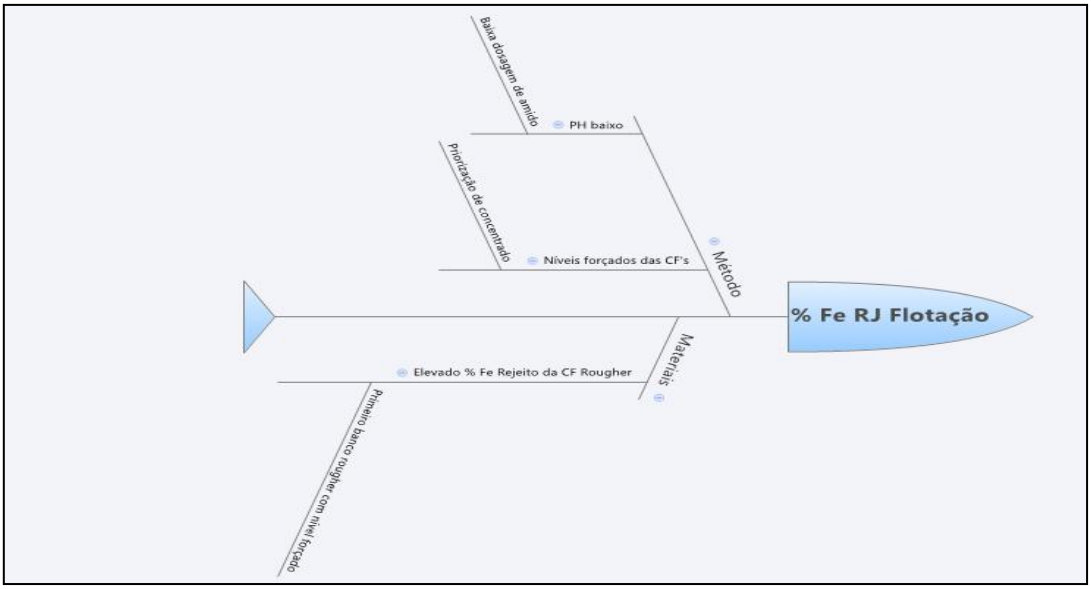
Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 13 - Ishikawa para o Foco (Horas de Transbordo)



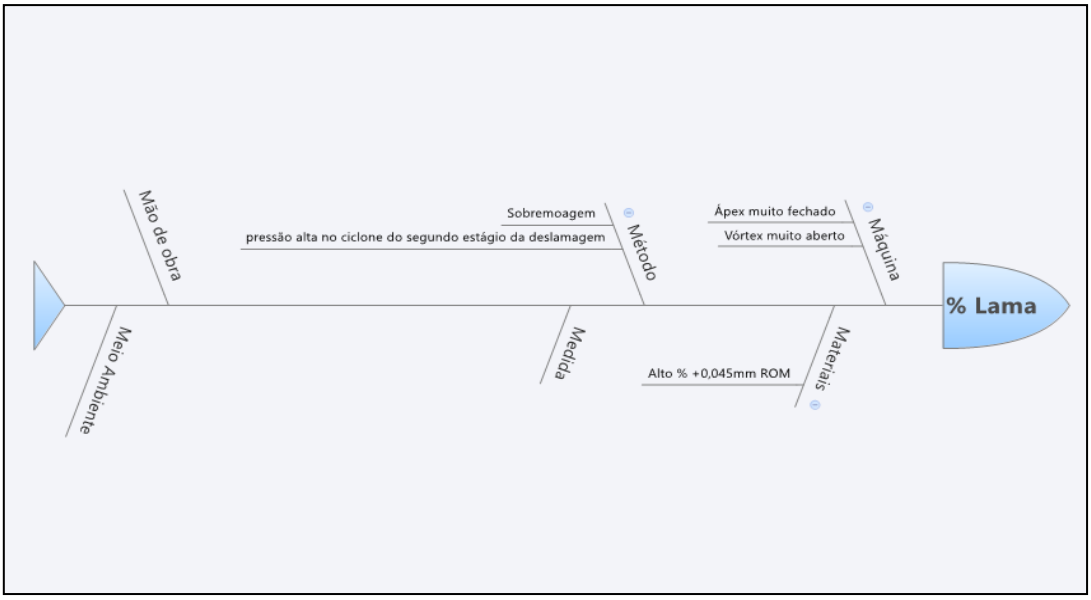
Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 14 - Ishikawa para o Foco (% de Ferro no rejeito da flotação)



Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 15 - Ishikawa para o Foco (% Lama)



Fonte: Próprio autor (2019)

Através da identificação das possíveis causas por meio do mapeamento de processo e *Ishikawa*, foram levantados 101 parâmetros críticos. A fim de iniciar uma investigação mais crítica das 101 causas identificadas, elaborou-se a matriz de priorização, onde as causas foram classificadas como complexas/prioritárias/ver e agir/descarte, tal classificação foi realizada pela equipe técnica através de pontuação (0 - Não há correlação; 3: Baixa Correlação;7: Forte Correlação).

A matriz de priorização com o filtro das causas classificadas como prioritárias pode ser visualizada no APÊNDICE B. No total foram priorizadas 51 causas, classificadas desta forma por possuírem um alto impacto nos *KPI's* e um baixo esforço de eliminação da variável de entrada.

4.3.2 Comprovação das causas

A quantificação/evidenciação das causas foi estruturada por meio da matriz (Tabela 5), onde definiu-se os métodos de evidenciação das 51 causas, que foram: Amostragem, *DOE*, Análise Gráfica de Correlação, Registro Fotográfico, Análise de *PI* e *BoxPlot*. Abaixo, a Tabela 5 contendo apenas as causas a serem tratadas conforme a evidenciação de alguma correlação.

Tabela 5 - Matriz Comprovação de Causas

X's	Fator Causal	Origem das Causas Mapa Geral de Processo / Ishikawa	%Fe RJ Flotação	%Fe RJ Global	% Lama	Perdas Físicas	Causas	Ferramenta de Evidenciação	OK X NOK	Causa a ser tratada
X2	Moagem - 0,15mm do ROM	Mapa Geral de Processo	X				Alto % de +0,15 no ROM	Correlação	OK	Sim
X3	Moagem - Potência dos Moinhos	Mapa Geral de Processo			X		Baixa potência dos moinhos	Correlação	OK	Sim
X7	Moagem - Teor de Ferro no ROM	Mapa Geral de Processo		X			Alto % de Fe no ROM	Correlação	OK	Sim
X24	Flotação - Teor de Fe no Concentrado	Mapa Geral de Processo				X	Alto % de +0,15 no ROM	Correlação	OK	Sim
X26	Flotação - %Fe no Rejeito	Mapa Geral de Processo	X				Alto % de Fe no rejeito	Correlação	OK	Sim
X28	Flotação - +0,15mm	Mapa Geral de Processo	X				Alto % +0,15mm no ROM	Correlação	OK	Sim
X37	Flotação - Contaminantes (MgO, Al2O3)	Mapa Geral de Processo			X		Alto índice de Contaminantes (MgO, Al2O3)	Correlação	OK	Sim
	%Fe no RJ Final - Rotores e estatores das CF's desgastados	Ishikawa		X			Rotores e estatores das CF's desgastados	Registro Fotográfico	OK	Sim
	%Fe no RJ Final - %Fe	Ishikawa		X			Alto % de Fe no ROM	Correlação	OK	Sim

	%Fe no RJ Final - %MgO	Ishikawa	X	X	Alto % de MgO	Correlação	OK	Sim
X105	% Lama - %Fe	Mapa Geral de Processo		X	Alto % de Fe no ROM	Amostragem	OK	Sim
	Alta pressão do ciclone da deslamagem	Ishikawa		X	Alto percentual de lama	Correlação	OK	Sim

Fonte: Próprio autor (2019)

Após a análise da Matriz de Comprovação das causas, a equipe técnica reuniu a fim de agrupar as causas, fundindo aquelas semelhantes, para facilitar o planejamento e a execução das ações. Essas causas foram agrupadas em seis causas fundamentais, delimitadas da seguinte forma para atuação: Alto % de Fe Rejeito Final; Alto % de Fe Rejeito na Flotação; Alto % +0,15mm no ROM; Alto % MgO no ROM; Alto % de lama; Alto %Fe na alimentação.

4.4 Etapa I – Melhorar

Na etapa Melhorar, foram identificadas possíveis soluções para as causas fundamentais identificadas e, posteriormente, elaborado e executado o plano de ação.

4.4.1 Definir possíveis soluções

Após a realização da comprovação das causas e identificação das 6 causas fundamentais, elaborou-se a Tabela 6, onde verifica-se as possíveis soluções referentes as causas de maiores relevâncias. Para cada uma das causas fundamentais, avaliou-se os impactos das possíveis soluções. A priorização foi realizada por meio de peso dos seguintes impactos: impacto na recuperação metalúrgica, complexidade, custo e prazo.

Tabela 6 - Priorização das Soluções

Priorização das Soluções						**Peso**				
						10	**8**	**6**	**4**	
% Fe Rejeito Global	%Fe no Rejeito Flotação	Transbordos Perdas Físicas	% Lama	Causas a Serem Tratadas	Possíveis Soluções	Impacto na Rec Met	Complexidade	Custo	Prazo	Total
X				Alto % de Fe RJ Final	Testar vórtex com espessura da parede mais grossa na deslamagem	5	1	3	10	116
					Substitur tela do peneiramento de AF de 0,15mm para 0,18mm	10	3	3	3	154

	X			Alto % de Fe RJ Flotação	Descarte do primeiro banco das células *rougher*	7	5	10	10	210
	X				DOE para dosagem de reagentes (amido / amina / pH)	7	5	10	10	210
X				Alto %+0,15mm no ROM	Testar potência mais alta nos moinhos da linha 3	7	5	5	5	160
X					Testar o tipo de circuito (série/Paralelo) e comparar os resultados	10	3	5	3	166
		X		Alto % MgO no ROM	Acordo de Nível de Serviço com a Mina	10	5	10	3	212
			X	Alto % de lama	Testar ápex mais aberto e vórtex mais fechado	10	5	10	10	188
	X			Alto %Fe na alimentação	Testar novas regulagens de nível das células da flotação	10	8	10	10	188

Fonte: Próprio autor (2019)

Após a realização da priorização das soluções, notou-se que as soluções propostas eram viáveis e pertinentes às causas levantadas, dessa forma, decidiu-se então, executar todas elas.

4.4.2 Plano de Ação

Diante das soluções encontradas foi elaborado um plano de ação baseado no 5W1H (*What, Who, When, Why, Where* e *How*), cujo o período de implantação foi de junho a setembro de 2018. Todas as ações propostas, foram implantadas conforme cronograma estipulado. A Tabela 7, apresenta o plano de ação para as soluções, os executores das ações descritas no plano fazem parte do grupo e trabalham diretamente com o tratamento do minério.

Tabela 7 - Plano de Ação

Causas a Serem Tratadas	Soluções a serem testadas	What? (O que?)	Who? (Quem?)	When? (Quando?)	Why? (Por que?)	Where? (Onde?)	How? (Como?)
Alto % de Fe RJ Global	Substitur tela do peneiramento de AF	De 0,15 para 0,18mm	RG.	set/18	Reduzir perda de Fe no oversize	PAF (Pneiramento de Alta Frequência)	Troca física

Alto % de Fe RJ Flotação	Descarte do primeiro banco das células rougher	Criar opção para descartar o rejeito deste banco	WO.	ago/18	Descartar fluxo com alto teor de contaminantes	Flotação	Montar tubulação nova
Alto %+0,15mm no ROM	Testar potência mais alta nos moinhos da linha 3	Aumentar energia de moagem	JF.	jun/18	Reduzir o %0,15mm e melhorar a cinética de flotação	Flotação	Subir a potência de 3600 para 4000kw/h
	Testar o tipo de circuito (série/Paralelo) e comparar os resultados	Inverter o circuito de paralelo para série	JF.	jun/18	Verificar qual o circuito tem melhor perfomance na Rec Met	Moagem	Alteração do fluxo através de válvulas
Alto % MgO no ROM	Acordo de Nível de Serviço com a Mina	Definir limite máximo para o %MgO no ROM	WJ.	ago/18	Evitar elevação do %Fe no RJ	Flotação	Apresentação do limite em reunião
Alto % de Lama	Testar ápex mais aberto e vórtex mais fechado	Substituir o ápex de 0,75pol. para 1pol e o vótex de 3,5 pol. para 3 pol.	RG.	ago/18	Reduzir o percentual de lama	Deslamagem	Testar em uma bateria de ciclone
Alto % Fe no ROM	Fazer planejamento de experimentos para dosagem de reagentes - DOE	Variar a dosagem de insumos para verificar a influência de cada um no indicador (Fe no rejeito)	RC.	ago/18	Reduzir teor de ferro no rejeito	Laboratório	Teste de bancada

Fonte: Próprio autor (2019)

4.5 Etapa C – Controlar

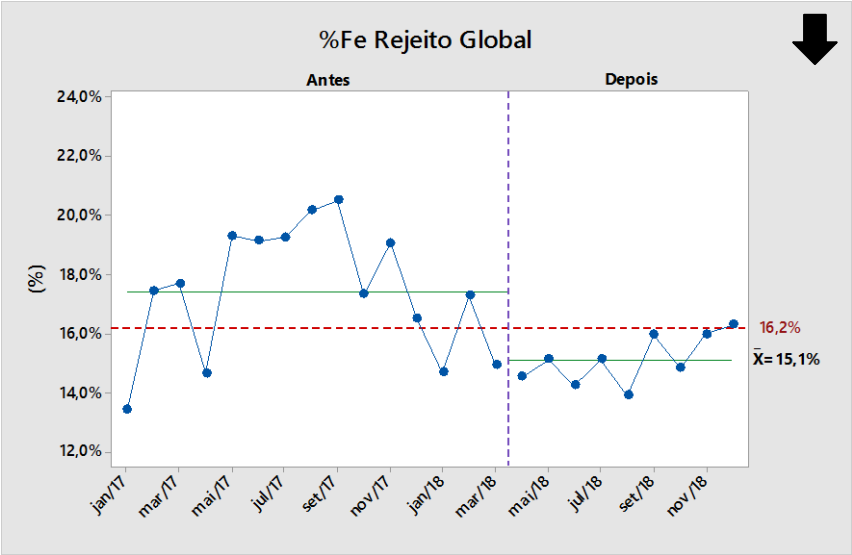
Na etapa Controlar é preciso avaliar os resultados do período de verificação, avaliando o alcance das metas do projeto, o comportamento do indicador, e os ganhos. Necessário ainda, padronizar e comunicar as alterações, monitorar os indicadores, e elaborar um plano de tomada de ações corretivas caso ocorram interferências no processo.

4.5.1 Verificação do alcance das metas e comportamento do indicador principal

Para a verificação do processo com a finalização do projeto, tendo as ações propostas implementadas, elaborou-se no software *Minitab*® os gráficos sequenciais para analisar o comportamento dos indicadores, conforme Gráficos 12 a 16, contemplando: os dados históricos do projeto (janeiro de 2017 a dezembro de 2017), o período de execução (março a setembro de 2018), e por fim, o período de verificação (outubro, novembro e dezembro de 2018). O gráfico contempla também linhas de

referências da média histórica antes e depois do início do projeto Seis Sigma e a meta proposta.

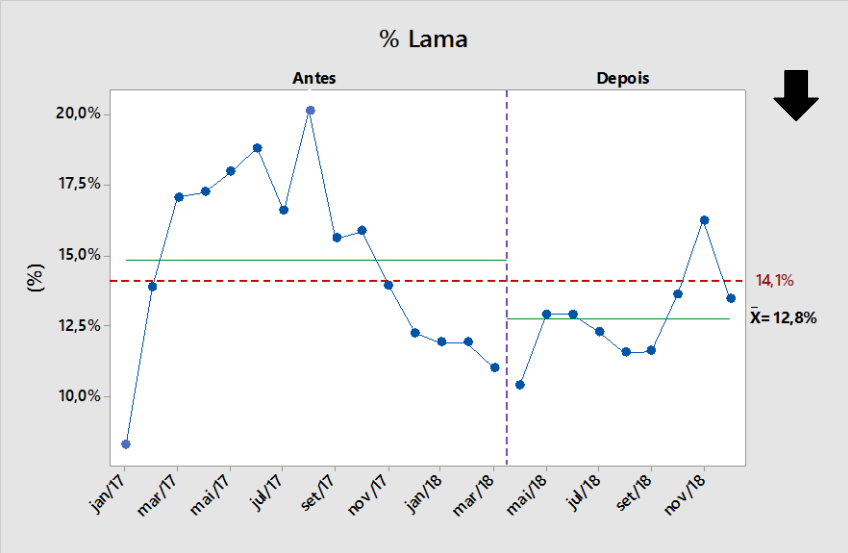
Gráfico 12 - Verificação do alcance da meta (% de Ferro no Rejeito



Fonte: Próprio autor (2019)

O % Ferro no Rejeito Global atingiu a média de 15,1%, ficando dentro da meta específica estipulada e alcançando uma redução de 1,1% em relação a mesma.

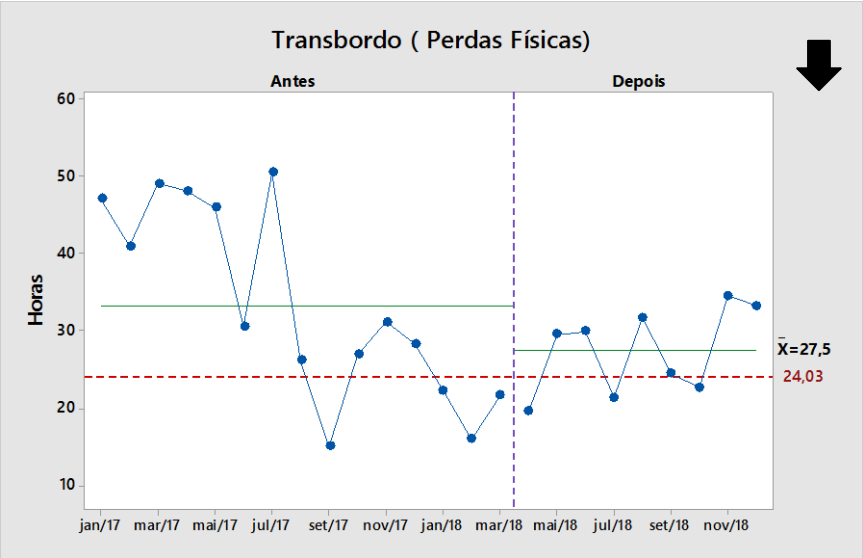
Gráfico 13 - Verificação do alcance da meta (% de Lama)



Fonte: Próprio autor (2019)

O % Lama atingiu a média de 12,8%, ficando dentro da meta específica estipulada e alcançando uma redução de 1,3% em relação a mesma.

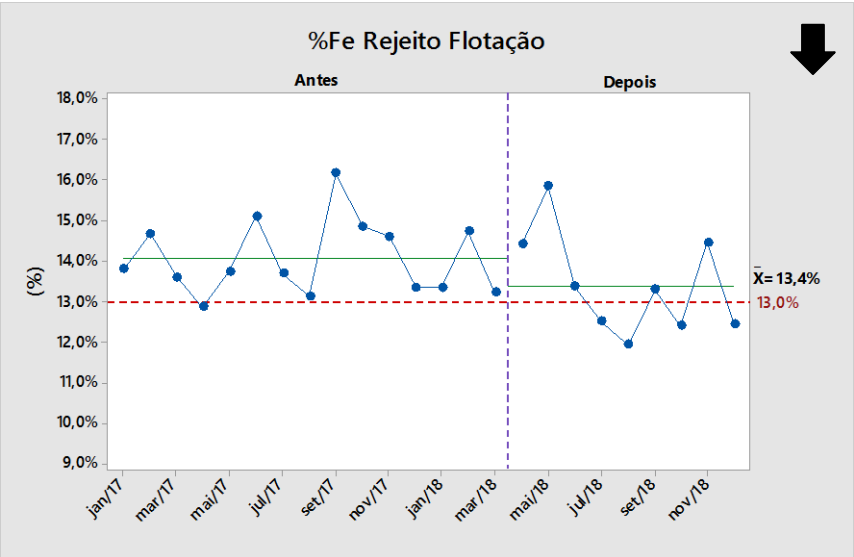
Gráfico 14 - Verificação do alcance da meta (Perdas Físicas)



Fonte: Próprio autor (2019)

O indicador de perdas físicas atingiu a média de 27,5 horas de transbordo, sendo que o valor de referência é abaixo de 24,03 horas. Com isso, não houve alcance da meta específica.

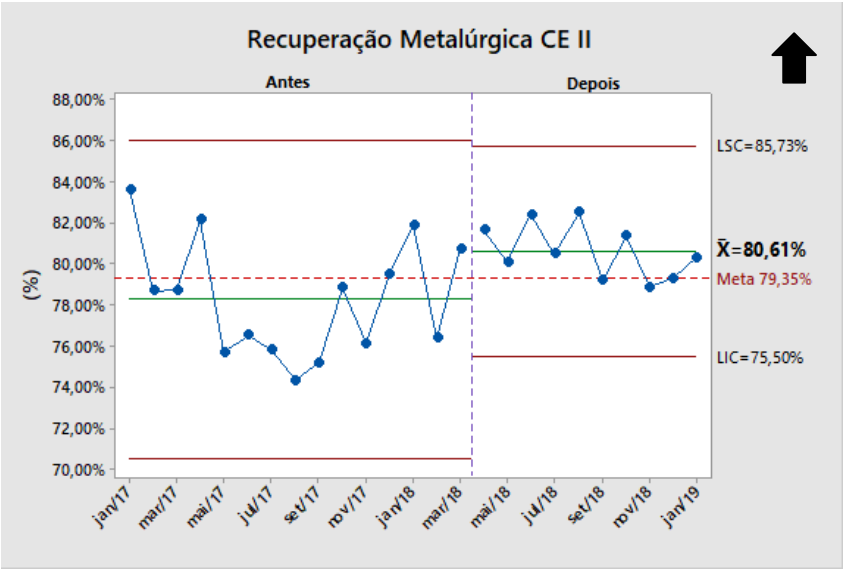
Gráfico 15 - Verificação do alcance da meta (% de Ferro no Rejeito da Flotação)



Fonte: Próprio autor (2019)

O % Ferro de Rejeito na Flotação atingiu a média de 13,4%, ficando um pouco acima da meta específica estipulada. O projeto conseguiu reduzir o % Ferro de Rejeito na Flotação de 14,00% (média de 2017) para 13,4%.

Gráfico 16 - Verificação do alcance da meta (Recuperação Metalúrgica)



Fonte: Próprio autor (2019)

A meta estipulada era de 79,35%. Desde março de 2018 a recuperação metalúrgica tem performado em 80,65%, sendo que no início do trabalho a média era de 77,87%, havendo um aumento de 2,78%, e esta melhora do indicador não afetou a qualidade do produto final. No ano de 2018 o indicador fechou com 80,49% para uma meta de 79,35%.

4.5.2 Cálculo dos ganhos financeiros reais do projeto

Estimava-se um ganho de produção em torno de 0,5% (56.163 toneladas), porém após a implantação do projeto o ganho foi de 30.687 toneladas. Apesar do % Ferro na alimentação ter vindo abaixo do orçamento, houve melhoria no teor de % Ferro do Concentrado e Redução do % Ferro no Rejeito.

Abaixo, a Tabela 8 contempla as variáveis consideradas pela gestão econômica, com os valores do realizado e orçado de 2017, a proposta do Seis Sigma e o que realmente foi realizado após a implantação das ações com a metodologias.

Tabela 8 - Memória de Cálculo após o projeto

Variáveis	Realizado 2017	Orçado 2018	Projeto 6 Sigma	Realizado
Massa Alimentada	24.813.459	25.290.656	25.290.656	24.292.511
Massa do Concentrado	11.885.010	12.000.000	12.056.163	11.611.984
RM da Usina	47,90%	47,4%	47,67%	47,80%
Teor de Ferro da Alimentação	42,21	41,11	41,11	40,70
Teor de Ferro do concentrado	68,63	68,43	68,43	68,54
Recuperação Metalúrgica	77,87%	78,98%	79,35%	80,49%
Teor de Ferro no rejeito	17,93%	16,44%	16,22	15,21

Fonte: Próprio autor (2019)

Outros ganhos foram verificados com a execução do projeto, os ganhos qualitativos foram a redução do teor de ferro no rejeito, menor geração de lama (aumento do tempo de vida útil de barragem), aumento no teor de ferro no concentrado (melhoria no prêmio por qualidade do produto) e redução nas horas de transbordo (melhor aspecto de limpeza de área).

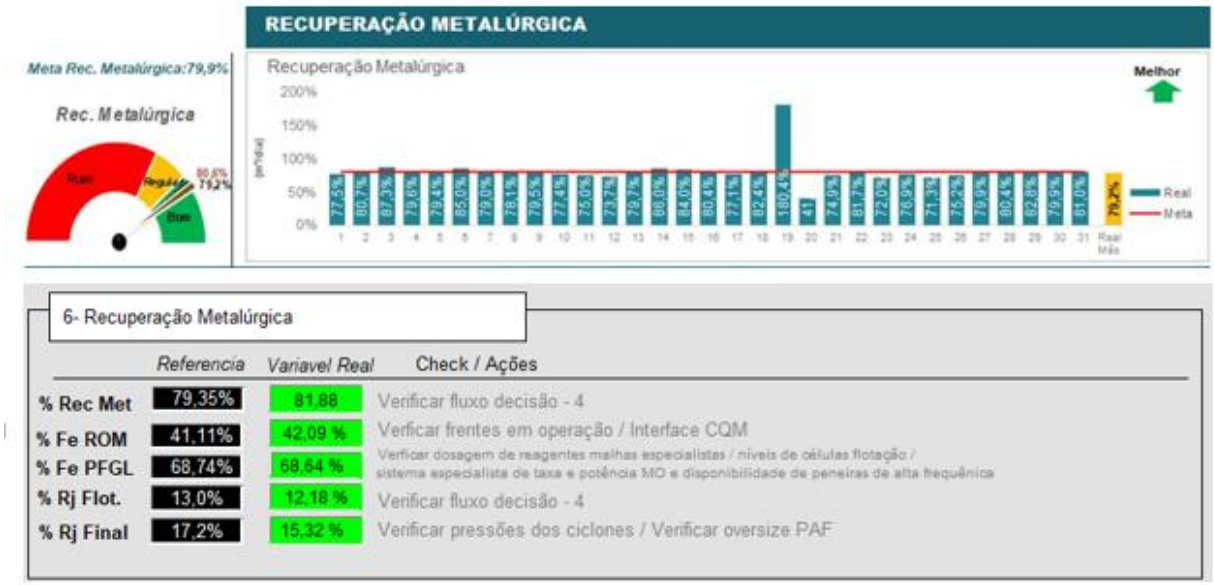
4.5.3 Padronização, Monitoramento e Ações Corretivas

Para a execução da padronização, monitoramento e realização de ações corretivas, caso necessário, foram realizadas algumas atividades. Primeiramente, criou-se e alterou-se padrões para manutenção dos resultados, esses novos padrões foram divulgados e cadastrados na Central de Boas Práticas, a fim de que as pessoas envolvidas com o cumprimento dos novos padrões fossem comunicadas e devidamente treinadas.

A Central de Boas Práticas é o local destinado à divulgação e armazenamento de novas formas de execução de atividades, que obtiveram sucesso e que podem ser replicadas para outros complexos, sendo acessível para todas as unidades da empresa, incluindo unidades internacionais. Os treinamentos em relação aos novos padrões foram realizados e cadastrados no software específico de aprendizagem da organização, sendo possível os funcionários consultarem e, em caso de auditorias, possam ser visualizados como evidência de padronização e conformidade das atividades.

Criou-se ainda um painel visual, um *dashboard* para o monitoramento das variáveis do processo (indicadores estipulados como foco de atuação % Fe Rejeito Global, %Fe Rejeito na Flotação, % Lama e perdas físicas). O modelo do *Dashboard* pode ser visualizado na Figura 16, abaixo:

Figura 16 - *Dashboard*



Fonte: Próprio autor (2019)

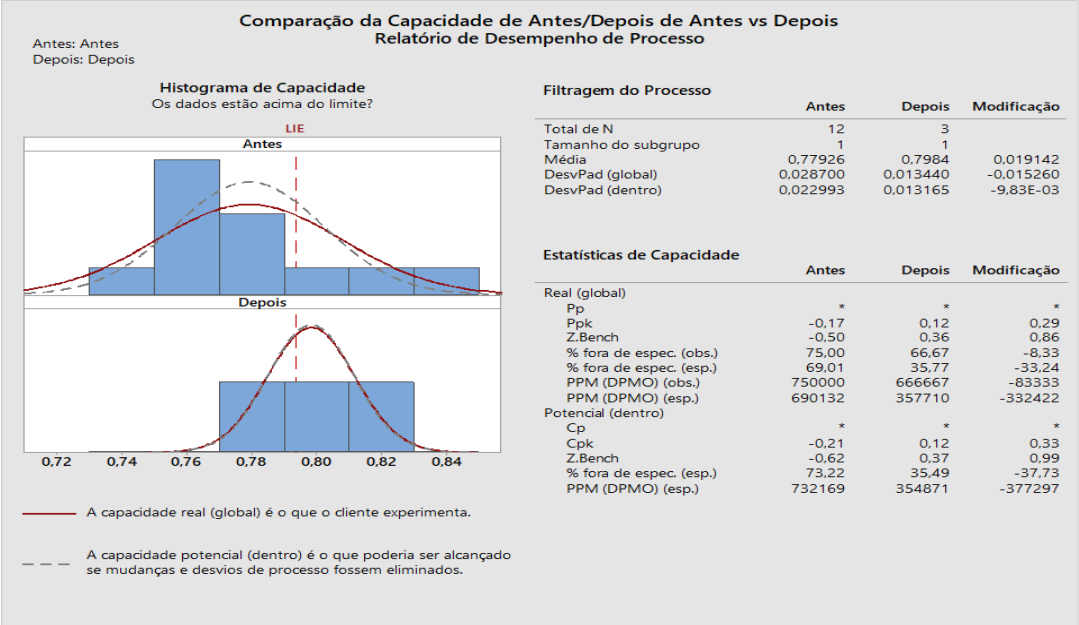
Além dessas ações, ainda foi determinado a utilização dos sistemas especialistas da moagem e amina com acompanhamento diário na sala de reunião do PCP – Planejamento e Controle da Produção, ou seja, as dosagens estão sendo programadas via computadores que imitam o comportamento de especialistas humanos.

Ao final, para a possibilidade de surgimento de problemas no processo, foi desenvolvido um fluxo contendo a cadeia de ajuda em caso de desvios do indicador. Essa cadeia de ajuda é essencial para que o processo não fique prejudicado em caso de intercorrências, fazendo com que as interferências sejam atacadas, visando a melhoria do processo. O *OCAP* – Cadeia de Ajuda Alinhamento operacional, pode ser observado no APÊNDICE C.

4.5.4 Análise comparativa do Desempenho

Para analisar o desempenho da recuperação metalúrgica antes e depois do projeto, foi realizada a comparação dos dados referentes aos meses de janeiro a dezembro de 2017, *baseline*, com dados do período de outubro a dezembro de 2018, período de verificação do projeto. A análise comparativa pode ser verificada no Gráfico 17:

Gráfico 17- Análise Comparativa de Desempenho



Filtragem do Processo

	Antes	Depois	Modificação
Total de N	12	3	
Tamanho do subgrupo	1	1	
Média	0,77926	0,7984	0,019142
DesvPad (global)	0,028700	0,013440	-0,015260
DesvPad (dentro)	0,022993	0,013165	-9,83E-03

Estatísticas de Capacidade

	Antes	Depois	Modificação
Real (global)			
Pp	*	*	*
Ppk	-0,17	0,12	0,29
Z.Bench	-0,50	0,36	0,86
% fora de espec. (obs.)	75,00	66,67	-8,33
% fora de espec. (esp.)	69,01	35,77	-33,24
PPM (DPMO) (obs.)	750000	666667	-83333
PPM (DPMO) (esp.)	690132	357710	-332422
Potencial (dentro)			
Cp	*	*	*
Cpk	-0,21	0,12	0,33
Z.Bench	-0,62	0,37	0,99
% fora de espec. (esp.)	73,22	35,49	-37,73
PPM (DPMO) (esp.)	732169	354871	-377297

Fonte: Próprio autor (2019)

A partir da análise do gráfico pode-se verificar as seguintes condições:

- ✓ Redução do percentual fora de especificação de 69,01% para 35,77%;
- ✓ Deslocamento da média de 77,92% para 79,84%;
- ✓ Redução do desvio padrão de 2,87% para 1,34%;
- ✓ Aumento do nível sigma de 1,00 para 1,86, que corresponde a aproximadamente 357710 defeitos por milhão.
- ✓ Além disso, tem-se valores de Ppk e CPk iguais (0,12), o que demonstra que o processo está controlado, sem causas especiais.

Tais condições apresentadas demonstram a efetividade da metodologia relacionada à melhoria de processos.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Através da aplicação da metodologia Seis Sigma, foi possível visualizar um incremento na variável recuperação metalúrgica na empresa estudada. Considerando que a meta estimada para essa variável foi de 79,35%, a aplicação da metodologia proporcionou superar este parâmetro. Como visto no trabalho, a performance média do ano de 2017 (*baseline*) foi de 77,87% e o praticado no período de verificação do projeto foi uma média de 80,49%, o que representa um aumento de 2,78%. Essa melhora na performance do indicador, demonstra a eficiência dos resultados propostos pela metodologia quando aplicada de maneira adequada, seguindo os passos pré-definidos e executando as atividades e o plano de ação conforme planejado.

A compreensão do processo produtivo da empresa através do seu mapeamento se fez essencial ao sucesso da aplicação da metodologia, onde pode-se conhecer as variáveis relacionadas ao processo e, ainda promover uma definição das possíveis intercorrências atreladas às atividades executadas. Essa compreensão torna o entendimento mais claro e preciso do contexto da organização, essencial mesmo aos integrantes experientes, já que a cada análise e mapeamento realizado, pode-se verificar variações distintas e mudanças de cenários.

A definição das ferramentas a serem utilizadas do método DMAIC é outro fator importante para a conquista de resultados via metodologia Seis Sigma, já que são inúmeras possibilidades, que permitem variadas formas de aplicação e de objetivo a ser alcançado. Sabe-se que a utilização de todas as ferramentas não são de uso obrigatório, logo, cabe aos integrantes do projeto avaliar as possibilidades e definir a utilização conforme necessidade e capacidade do grupo em aplicá-las de forma correta. No caso do trabalho, todas as ferramentas escolhidas se enquadraram no contexto da pesquisa e foram essenciais ao seu desenvolvimento, proporcionando diferentes análises, impulsionando às tomadas de decisão.

Ao decorrer do desenvolvimento do projeto pode-se verificar ainda que o sucesso na aplicação da metodologia Seis Sigma está diretamente relacionado a fatores humanos, como envolvimento dos participantes e das áreas relacionadas ao escopo do projeto, dedicação dos membros da equipe, organização, utilização e aplicação correta das ferramentas estatísticas e da qualidade. Ou seja, para que o Seis Sigma cumpra o papel de ferramenta eficaz de solução de problemas e melhoria do desempenho dos

processos no ambiente empresarial, a equipe deve possuir alto grau de maturidade e comprometimento.

Em relação à replicação do presente estudo, é necessário que os pesquisadores se atentem as condições do minério de ferro da mina explorada, como o teor de ferro e granulometria, que interferem diretamente no processo. Considerar também o orçamento de cada insumo para a área onde a melhoria será implantada, verificando a viabilidade do projeto.

Quanto a aplicação da metodologia Seis Sigma, esta é aplicável a qualquer pesquisa que se deseja verificar a taxa de erros nos processos e, por fim, corrigi-los. Para futuros trabalhos, propõem-se um estudo mais aprofundado da Recuperação Metalúrgica, verificando-se a sustentabilidade dos resultados. Também é proposto a replicação desta pesquisa em outras usinas e complexos da empresa. Ressalta-se que para que fosse possível a aplicação do método DMAIC na pesquisa, uma das premissas respeitadas foi a estabilização do processo.

A presente pesquisa apresentou algumas limitações, como exemplo, o período restrito em relação à verificação e avaliação do alcance das metas do projeto, que se restringiu a apenas três meses. Essa condição impossibilitou a verificação da sustentabilidade dos resultados, que devem ser acompanhados a fim de se averiguar a eficácia das ações executadas.

REFERÊNCIAS

ALDAY. **O Planejamento Estratégico dentro do Conceito de Administração Estratégica.** Rev. FAE, Curitiba, v.3, n.2, p.9-16, maio/ago. 2000.

ANDRADE, V. L. de L.; CARVALHO, M. A**. Curso de Mineração - Básico: Módulo III: Beneficiamento Mineral.** Rio de Janeiro: Valer, 2007.

ARIENTE et al**. Processo de mudança organizacional: estudo de caso do Seis Sigma.** Rev. FAE, Curitiba, v.8, n.1, p.81-92, jan/jun. 2005.

CARPINETTI, L. C. R. **Proposta de um Modelo Conceitual para o Desdobramento de Melhorias Estratégicas.** Gestão e Produção, São Carlos, v. 7, n. 1, p.29-42, abr. 2000.

GIL, A. C. **Técnicas de pesquisa em economia e elaboração de monografias.** São Paulo: Atlas, 2010.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico:** Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo: Universidade FEEVALE, 2013.

PYZDEK, T.; KELLER, P. **O seis sigma: guia do Profissional, um guia completo para Green Belts, Black Belts e gerentes de todos os níveis.** 3. ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2011.

ROTONDARO, R. G. **Seis Sigma: Estratégia Gerencial para a Melhoria de Processos, Produtos e Serviços.** 1 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

ROVETA, M. C. **O Programa Lean Seis Sigma: Uma Visão Plena de uma Empresa do Setor de Mineração.** XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, BA, Brasil, 08 a 11 de outubro de 2013.

SALES, C. G. **Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do underflow do espessador de lamas da usina de Brucutu.Orientador**. Junho/2012

SAMPIERI, et al. **Metodologia de pesquisa.** Tradução por Fátima Conceição Murad, Melissa Kassner e Sheila Clara Dystyler Ladeira. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

SANTOS, A. B.; MARTINS, M. F. **Contribuições do Seis Sigma: estudos de caso em multinacionais.** Universidade Estadual Paulista, UNESP, São José do Rio Preto, SP, Brasil, 2009.

SANTOS, A.; MARTINS, M. **Modelo de referência para estruturar o Seis Sigma nas organizações.** Gestão e Produção, São Carlos, v. 15, n. 1, 2008.

SANTOS, I. E. **Manual de métodos e técnicas de pesquisa científica.** 9. ed. Niterói: Impetus, 2012.

SCATOLIN, A. C. **Aplicação da Metodologia Seis Sigma na Redução das Perdas de um Processo de Manufatura**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 28 de Setembro de 2005.

TÁVORA, K. F. D. **Aplicação da Metodologia Seis Sigma Processo de Corte de uma indústria Produtora de Capas para Bancos de Automóvel.** Faculdade de Economia do Porto, Porto, 2009.

TURRER, H. D. G. **Utilização De Poliacrilamidas De Alto Peso Molecular Na Flotação Catiônica Reversa De Minério De Ferro**. 2004. 1 v. Tese (Doutorado) - Curso de Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção: estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas.** 1. ed. Itajubá: UNIFEI, 2012.

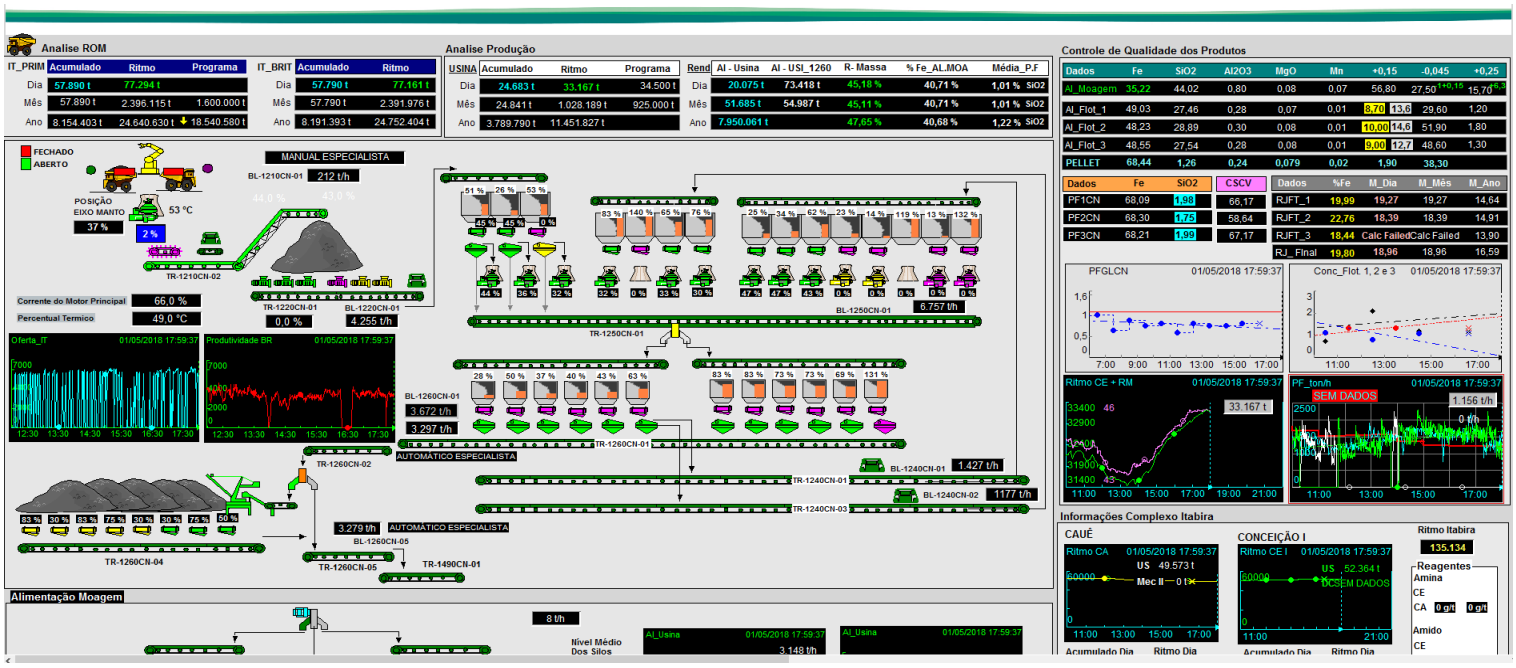
WERKEMA, C. **Criando a Cultura Lean Seis Sigma**. 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

WERKEMA, C. **Métodos PDCA e DMAIC e suas ferramentas analíticas.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** Tradução por Daniel Grassi. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

APÊNDICES

APÊNDICE A – PI PROCESS BOOK



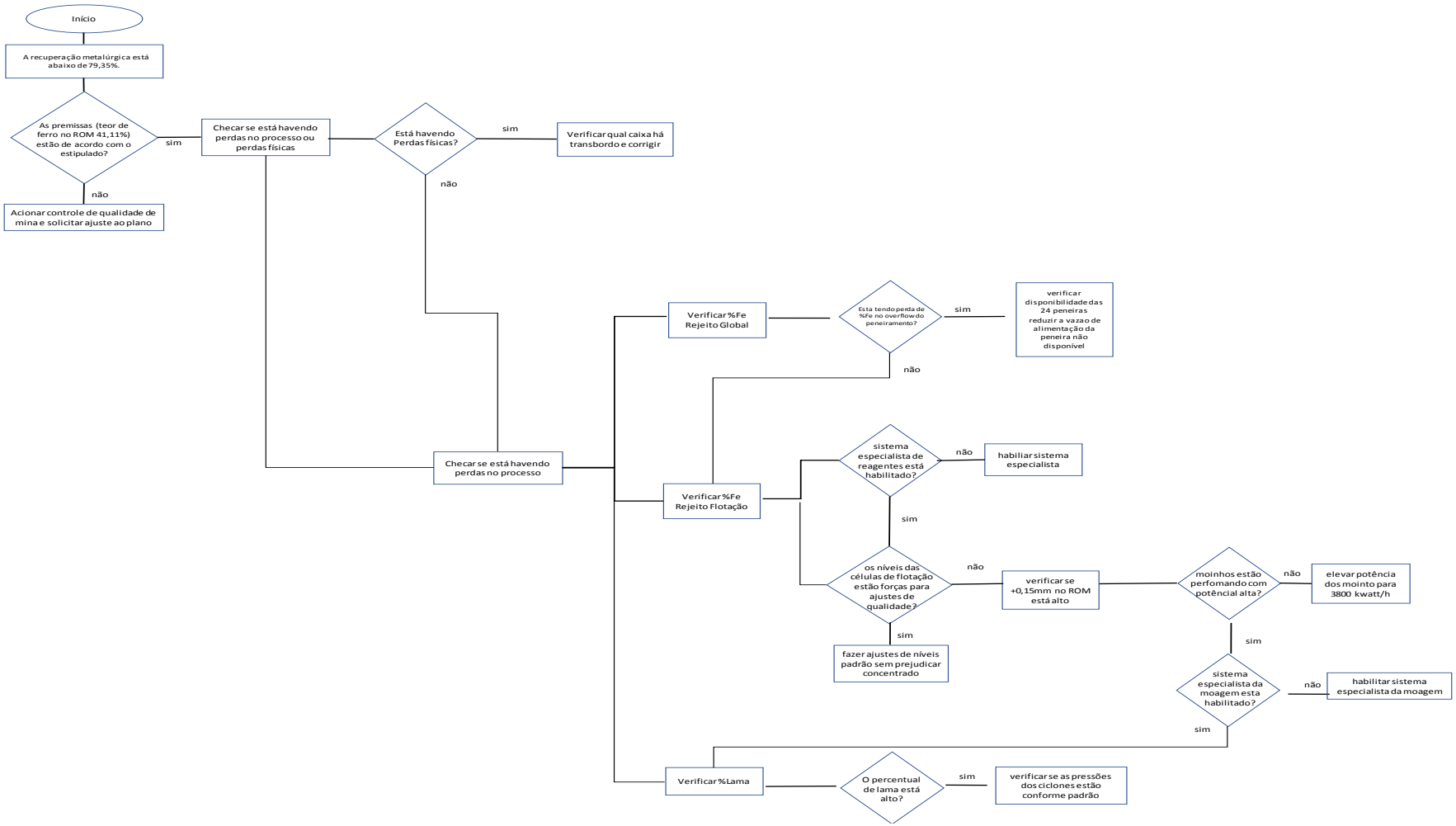
APÊNDICE B – MATRIZ DE PRIORIZAÇÃO ESFORÇO X IMPACTO

Índice de Importância (peso)			10	9	9	5				
	Causas	**Origem das Causas Mapa Geral de Processo / Ishikawa**	**Impacto Rec Met Usina**	**Impacto Custo**	**Autonomia**	**Parâmetro Fora**	**TOTAL**	**Impacto nos KPIs**	**Esforço de Eliminação da Variável de Entrada**	**Resultado Esforço x Impacto**
X_1	Moagem - Percentual de sólidos	Mapa Geral de Processo	5	3	7	0	140	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_2	Moagem - 0,15mm do ROM	Mapa Geral de Processo	7	7	3	7	195	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_5	Moagem - Tipo de Circuito de Moagem (Série ou Paralelo)	Mapa Geral de Processo	5	5	7	5	183	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_6	Moagem - Densidade das caixas	Mapa Geral de Processo	5	0	7	3	128	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_9	Moagem - Carga Circulante	Mapa Geral de Processo	5	3	5	5	147	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{11}	Moagem - Energia Específica	Mapa Geral de Processo	5	5	5	5	165	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{12}	Moagem - Sobremoagem	Mapa Geral de Processo	5	5	5	5	165	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{13}	Deslamagem - Pressão de ciclones	Mapa Geral de Processo	5	0	3	3	92	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{14}	Deslamagem - Vazão das bombas	Mapa Geral de Processo	3	3	3	3	99	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{17}	Deslamagem - %Lama (Partição)	Mapa Geral de Processo	7	3	3	3	139	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{18}	Deslamagem - Perdas Físicas	Mapa Geral de Processo	7	3	3	3	139	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{19}	Deslamagem - Desgaste de Componentes	Mapa Geral de Processo	3	5	5	3	135	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{20}	Flotação - Vazão de alimentação	Mapa Geral de Processo	3	3	3	3	99	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{21}	Flotação - Vazão de recirculação	Mapa Geral de Processo	5	3	5	7	157	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{22}	Flotação - Densidade	Mapa Geral de Processo	7	0	3	7	132	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{23}	Flotação - Teor de Fe na Alimentação	Mapa Geral de Processo	7	7	0	5	158	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{24}	Flotação - Teor de Fe no Concentrado	Mapa Geral de Processo	7	7	3	7	195	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE

X_{25}	Flotação - Densidade da caixa de Concentrado	Mapa Geral de Processo	7	3	3	3	139	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{26}	Flotação - %Fe no Rejeito	Mapa Geral de Processo	7	7	3	7	195	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{27}	Flotação - %Fe no concentrado do scavenger	Mapa Geral de Processo	7	5	5	7	195	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{28}	Flotação - +0,15mm	Mapa Geral de Processo	7	5	3	5	167	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{29}	Flotação - Dosagem de Amido	Mapa Geral de Processo	5	7	7	5	201	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{30}	Flotação - Dosagem de Amina	Mapa Geral de Processo	7	7	7	7	231	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{31}	Flotação - pH	Mapa Geral de Processo	5	7	7	5	201	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{32}	Flotação - Controle automático de nível nas CF's	Mapa Geral de Processo	7	3	7	7	195	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{33}	Flotação - Aeração	Mapa Geral de Processo	3	3	7	3	135	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{34}	Flotação - By pass de CF's	Mapa Geral de Processo	7	3	5	3	157	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{35}	Flotação - Perdas Físicas	Mapa Geral de Processo	7	3	3	3	139	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{36}	Flotação - Condicionamento de polpa	Mapa Geral de Processo	0	0	3	0	27	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{37}	Flotação - Contaminantes (MgO, Al2O3)	Mapa Geral de Processo	7	7	0	7	168	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{38}	Flotação - Concentração de Amido	Mapa Geral de Processo	7	3	5	7	177	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{39}	Flotação - Concentração de Amina	Mapa Geral de Processo	7	3	5	7	177	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{40}	PAF - Vazão de alimentação	Mapa Geral de Processo	7	3	3	7	159	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{41}	PAF - Abertura das telas de peneiramento	Mapa Geral de Processo	7	3	7	3	175	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{50}	Espessamento e Filtragem - Umidade	Mapa Geral de Processo	3	0	5	3	90	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{51}	Espessamento e Filtragem - %sólidos no filtrado	Mapa Geral de Processo	0	0	7	3	78	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{52}	Espessamento e Filtragem - Perdas Físicas	Mapa Geral de Processo	7	7	7	7	231	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{53}	Espessamento e Filtragem - pH	Mapa Geral de Processo	3	0	5	0	75	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{54}	Espessamento e Filtragem - Vazão das bombas de underflow do espessador	Ishikawa	5	3	3	3	119	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE

X_{55}	Perdas Físicas - Controle Manual de Nível das Caixas	Ishikawa	7	3	5	5	167	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{56}	Perdas Físicas - Baixa utilização dos sistemas especialistas	Ishikawa	5	3	7	7	175	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{57}	Perdas Físicas - Falha na medição de nível das caixas e tanques	Ishikawa	5	3	3	5	129	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{59}	Perdas Físicas - Falha na medição de vazão	Ishikawa	5	3	3	7	139	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{60}	Perdas Físicas - Falha na medição de densidade	Ishikawa	5	3	3	5	129	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{61}	Perdas Físicas - Vazamento tubulação/Válvulas	Ishikawa	7	3	5	7	177	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{65}	Perdas Físicas - Taxa de alimentação	Ishikawa	7	3	7	7	195	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{67}	Perdas Físicas - Granuloquímica do ROM	Ishikawa	7	5	3	7	177	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{68}	%Fe no RJ Global - Regulagem forçada da flotação	Ishikawa	7	7	7	7	231	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{69}	%Fe no RJ Global - Controle de aeração manual	Ishikawa	3	0	7	3	108	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{70}	%Fe no RJ Global - Falta de conhecimento técnico do operador	Ishikawa	3	3	3	3	99	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE
X_{71}	%Fe no RJ Global - Controle de reagentes em manual	Ishikawa	5	7	7	7	211	ALTO	BAIXO	PRIORIDADE

APÊNDICE C – OCAP (OUT-OF-CONTROL-PLAN)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas - ICEA
Colegiado do Curso de Engenharia de Produção - COEP
Campus João Monlevade

TERMO DE CONFORMIDADE

Certifico que o aluno (a) Priscila Jardim Mariano Cabral, matrícula 14.2.8613, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado "APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA NA ANÁLISE DA RECUPERAÇÃO METALÚRGICA EM UMA MINERADORA DE ITABIRA – MG", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

João Monlevade, 12 de Julho de 2019.

Elisângela F. de Oliveira

Elisângela Fátima de Oliveira
Orientador (a)