

APLICAÇÃO DO LEAN SEIS SIGMA PARA MELHORIA DA ETAPA DE SEPARAÇÃO MAGNÉTICA DE ALTA INTENSIDADE EM UMA EMPRESA DE MINERAÇÃO

M. T. G. GUIMARÃES¹, P. E. C. PEREIRA², G. G. SILVA³, H. S. DINIZ-PINTO⁴, R. DE P. ARAÚJO⁵

Movement¹, Universidade Federal de Catalão^{2,3,4,5}

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6068-4692>

paulo_elias_carneiro@ufcat.edu.br²

Submetido em 17/01/2020 - Aceito em 17/12/2020

DOI: 10.15628/holos.2021.9418

RESUMO

A melhoria de processos produtivos em uma organização é uma necessidade em virtude da elevada competitividade no mercado, além de demandas por parte de órgãos reguladores. No setor mineral, tais ações se tornam ainda mais importantes, uma vez que o setor está constantemente sujeito a incertezas não aplicáveis a outros setores industriais. Neste trabalho foi utilizada a metodologia Lean Seis Sigma para o aumento da eficiência operacional da etapa de Separação Magnética de Alta Intensidade, diante do fato de que a recuperação metalúrgica estava, em média, 7,21% menor que o valor

esperado. A execução do projeto foi feita seguindo-se o ciclo DMAIC, onde as investigações realizadas mostraram que 52,3% das causas-raiz estavam atribuídas à própria operação do equipamento (separador magnético). Intervenções no processo e adequações no funcionamento do separador resultaram em um aumento de 9,66% na média da recuperação metalúrgica, a qual ficou 1,75% maior que a meta estabelecida (94,63%). Uma redução de 65,66% no desvio padrão desta variável também foi observada, o que se traduz em uma redução da variabilidade geral do processo.

PALAVRAS-CHAVE: Ciclo DMAIC, Lean Seis Sigma, melhoria contínua, Separação Magnética de Alta Intensidade.

APPLICATION OF LEAN SIX SIGMA TO IMPROVE HIGH-INTENSITY MAGNETIC SEPARATION STEP IN A MINING COMPANY

ABSTRACT

The improvement of production processes in an organization is a necessity due to the high competitiveness in the market, as well as demands from regulatory agencies. In the mining sector, such actions become even more important, as the sector is constantly subject to uncertainties not applicable to other industrial sectors. In this work the Lean Six Sigma methodology was used to increase the operational efficiency of the High-Intensity Magnetic Separation step, given the fact that the metallurgical recovery was, on average, 7.21% lower than the expected value. The project execution was done

following the DMAIC cycle, where the investigations showed that 52.3% of the root-causes were attributed to the equipment (magnetic separator) operation itself. Interventions in the process and adjustments in the operation of the separator resulted in a 9.66% increase in the average metallurgical recovery, which was 1.75% higher than the established target (94.63%). A reduction of 65.66% on the standard deviation of this variable was also observed, which translates into a reduction in overall process variability.

KEYWORDS: DMAIC cycle, Lean Six Sigma, continuous improvement, High-Intensity Magnetic Separation.



1 INTRODUÇÃO

A necessidade de melhoria de processos produtivos nas organizações não tem sido limitada somente à redução de custos operacionais. Demandas por parte de clientes, *stakeholders* e agências regulamentadoras têm atuado no sentido de fortalecer a busca pela melhoria dos processos produtivos com o propósito de reduzir impactos ambientais e sociais (Cherrafi, Elfezazi, Chiarini, Mokhlis, & Benhida, 2016).

Tal questão se torna ainda mais importante na indústria mineral, uma vez que o setor é constantemente sujeito a incertezas não aplicáveis aos demais setores industriais (Runge, 1998), as quais incluem incertezas geológicas e externas (p. ex. preço de venda). Além disso, a redução de resíduos, principalmente rejeitos advindos do processamento mineral, é fortemente necessária, uma vez que impacta a sustentabilidade do empreendimento.

Técnicas e ferramentas de qualidade foram desenvolvidas com o propósito de alcançar níveis superiores de qualidade e eficiência operacional. A implantação de tais ferramentas, acompanhada de um monitoramento/controlado do processo fornece subsídios para a obtenção de padrões de qualidade continuamente superiores (Sokovic, Pavletic, & Kern Pipan, 2010).

Uma das técnicas utilizadas para a melhoria de processos produtivos e da gestão é o Lean Seis Sigma (LSS). A técnica foi utilizada por Indrawati & Ridwansyah (2015) em conjunto com outras ferramentas para o mapeamento de um processo de produção de minério de ferro, resultando em uma quantificação de atividades não produtivas, o que direcionou a implantação de melhorias. Ainda, a utilização da técnica em uma empresa do setor mineral no Estado de Goiás, Brasil (Pires, Pereira, Silva, Diniz-Pinto, & Araújo, 2018) possibilitou a redução de 60% na quantidade de pendências vencidas no Sistema de Gestão Integrado (SGI) da organização.

Neste trabalho, o LSS, em conjunto com outras ferramentas da qualidade, é utilizado para o aumento da eficiência operacional da etapa de Separação Magnética de Alta Intensidade (SMAI) em uma planta de processamento mineral de um empreendimento mineiro de fosfato.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com o tema do trabalho e as ferramentas utilizadas, estão descritos a seguir os conceitos de LSS e SMAI, explicando-se o contexto de cada um. Informações quanto à demais ferramentas de qualidade utilizadas para a execução deste trabalho podem ser encontradas em Lobo & Silva (2014), Possarle (2014) e Moore (2007).

2.1 Lean Seis Sigma

O LSS é uma estratégia de negócio cujo foco é reduzir a variabilidade dos processos produtivos e aumentar a satisfação dos clientes. Representa a união de duas abordagens: (i) Seis Sigma; e (ii) Manufatura Enxuta (*Lean Manufacturing*), cujos propósitos são, respectivamente, reduzir a variabilidade por meio de análise/controlado estatístico do processo e remover ineficiências, tais como perdas na produção e tempos de espera desnecessários (Taghizadegan, 2006).



A metodologia de melhoria contínua do LSS é estruturada em cinco etapas sequenciais, as quais são normalmente definidas como ciclo DMAIC: (i) Definir (*Define* - D), onde são estabelecidos os processos críticos, os requisitos do cliente e realizadas estimativas do custo-benefício do projeto; (ii) Medir (*Measure* - M), na qual é mensurado o desempenho do processo por meio de coleta de amostras, seguida de análises estatísticas e de capacidade; (iii) Analisar (*Analyse* - A), em que são investigadas e determinadas as causas-raiz dos problemas; (iv) Melhorar (*Improve* - I), onde são implantadas modificações no processo com o propósito de eliminar as causas-raiz dos problemas; e (v) Controlar (*Control* - C), em que são definidos procedimentos e diretrizes para a manutenção dos novos patamares de qualidade e eficiência operacional atingidos com as ações da etapa de implantação das melhorias (*Improve*) (Rodrigues, 2014; Carvalho & Rotondaro, 2012).

2.2 Separação Magnética

O produto (concentrado final) em um empreendimento mineiro é obtido mediante a realização de uma série de etapas consecutivas, denominadas, em conjunto, de Processamento Mineral, cujo propósito é fornecer um concentrado final com especificações mineralógicas/químicas e granulométricas adequadas para sua comercialização (Wills & Finch, 2016). Neste sentido, o material alimentado em uma usina de processamento mineral é submetido a uma sequência de operações unitárias, cada uma com um objetivo definido.

A Separação Magnética corresponde a uma operação unitária no processamento mineral, cuja finalidade é separar espécies minerais em função das suas respectivas afinidades (susceptibilidade magnética) em relação a um campo magnético, de tal maneira que é possível separar minerais fortemente atraídos pelo campo (ferromagnéticos) daqueles fracamente atraídos (paramagnéticos) e repelidos (diamagnéticos) (Sampaio, Luz, & França, 2010).

Os equipamentos utilizados (separadores magnéticos) podem ser classificados em função da intensidade do campo magnético aplicado em: (i) separador de baixa intensidade (até 0,2 T); e (ii) separador de alta intensidade (até 2,0 T), onde o primeiro e o último são empregados na separação de partículas e/ou espécies minerais ferromagnéticas e paramagnéticas, respectivamente (Iyer, 2011).

Há várias tipos de separadores magnéticos de alta intensidade. Neste trabalho, o empreendimento utiliza separadores do tipo Carrossel, também denominados de Separador Jones. Este equipamento possui um anel rotativo, normalmente denominado "Carrossel", o qual é construído em uma estrutura de aço rígida e atravessa um campo magnético, no qual estão presentes matrizes (normalmente placas sulcadas), cuja finalidade é aumentar localmente o gradiente do campo aplicado. A polpa (água e partículas minerais) é alimentada em uma região com campo de alta intensidade, o que faz com que as partículas magnéticas sejam captadas pela matriz, direcionadas para uma calha coletora pelo movimento rotativo do anel, e então descarregadas com o auxílio de um jato de água (Iyer, 2011; Sampaio, Luz, & França, 2010).



3 METODOLOGIA

O projeto foi desenvolvido a partir da estruturação do ciclo DMAIC. Inicialmente, na etapa *Define*, foi levantado o problema a ser tratado, ou seja, a incompatibilidade do indicador “recuperação metalúrgica” em relação ao valor de projeto. Em seguida (etapa *Measure*) foi feito um mapeamento do processo com o propósito de identificar as variáveis críticas para a eficiência operacional da SMAI, as quais foram analisadas quanto às suas respectivas capacidades. As causas raízes de cada variável crítica foram então investigadas na etapa *Analyse*, na qual foram usadas as seguintes ferramentas: *Brainstorming*, diagrama de Ishikawa, matriz GUT e 5W2H. A partir das causas raízes encontradas, foram implantadas as melhorias necessárias (etapa *Improve*), acompanhadas de treinamentos das equipes diretamente responsáveis pela SMAI, obtendo-se, então, os resultados das alterações efetuadas no processo e as diretrizes para manutenção a longo prazo do projeto (*Control*).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos em cada etapa do ciclo DMAIC estão descritos a seguir, os quais culminam nos resultados finais do projeto implantado, descritos na etapa *Control*.

4.1 Etapa *Define*

Os dados coletados da etapa SMAI referentes ao indicador “recuperação metalúrgica” mostraram que tal índice, entre abril de 2017 e novembro de 2017 (Figura 1), encontrava-se sempre abaixo do valor de projeto definido pelo planejamento da empresa (94,63%), com uma tendência de diminuição de tal índice a partir do mês de Setembro de 2017. A ineficiência operacional na etapa comprometeu diretamente da produção, cujo valor acumulado no período se mostrou 6,60% menor que o valor acumulado previsto, o que demandou uma ação da gestão com a meta de tornar a recuperação metalúrgica maior ou igual ao valor de projeto até o mês de abril de 2018.

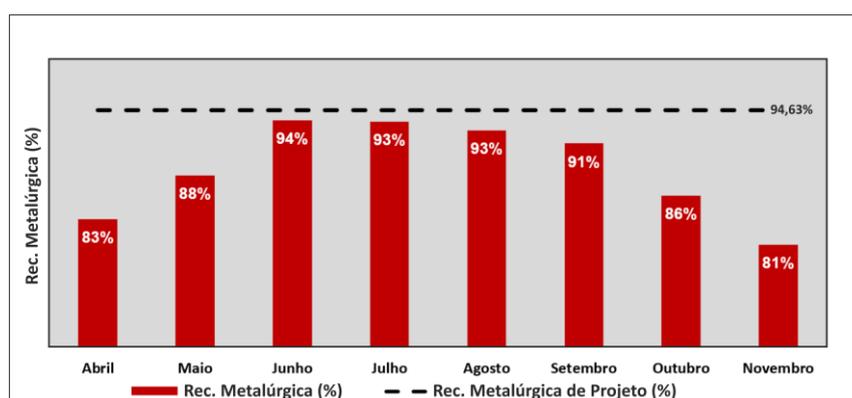


Figura 1: Recuperação metalúrgica na SMAI entre abril e novembro de 2017.

A análise da carta de controle da recuperação metalúrgica na etapa SMAI (Figura 2) mostrou que o processo se encontrava fora de controle estatístico, com pontos fora dos Limites de Inferiores de Especificação (LIE) e com média abaixo da especificada em projeto (94,63%), mostrada como uma linha tracejada vermelha na Figura 2. Apesar de nos meses de junho e julho a etapa ter

apresentado recuperações compatíveis com o valor projetado (94,63%), é perceptível que as melhorias e/ou controles realizados nestes períodos não foram eficazes no sentido de eliminar as causas raízes dos problemas, o que levou ao reaparecimento dos mesmos e consequentemente, à ocorrência de desvios e perda da eficiência operacional da etapa.

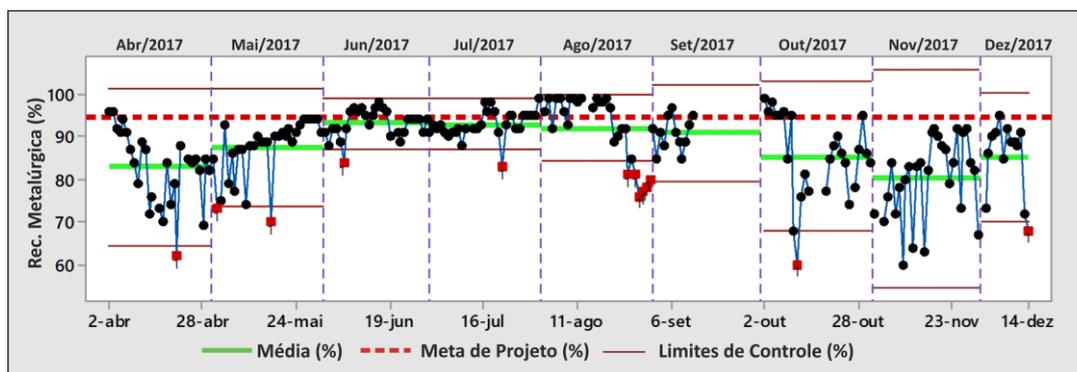


Figura 2: Carta de controle da Recuperação Metalúrgica na SMAI entre abril e dezembro de 2017.

A análise da recuperação metalúrgica juntamente com outras variáveis de processo apontou que outro indicador de processo importante para a medida da eficiência operacional do mesmo era o teor de P_2O_5 no rejeito da SMAI, cujo coeficiente de correlação com a recuperação metalúrgica foi negativo, de tal maneira que o aumento do teor de P_2O_5 no rejeito da SMAI resultava em uma diminuição do outro indicador. A regressão linear das duas variáveis resultou na Equação (1), cujo valor de R^2 foi de 57,6%.

$$Rec. Met. (\%) = 120,6 - 1,338(\text{Teor de } P_2O_5 \text{ Rej.}) \quad (1)$$

As informações levantadas sobre o problema encontrado, os indicadores a serem monitorados, a meta a ser cumprida – tornar a recuperação metalúrgica maior ou igual ao valor de projeto até o mês de abril de 2018, as possíveis limitações e os recursos disponíveis foram incluídas no Contrato do Projeto (*Project Charter*), o qual foi validado pela equipe executora.

O processo, a seguir, foi mapeado por meio da ferramenta SIPOC, através da qual foram definidos: (i) o fornecedor (*supplier*), dado como a etapa de deslamagem; (ii) a entrada (*input*), sendo a polpa condicionada; (iii) o fluxo do processo (*process*), o qual envolve o circuito de flotação anterior à SMAI e os tanques para o bombeamento da polpa, posteriores à SMAI; (iv) o produto (*output*), o qual é o concentrado final e; (v) o cliente (*customer*), o terminal da empresa.

4.2 Etapa Measure

As informações coletados entre abril de 2017 e dezembro de 2017 referentes à recuperação metalúrgica e ao teor de P_2O_5 no rejeito da SMAI foram analisadas quanto à capacidade do processo, o que resultou nos gráficos das Figuras 3a e 3b, relativas à primeira e à segunda variáveis, respectivamente.

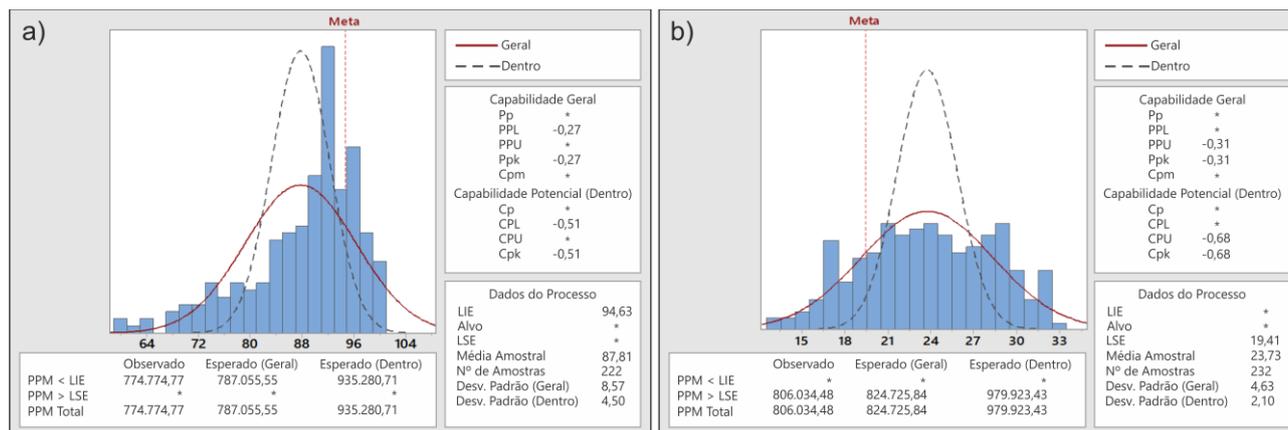


Figura 3: Informações sobre a capacidade - a) da Recuperação Metalúrgica; b) do teor de P₂O₅ no rejeito da SMAI.

De acordo com a Figura 3a, pode-se observar que a média amostral da recuperação metalúrgica (87,81%) encontrava-se 7,21% abaixo do valor especificado de projeto (94,63%). Ainda, o índice “Defeitos por Milhão de Oportunidades” (DPMO), mostrou-se muito elevado, cujo valor foi de 787.055,55 partes por milhão (PPM), o que indica que para cada 100 amostras coletadas na SMAI, 78,7% estavam com a recuperação metalúrgica abaixo do especificado em projeto. Por fim, o Cpk (-0,51) indicou que o processo não era capaz de fornecer a recuperação metalúrgica dentro das especificações.

O teor de P₂O₅ no rejeito da SMAI inicialmente não possuía um valor como meta. Através da Equação (1), considerando-se a recuperação metalúrgica de 94,63% - meta a ser alcançada, obteve-se um teor de P₂O₅ de 19,41%, estipulado, então, como o valor a ser alcançado para este indicador do processo. A análise da capacidade do teor de P₂O₅ no rejeito da SMAI (Figura 3b) apontou que a média amostral da variável (23,73%) estava 22,26% maior que a meta (19,41%). O índice DPMO foi de 824.725,84 partes por milhão (PPM), de tal maneira que para cada 100 amostras coletadas, 82,47% estariam com o teor de P₂O₅ acima do especificado. O índice Cpk (-0,68) demonstrou, ainda, que o processo não era capaz de fornecer teores de P₂O₅ abaixo do limite superior especificado (19,41%).

4.3 Etapa *Analyse*

A realização de um *brainstorming* com a equipe de trabalho do projeto, onde todos expuseram suas opiniões, resultou em um inventário de 16 potenciais causas para problema, as quais foram, então, organizadas em um diagrama de Ishikawa, classificadas nos seguintes grupos: Mão-de-Obra, Método, Matéria-Prima e Máquina. Notou-se que 52,3% das causas levantadas estavam atribuídas ao grupo “Máquina”, o que indica que a padronização da operação e a manutenção e a operação do equipamento (separador magnético de alta intensidade) são essenciais para a eficiência operacional adequada do mesmo.

As causas levantadas foram priorizadas a partir da Matriz GUT, onde foram especificados valores de 1 (insignificante) a 5 (crítico) para três aspectos: Gravidade, Urgência e Tendência, cujos valores foram multiplicados entre si, resultando na Prioridade de cada causa. A Tabela 1 mostra os valores encontrados através da Matriz GUT, os quais indicam inicialmente três causas com a maior

Prioridade (100). Entretanto, a escolha das causas mais relevantes foi feita a partir de um *Box Plot* dos valores de Prioridade, através do qual ficou definida a nota/valor de corte como sendo o terceiro quartil (48), que separou as causas que seriam tratadas na ocasião das demais, a serem tratadas em outro momento. Portanto, as causas cuja Prioridade foram maiores ou iguais a 48 foram priorizadas, enquanto as demais foram separadas para ações em ocasiões futuras.

Tabela 1: Matriz GUT constando as pontuações dos itens Gravidade (G), Urgência (U) e Tendência (T), e índice Prioridade (P) para cada causa potencial

Item	Descrição	G	U	T	P
X10	Posicionamento inadequado dos <i>sprays</i> de lavagem	5	5	4	100
X8	Obstrução das matrizes magnéticas	4	5	5	100
X9	Desvio de fluxo de não magnético para a calha do magnético	4	5	5	100
X1	Sistema de spray com vazão e pressão abaixo da recomendada	4	4	3	48
X16	Amostragem não representativa e/ou diferente entre turmas	4	4	3	48
X3	Vazamento de polpa na alimentação dos carrosséis	4	3	4	48
X5	Mangotes de alimentação mal dimensionados e instalados	3	4	3	36
X13	Ausência e/ou ineficiência dos <i>sprays</i> de lavagem inferiores	3	2	3	18
X2	Distribuidor de polpa ineficiente	4	2	2	16
X7	Porcentagem de sólidos na alimentação inadequada	4	2	2	16
X4	Baixa velocidade de rotação dos carrosséis	2	5	1	10
X12	Desgaste das matrizes magnéticas	2	2	2	8
X6	Campo magnético abaixo de 8.000 Gauss	3	2	1	6
X11	Posicionamento inadequado do defletor da calha de mistos	2	2	1	4
X14	Granulometria da alimentação inadequada para separação	1	2	1	2
X15	Equipamento subdimensionado	1	2	1	2

4.4 Etapa *Improve*

A causa X10, relacionada ao posicionamento inadequado dos *sprays* de lavagem, foi avaliada através da ferramenta 5 Porquês, o que evidenciou que os *sprays* de lavagem dos separadores magnéticos de alta intensidade não se encontravam padronizados de acordo com a especificação do fabricante. Além disso, as especificações de pressão e vazão nos mesmos também estavam em discordância em relação ao especificado pelo fabricante do equipamento.

A partir das definições do fabricante para o posicionamento dos *sprays* de lavagem, a posição de cada um foi alterada, acompanhada de modificações no arranjo físico dos separadores, conforme é estabelecido pelo fabricante. Quanto à pressão, esta foi adequada às especificações e foram instalados manômetros para se monitorar o comportamento da mesma. A vazão não foi alterada pelo fato de demandar uma intervenção de maior porte no processo, mas foi posta como uma melhoria a ser executada futuramente.

A delimitação da solução para a causa X8, relativa à obstrução das matrizes magnéticas do equipamento, deu-se através de um monitoramento no processo e execução de limpeza nas matrizes, efetuada no dia 14/12/2017. Tal acompanhamento permitiu identificar três fases distintas na operação da SMAI, conforme mostra a Figura 4: (i) Fase 1, correspondente ao período em que as

matrizes estavam obstruídas, caracterizada por elevado teor de P_2O_5 e baixo teor de Fe_2O_3 no rejeito, indicando que a operação estava ineficiente; (ii) Fase 2, relacionada ao período com as matrizes limpas, logo após a desobstrução das mesmas (14/12/2017), a qual é caracterizada por apresentar baixo teor de P_2O_5 e elevado teor de Fe_2O_3 no rejeito, configurando uma operação eficiente, e; (iii) Fase 3, a qual representa uma transição entre as Fases 1 e 2, na qual ocorre progressivamente o entupimento das matrizes, e corresponde ao período para a limpeza das mesmas, para que elas voltem à Fase 2.

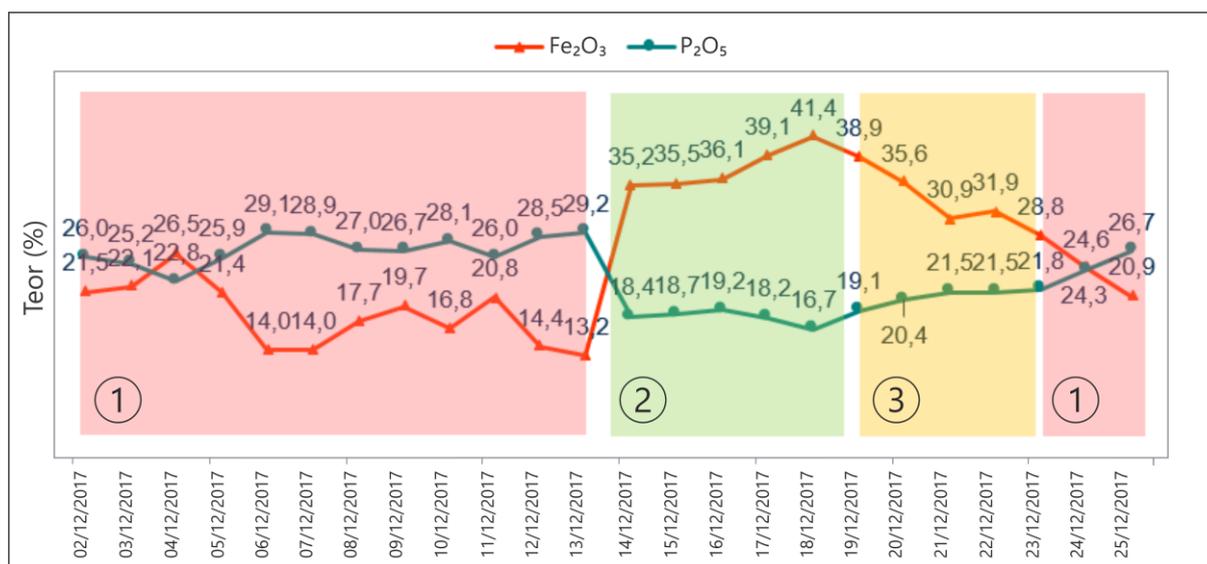


Figura 4: Comportamento dos teores de P_2O_5 e de Fe_2O_3 na no rejeito da SMAI com a identificação das fases.

A partir das informações levantadas no acompanhamento do processo, foi desenvolvida uma rotina padrão em todos os turnos de operação para a limpeza das matrizes, conforme o comportamento do processo. Um quadro contendo a rotina de limpeza e o padrão estabelecido para a mesma foi fixado na área, o que fornece o direcionamento necessário para a execução da atividade.

Em investigações realizadas nos separadores magnéticos de alta intensidade no tocante às possíveis causas para o desvio do fluxo de material não-magnético para a calha de material magnético (causa X9) foi constatado que alguns equipamentos estavam sem a calha defletora que divide o fluxo dos materiais não-magnético (produto da etapa) e misto, resultando, portanto, em perdas na recuperação metalúrgica. A partir da ciência desta situação, foram instaladas calhas defletoras nos equipamentos desprovidos das mesmas.

No circuito do processamento mineral, o material misto da SMAI era enviado para a etapa anterior (flotação) a fim de aumentar a recuperação do mineral valioso (dado em teor de P_2O_5). Entretanto, análises químicas mostraram evidências de que os produtos magnético e misto eram semelhantes no que tange aos óxidos P_2O_5 e Fe_2O_3 , dispensando o retorno do material misto para o circuito de flotação. Assim, foi realizada uma alteração no circuito da SMAI, de tal maneira a enviar o material misto, juntamente com o magnético, diretamente para uma barragem destinada a receber tal material.

Estudos de campo revelaram que a coleta manual de amostras na SMAI por diferentes turmas não estava ocorrendo de maneira padronizada e nos mesmos locais entre as mesmas (causa X16). Diante disso, foram efetuados treinamentos das turmas responsáveis, nos quais foram abordados os seguintes itens: (i) importância de uma amostragem representativa, (ii) conceitos de amostragem, e; (iii) técnicas adequadas para a coleta das amostras/incrementos. Os procedimentos e locais de coleta foram, então, padronizados para garantir a menor variabilidade possível entre os resultados. Além disso, foi levantado como melhoria futura, a instalação de amostradores automáticos na etapa, a fim garantir maior confiabilidade na coleta das amostras.

Análises de informações analíticas obtidas no processamento de material proveniente de uma mesma pilha de homogeneização e em condições de estabilidade operacional mostraram que o desvio padrão dos resultados em cada turma, antes e depois dos treinamentos e padronização dos procedimentos de amostragem, mostraram-se, em média, 25,40% menores (Figura 5a), indicando a redução da variabilidade na amostragem. A quantificação dos teores médios de P_2O_5 no rejeito da SMAI antes e depois das devidas padronizações, em cada turma (Figura 5b), expôs uma redução média de 12,78% nos teores de P_2O_5 e uma maior estabilidade dos valores, visto que o desvio padrão antes e depois da implantação das medidas foi de 1,38 e 1,15, respectivamente.

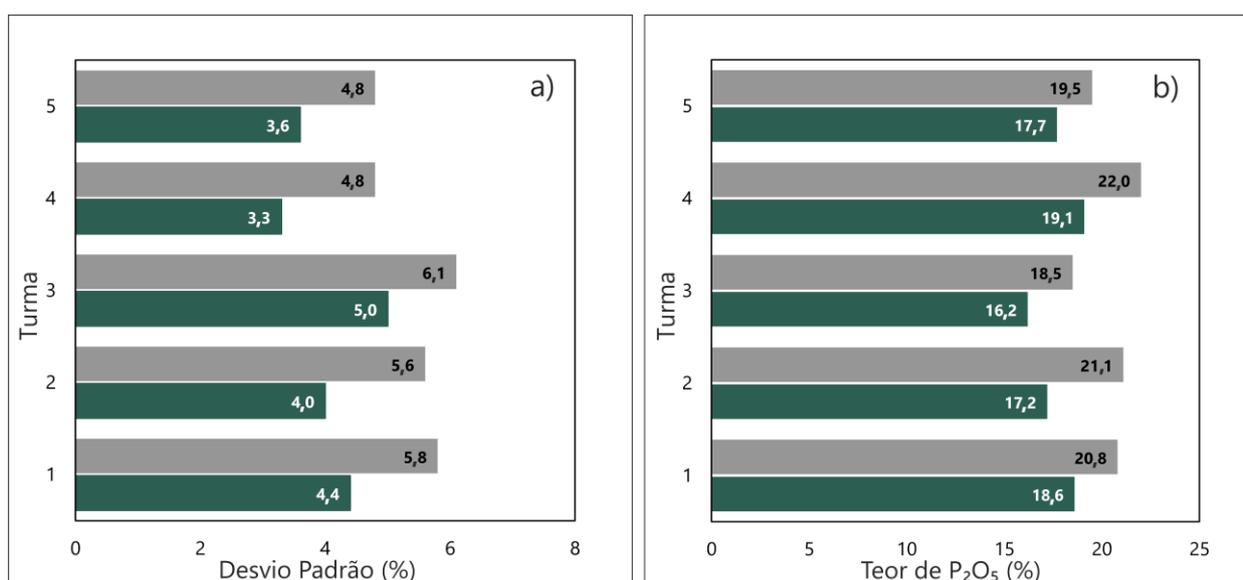


Figura 5: Cenários antes (em cinza) e depois (em verde) da padronização dos procedimentos de amostragem - a) desvio padrão dos resultados de amostragem; b) teor de P_2O_5 nos resultados.

Conforme o levantamento das possíveis causas raízes, foi constatado que parte das perdas de recuperação metalúrgica ocorriam em virtude da ineficiência do sistema de *sprays* de lavagem, nos quais a vazão e a pressão estariam abaixo do especificado pelo fabricante. Neste sentido, conforme a necessidade dos equipamentos, foram feitas trocas de bicos de saída de água e válvulas, revitalização de proteções de poliuretano e instalações de manômetros em válvulas e de *spray* de lavagem inferior.

O vazamento de polpa na alimentação dos carrosséis (causa X3), por se tratar de um item complexo, foi mais profundamente estudado por meio de um *brainstorming*, seguida a organização dos resultados em um diagrama de Ishikawa, resultando em 5 possíveis causas raízes, todas

vinculadas ao grupo “Máquina”: (i) Caixa de alimentação desgastada; (ii) acoplamentos dos mangotes danificados; (iii) ausência de borracha no anel do carrossel; (iv) mangotes de alimentação mal dimensionados; e (v) distribuidor de polpa ineficiente.

Diante das causas levantadas, foi formulado um plano de ação para a atuação nas mesmas, o qual compreendeu: (i) Reparo nas caixas de alimentação desgastadas dos SMAIs e compra de novas para controle de estoque; (ii) compra de borracha de vedação dos anéis dos carrosséis; (iii) substituição dos acoplamentos danificados; e (iv) retirada dos mangotes mal dimensionados. A partir das ações efetuadas, foram resolvidos os vazamentos existentes na alimentação da SMAI, proporcionando, também, um ambiente mais limpo e organizado.

4.5 Etapa *Control*

Os dados coletados nesta etapa foram submetidos às mesmas análises efetuadas na etapa *Measure* com o propósito de mensurar as alterações realizadas no processo. Com o mesmo fim, comparativos também foram realizados através das cartas de controle das variáveis Y1 (recuperação metalúrgica na SMAI) e Y2 (teor de P_2O_5 no rejeito da SMAI) antes e depois das alterações feitas no processo.

Confrontando-se os dados coletados sobre a recuperação metalúrgica antes e depois do projeto (Figura 6), observa-se as seguintes melhorias após o projeto: (i) aumento de 9,66% no valor médio da recuperação metalúrgica (96,29%), o qual ficou 1,75% maior que a meta estabelecida na etapa *Define* (94,63%), e; (ii) redução de 63,71% no índice DPMO, de tal maneira que o índice, de 787.055,55 PPM antes do projeto, foi alterado para 285.622,24 PPM após a medidas tomadas.

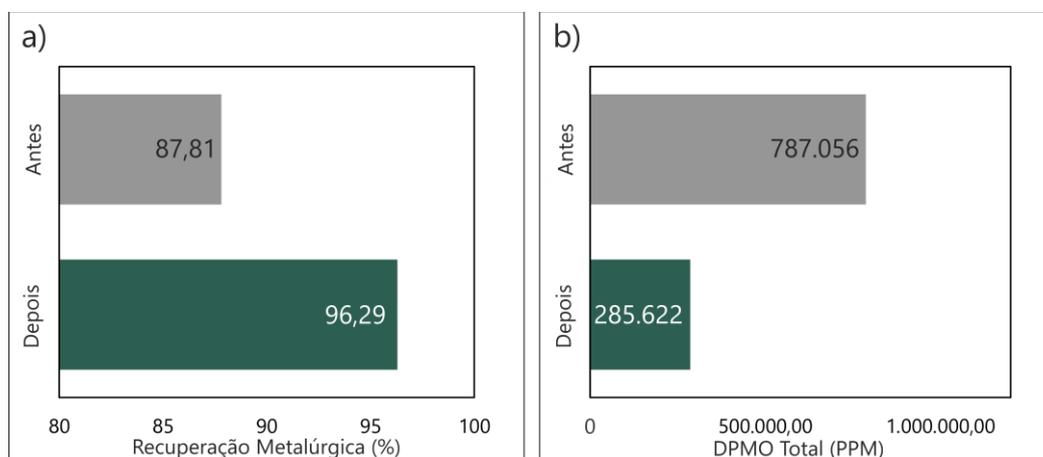


Figura 6: Cenários antes e depois das melhorias – a) Média da Recuperação Metalúrgica (%); b) DPMO Total (PPM).

A análise estatística da distribuição da recuperação metalúrgica antes e depois da implantação das melhorias (Figura 7), considerando-se um Intervalo de Confiança (IC) de 95% para média, mostrou que a recuperação metalúrgica antes do projeto se encontrava no intervalo entre 87,34% e 89,31%, abaixo da meta (94,63%). Após a implantação das medidas de melhoria, o intervalo ficou entre 94,67% e 97,92%, acima da meta estipulada na etapa *Define*. Além disso, houve uma redução de 65,66% no desvio padrão da distribuição da recuperação metalúrgica, cujo valor, de 8,562 antes, foi alterado para 2,940 após, sinalizando uma redução da variabilidade do processo.

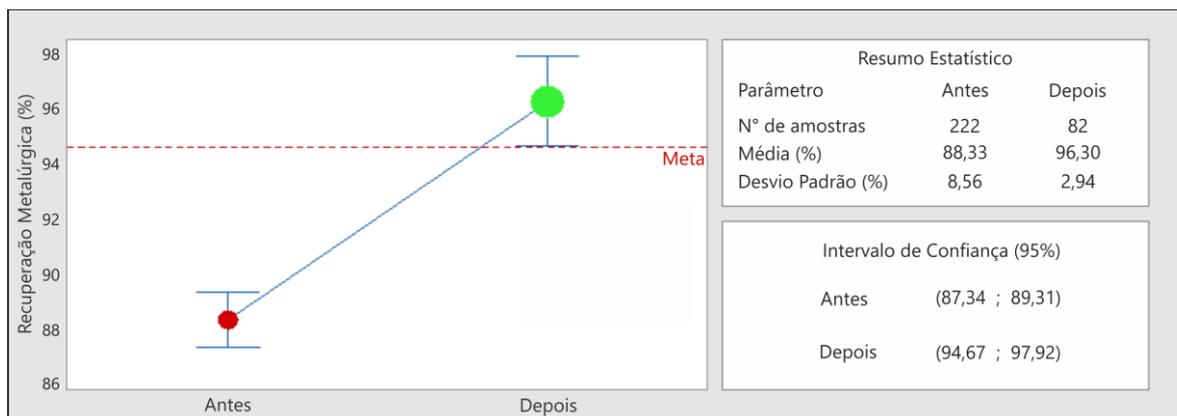


Figura 7: Parâmetros estatísticos da Recuperação Metalúrgica antes e depois das melhorias implantadas.

Os dados obtidos sobre o teor de P₂O₅ no rejeito da SMAI depois das melhorias especificadas foram comparados com os dados antes da implantação do projeto. Conforme mostra a Figura 8, as seguintes melhorias podem ser observadas: (i) redução do teor médio de P₂O₅ no rejeito de 23,73% para 18,93%, o que representa uma queda de 20,23% no teor médio de P₂O₅, e; (ii) redução de 46,55% no índice DPMO, o qual se deslocou de 824.725,84 PPM para 440.843,88 PPM.

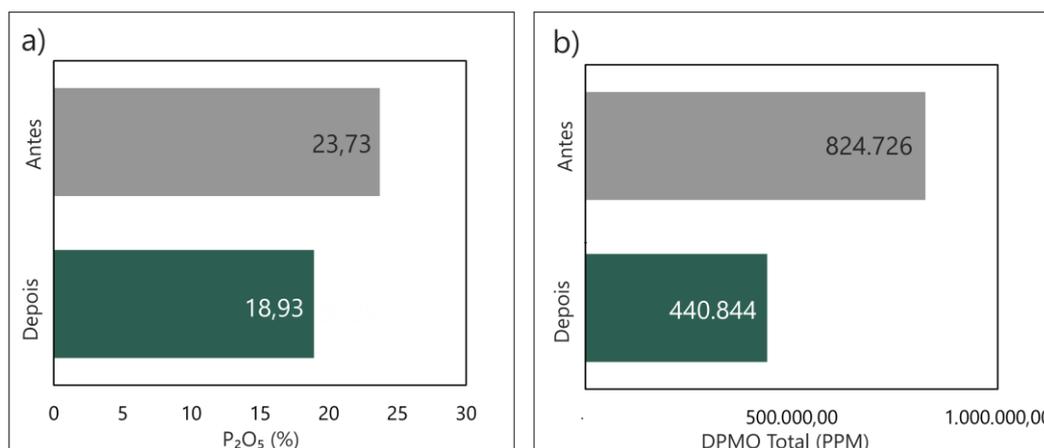


Figura 8: Cenários antes e depois das melhorias – a) Média do teor de P₂O₅ no Rejeito (%); b) DPMO Total (PPM).

A distribuição estatística do teor de P₂O₅ no rejeito da SMAI, antes e depois das melhorias aplicadas (Figura 9), considerando-se um Intervalo de Confiança de 95% para a média, mostra que o teor de P₂O₅ antes do projeto estava no intervalo entre 23,20% e 24,31%, de tal maneira que todo o intervalo se encontrava acima da meta estabelecida (19,41%). Os dados coletados após as melhorias mostram um deslocamento do intervalo para valores situados entre 17,99% e 19,86%, com o teor médio de 18,93%, o qual é 2,47% menor que a meta estabelecida. O limite superior ainda se encontra 2,32% maior que a meta estabelecida (19,41%), de tal maneira outras medidas podem reduzir o mesmo ao ponto de se tornar menor que a meta, aumentando a eficiência operacional da etapa. Além disso, houve também uma redução de 30,03% no desvio padrão da variável comparando-se o valor anterior ao projeto (4,63%) e posterior (3,24%), o que se traduz em redução da variabilidade de mesma magnitude.

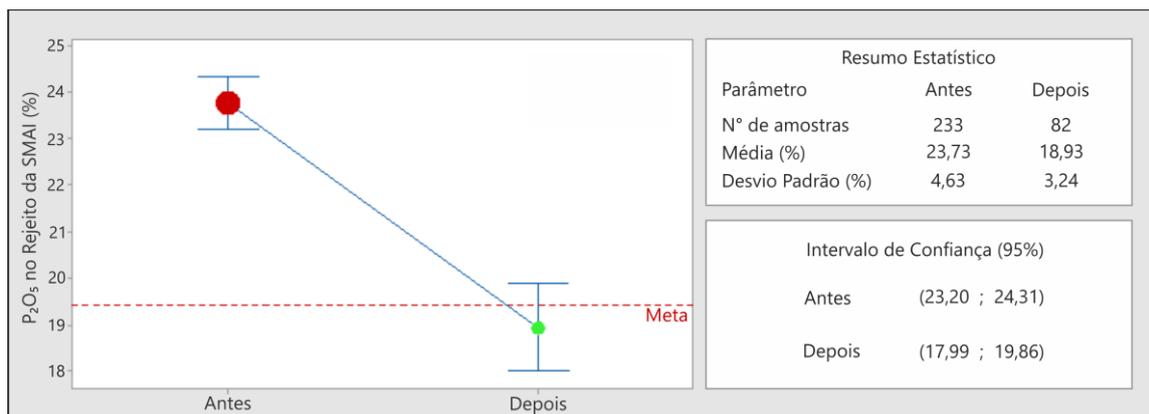


Figura 9: Parâmetros estatísticos do teor de P₂O₅ no rejeito antes e depois das melhorias implantadas.

As cartas de controle da recuperação metalúrgica (Figura 10) e do teor de P₂O₅ no rejeito da SMAI (Figura 11) mostram que houve uma redução geral da variabilidade do processo em relação à situação anterior ao projeto. Entretanto, ainda há presença de causas especiais, conforme pode ser notado pelos marcadores em quadrado vermelho, os quais se encontram fora dos limites inferior e superior de controle. A manutenção do nível de qualidade obtido com as alterações realizadas e a atuação em outras possíveis causas pode reduzir ainda mais a variabilidade e alcançar outro padrão com ausência de causas especiais.

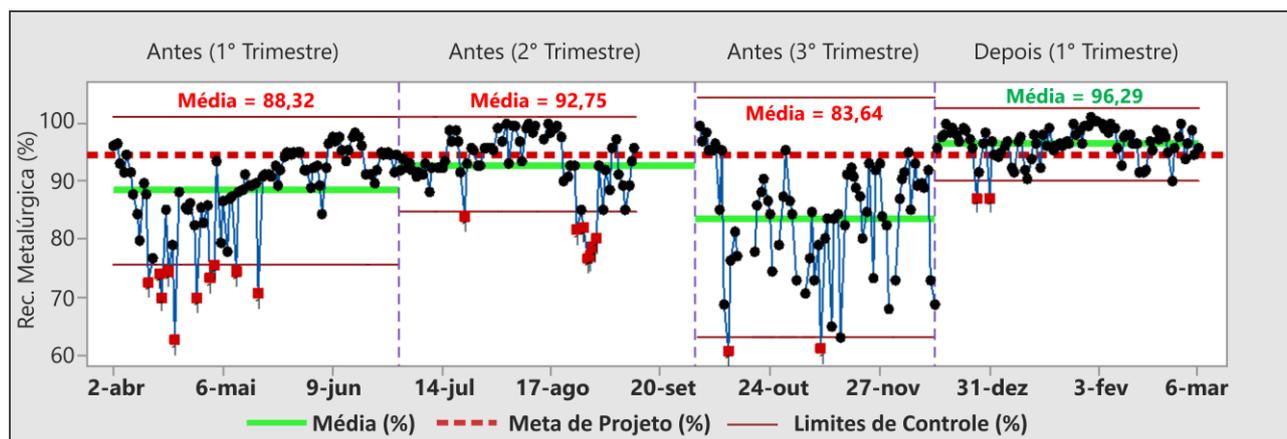


Figura 10: Carta de controle da recuperação metalúrgica (%) antes e depois da implantação das melhorias.

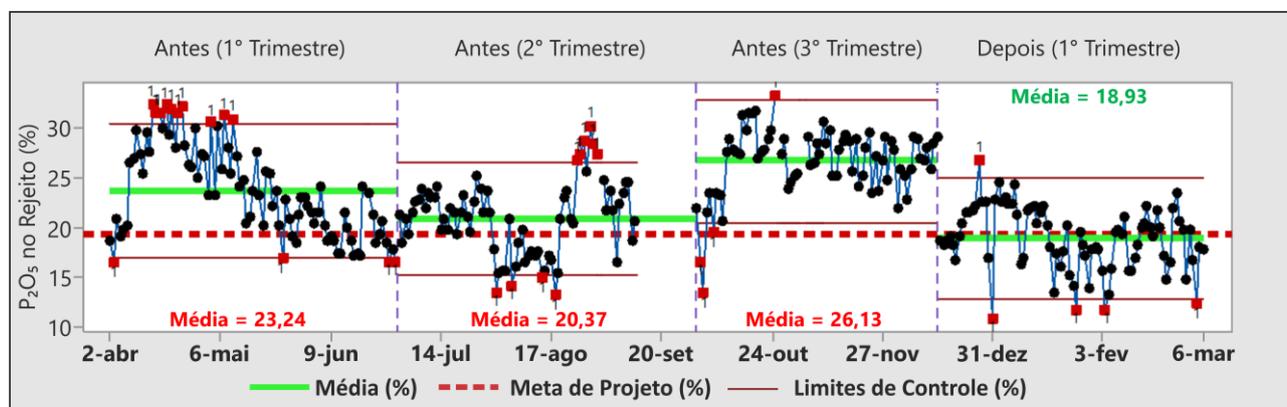


Figura 11: Carta de controle do teor de P₂O₅ no rejeito (%) antes e depois da implantação das melhorias.

O monitoramento da produção e dos custos operacionais mostrou um reflexo das medidas realizadas sobre estes indicadores, de tal maneira que houve um aumento de 7,42% na produção de concentrado convencional e redução de 6,91% no custo operacional.

Após a implantação das melhorias no processo, foram estabelecidas ações para a manutenção das mesmas no longo prazo. Essas envolveram: (i) criação de relatório para o Gerenciamento da Rotina Diária (GRD), o qual é enviado diariamente para os gestores da área com as informações atualizadas sobre os indicadores Y's e X's levantados no projeto; (ii) realização de reuniões diárias sobre o GRD com toda a equipe responsável, e; (iii) criação de um plano de controle para o teor de P_2O_5 no rejeito na SMAI, de tal maneira a especificar e padronizar ações a serem realizadas em caso de alteração do valor desta variável em relação ao especificado.

5 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que a implantação da metodologia LSS contribuiu para a melhoria da eficiência operacional do processo e redução da variabilidade no mesmo, o que pode ser observado por meio dos seguintes dados: (i) aumento do valor médio da recuperação metalúrgica, de 87,81% para 96,29%, o qual foi 1,75% maior que a meta estabelecida pelo projeto (94,63%); (ii) redução do teor médio de P_2O_5 no rejeito, de 23,73% para 18,93%; e (iii) redução na variabilidade da recuperação metalúrgica e do teor de P_2O_5 no rejeito, cujos desvios padrões foram reduzidos, respectivamente, em 65,66% e 30,33%.

O monitoramento da produção e dos custos operacionais também mostrou que houve um aumento de 7,42% na produção de concentrado e uma redução de 6,91% no custo operacional, o que demonstra a eficácia da metodologia para a melhoria de processos.

Os resultados mostraram que apesar dos ganhos de eficiência observados, o sistema ainda está sujeito à presença de causas especiais, as quais necessitam ser tratadas oportunamente. Neste sentido, as melhorias já obtidas devem ser mantidas por um sistema de padronização das atividades e rotinas, o que garante que o sistema não voltará ao seu estágio inicial, o que permite também a contínua melhoria da etapa por meio da ação sobre problemas não tratados na ocasião deste trabalho, os quais não possuíam um nível de importância suficiente para tal e/ou demandavam maiores intervenções no processo. Inevitavelmente, ações sobre as causas-raiz de tais problemas elevarão ainda mais o patamar de eficiência operacional na etapa, resultando na eliminação de causas especiais.

6 REFERÊNCIAS

- Carvalho, M. M., & Rotondaro, R. G. (2012). Modelo Seis Sigma. In M. M. Carvalho & E. P. Paladini (Coords.), *Gestão da Qualidade: Teoria e Casos* (2nd ed., pp. 129–154). Elsevier.
- Cherrafi, A., Elfezazi, S., Chiarini, A., Mokhlis, A., & Benhida, K. (2016). The integration of lean manufacturing, Six Sigma and sustainability: A literature review and future research directions for developing a specific model. *Journal of Cleaner Production*, 139, 828–846. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.101>



- Indrawati, S., & Ridwansyah, M. (2015). Manufacturing Continuous Improvement Using Lean Six Sigma: An Iron Ores Industry Case Application. *Procedia Manufacturing*, 4, 528–534. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.11.072>
- Iyer, P. V. (2011). Magnetic and Eletrostatic Separation. In P. Darling (Ed.), *SME Mining Engineering Handbook* (3rd ed., pp. 1533–1545). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Lobo, R. N., & Silva, D. L. (2014). *Gestão da qualidade: Diretrizes, ferramentas, métodos e normatização*. Editora Érica.
- Moore, R. (2007). *Selecting the Right Manufacturing Improvement Tools: What Tool? When?*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7916-9.X5000-0>
- Pires, J. P. F., Pereira, P. E. C., Silva, G. G., Diniz-Pinto, H. S., & Araújo, R. P. (2018). *Aplicação do Lean Seis Sigma para a melhoria do Sistema de Gestão Integrado (SGI) de uma empresa de mineração*. II Simpósio de Engenharia de Produção, Catalão, Brasil.
- Possarle, R. (2014). *Ferramentas da Qualidade*. SENAI-SP Editora.
- Rodrigues, M. V. (2014). *Ações para a qualidade: gestão estratégica e integrada para a melhoria dos processos na busca da qualidade e competitividade* (5th ed.). Elsevier.
- Runge, I. C. (1998). *Mining Economics and Strategy*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Sampaio, J. A., Luz, A. B. da, & França, S. C. A. (2010). Separação Magnética e Eletrostática. In A. B. da Luz, J. A. Sampaio, & S. C. A. França (Eds.), *Tratamento de Minérios* (5th ed., pp. 365–395). CETEM/MCT.
- Sokovic, M., Pavletic, D., & Kern Pipan, K. (2010). Quality Improvement Methodologies – PDCA Cycle, RADAR Matrix, DMAIC and DFSS. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 43(1), 476–483.
- Taghizadegan, S. (2006). *Essentials of Lean Six Sigma*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370502-0.X5000-0>
- Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). *Will's Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.

COMO CITAR ESTE ARTIGO:

Guimarães, M. T. G., Pereira, P. E. C., Silva, Diniz-Pinto, G. G., H. S., Araújo, R. de P. (2021). Aplicação do Lean seis sigma para melhoria da etapa de separação magnética de alta intensidade em uma empresa de mineração. *Holos*. 37(5), 1-15.

SOBRE OS AUTORES

M. T. G. GUIMARÃES

Engenheiro de Minas pela Universidade Federal de Goiás (UFG); Head de Marketing na Movement. E-mail:



marcuuw@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2832-5619>

P. E. C. PEREIRA

Engenheiro de Minas e Mestre em Modelagem e Otimização pela Universidade Federal de Goiás (UFG); Professor na Universidade Federal de Catalão (UFCAT). E-mail: paulo_elias_carneiro@ufcat.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6068-4692>

G. G. SILVA

Engenheiro de Minas, Especialista em Lavra e Geotecnia de Minas e Mestre em Modelagem e Otimização pela Universidade Federal de Goiás (UFG); Discente do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia no Departamento de Engenharia Civil e Ambiental na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB); Professor na Universidade Federal de Catalão (UFCAT). E-mail: gabriel_gomes@ufcat.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2159-7590>

H. S. DINIZ-PINTO

Engenheiro de Minas e Especialista em Geomologia pela Universidade Federal de Ouro Preto; Doutor em Mineralogia Aplicada e Caracterização Mineral pela Universidade Johannes Gutenberg, Mainz, Alemanha; Pós-doutoramento em Cristalografia e Análise Rietveld pela Universidade de Bremen, na Alemanha; Pós-doutoramento em Mineralogia/Óxidos Especiais de Carbonatitos pela Universidade de Brasília (UnB); Professor na Universidade Federal de Catalão (UFCAT). E-mail: henriquesenna@ufcat.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7759-456X>

R. DE P. ARAÚJO

Engenheiro de Minas e Especialista em Tratamento de Minérios pela Universidade Federal de Goiás (UFG); Professor na Universidade Federal de Catalão (UFCAT). E-mail: renatopaula@ufcat.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5727-1659>

Editor(a) Responsável: Francinaide de Lima Silva Nascimento

Pareceristas *Ad Hoc*: HENRIQUE TURRER E DIEGO PACHECO

