

APLICAÇÃO DE DMAIC SEIS SIGMA NA MELHORIA DE DESEMPENHO DE MALHAS DE CONTROLE EM UMA PLANTA DE PROCESSAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO*

Lucas Andery Reis¹

Adrielle de Carvalho Santana²

Thiago Antonio Melo Euzébio³

Resumo

Em uma usina de processamento mineral podem existir dezenas de controladores que alteram automaticamente variáveis como taxa de minério, vazão de polpa, nível de caixa, quantidade de insumos, etc. Esses controladores existem para manter o processo em seu estado mais produtivo com o mínimo de ação humana. Para que este sistema de controladores funcione adequadamente, é preciso que estes sejam avaliados e sintonizados periodicamente. Devido à grande quantidade de controladores, diversos métodos de avaliação e inúmeras técnicas de sintonia, a tarefa pode se tornar extremamente complexa, confusa e longa. Por esta razão, nesse trabalho é proposta a aplicação da abordagem Seis Sigma DMAIC para gerenciar de forma eficiente e concisa as atividades de avaliação e sintonia de controladores industriais. A aplicação foi realizada na SAMARCO Mineração S.A. em Mariana/MG e os resultados comprovam a importância da abordagem proposta.

Palavras-chave: Minério de Ferro; Lean Seis Sigma; Gerenciamento de Malhas de Controle; DMAIC.

APPLICATION OF SIX-SIGMA DMAIC TO IMPROVE CONTROL LOOPS PERFORMANCE IN AN IRON ORE PROCESSING PLANT

Abstract

In a mineral processing plant there are dozens of controllers that automatically changes some process variables as ore feed rate, ore flow, tanks level, flotation reagent, etc. These controllers are applied to maintain the plant in the most productive state with minimum human interference. It is necessary a continually assessment and tuning of these controllers to maintain them running well. Due to the huge amount of controllers, many assessment methods and uncountable number of tuning methods, the activity might become complex, confused and time consuming. For this reason, in this work it is proposed the Six-Sigma DMAIC approach application in order to organize and manage in an effective way the activities related to industrial controller assessment and tuning. This work was performed in the mining company SAMARCO S.A. at Mariana/MG and the results shows the importance of the proposed approach.

Keywords: Iron Ore; Lean Six Sigma; Control Loops Management; DMAIC.

1 Engenheiro de Controle e Automação, Graduado, Mestrando no Instituto Tecnológico Vale - ITV e Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil.

2 Engenheira de Controle e Automação, Mestre em Engenharia da Informação, Professora da Universidade Federal de Ouro Preto - Minas Gerais - Brasil.

3 Engenheiro Eletricista, Doutor em Engenharia Elétrica, Pesquisador do Instituto Tecnológico Vale – ITV, Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil.

1 INTRODUÇÃO

No atual mercado competitivo, as empresas são obrigadas a melhorar continuamente a produtividade de suas plantas industriais. Uma das áreas tecnológicas fundamentais para se aumentar a rentabilidade das unidades é a de controle, automação e otimização de processos. Diversos são os ganhos da aplicação desta tecnologia nos processos industriais: aumento do nível da qualidade de produtos, aumento da confiabilidade dos sistemas, aumento de segurança e liberação do operador de uma série de atividades manuais e repetitivas.

O termo controle de processos costuma ser utilizado para se referir a sistemas que têm por objetivo manter certas variáveis de uma planta industrial entre os seus limites operacionais desejáveis. No caso da mineração, pode-se citar como variáveis controladas a taxa de minério em uma correia transportadora, o nível de polpa em um tanque, o percentual de sólidos em um moinho, a quantidade de um insumo em um processo de flotação, entre outros.

O controle de processos pode ser feito em malha aberta ou em malha fechada. Quando o sistema está em malha aberta, é necessária constantemente a intervenção humana para obter o valor de variável de processo desejada. Quando o sistema está em malha fechada, surge a figura do controlador, que compara o valor desejado com o valor medido e se houver algum desvio entre estes valores, manipula algum atuador industrial de forma a eliminar esse desvio ou erro. A variável manipulada pelo controlador pode ser a abertura de uma válvula, a rotação de uma bomba, a rotação de um compressor, etc.

O principal controlador utilizado na indústria de mineração é o Proporcional-Integral-Derivativo (PID). A simplicidade de implementação e robustez são os mais importantes atributos do controlador PID. Para que as malhas de controle funcionem de forma adequada, é preciso que o controlador PID que a compõe seja sintonizado apropriadamente e passe por avaliação rotineira. Controladores PID bem sintonizados proporcionam benefícios diversos ao processo, tais como: aumento de produção, aprimoramento da estabilidade do processo, melhor uso de matéria prima e redução de manutenção de equipamentos.

O desempenho das malhas de controle pode ser avaliado por diversas métricas existentes. O tempo em que o controlador encontra-se em malha aberta, por exemplo, é um indicador útil para verificar o período em que o operador optou por controlar manualmente o processo por considerar a ação de controle inapropriada. Outro indicador é o período de tempo em que a malha de controle esteve com a

variável manipulada no máximo ou no mínimo, ou seja, saturada. Quando a malha de controle encontra-se em operação normal, pode-se aplicar os índices desenvolvidos em [1-3] para avaliar o seu desempenho, cujo índice mais utilizado na indústria é o de Harris [1].

Uma vez definidas quais são as malhas que necessitam ser melhoradas em desempenho ou robustez, passa-se à etapa de sintonia dos controladores. Nessa etapa são calculados os melhores parâmetros do controlador PID para que este compute as melhores ações de controle na planta. Alguns métodos são bem

consolidados na literatura, tais como o de Ziegler Nichols [4], Coen-Coon [5], IMC [6] e o SIMC [7]. Uma compilação de diversos métodos de sintonia está organizada em [8].

Em uma indústria de processamento mineral, a depender da complexidade da usina, podem existir dezenas a centenas de malhas de controle PID. Dada a abrangência e complexidade de avaliar e sintonizar essas diversas malhas, é proposto neste trabalho uma maneira de organizar essas atividades com o uso de Seis Sigma. Seis Sigma foi criado em 1986 por Bill Smith e Mikel Harry quando trabalhavam na Motorola [9]. Sua utilização permite aumento de produtividade e redução de custos de manufatura e serviços. A abordagem mais utilizada de Seis Sigma para melhoria de qualidade é a *Define-Measure-Analyze-Improve-Control* (DMAIC), que utiliza gráficos de controle, experimentos pré-determinados, análise de capacidade do processo e diversas ferramentas estatísticas.

Neste trabalho é descrita a aplicação da abordagem DMAIC nas tarefas de avaliação de malhas de controle e de sintonia de controladores PID em uma indústria de mineração. Essa atividade foi realizada na empresa SAMARCO S.A. em Mariana no estado de Minas Gerais. Ao todo, uma quantidade de 22 malhas de controle foram analisadas e aprimoradas.

2 SEIS SIGMA DMAIC

A metodologia *Lean Seis Sigma* é resultante da integração entre o Seis Sigma e o *Lean Manufacturing*, por meio da união dos principais pontos de cada programa. O *Lean Manufacturing* surge a partir de um sistema de produção iniciado por Toyota Taiichi Ohno, na década de 50, que visa identificar e eliminar desperdícios, com o objetivo de aumentar a qualidade e a velocidade de produção e reduzir custos.

O Seis Sigma foi desenvolvido inicialmente na Motorola na década de 80 com o objetivo de prepará-la para enfrentar sua concorrência que possuía produtos de alta qualidade com preços baixos, tornando o programa reconhecido pelo sucesso na organização [9]. A popularização da metodologia Seis Sigma ocorreu na década de 90 pela empresa General Electric que tinha como objetivo reduzir as causas de variação que prejudicavam o nível de qualidade do processo [10].

Com foco no alcance das metas estratégicas da empresa, o Seis Sigma utiliza de ferramentas e métodos, como o DMAIC, que é um modelo para melhoria de produtos e processos existentes. Este modelo é constituído de cinco fases que norteiam o estudo e o desenvolvimento das soluções para melhoria no processo ou

produto. Essas fases são: *Define* (Definição - D), *Measure* (Medição - M), *Analyze* (Análise - A), *Improve* (Melhoria - I) e *Control* (Controle - C).

Aliado ao modelo DMAIC, ferramentas do *Lean Manufacturing* são inseridas com o objetivo de identificar soluções imediatas com utilização de técnicas simples para análise dos dados, enfatizar a maximização da velocidade dos processos e buscar a redução do *lead time* e do trabalho em processo [9]. Os itens a seguir descrevem, em linhas gerais, no que consiste cada fase do modelo DMAIC evidenciando as ferramentas de cada fase que foram utilizadas neste estudo.

2.1 Fase Definir

A primeira etapa do modelo DMAIC consiste da identificação do problema, onde na seleção do projeto, a liderança identifica uma área de oportunidade de melhoria ou criação de um processo. São levantadas todas as variáveis suspeitas de influenciarem no problema. Também nessa fase, estabelece-se uma meta, forma-se a equipe, analisa-se os riscos envolvidos, delimita-se o trabalho por meio de um escopo e, por fim, se constrói um cronograma macro das entregas das fases. As ferramentas utilizadas nessa fase foram:

- **Voz do Cliente (VOC):** Possibilita ouvir as necessidades e expectativas do cliente para serem características críticas do processo. A voz do cliente possibilita decidir qual produto e serviço oferecer, identificar aspectos e especificações para o produto e as características chaves para a satisfação do cliente.
- **SIPOC:** Mapeia o processo a ser estudado. A sigla SIPOC significa *supplier* (fornecedores), *inputs* (entradas), *process* (processo), *outputs* (saídas) e *customer* (clientes). Com a utilização correta da ferramenta é possível identificar a justificativa da existência do processo, o que ele faz, quem utiliza o seu produto, quem são seus fornecedores, de onde vem as informações ou os materiais e o que acontece com cada entrada.

2.2 Fase Medir

Nesta etapa é estabelecida uma referência de medição, de modo que seja possível medir o desempenho atual do processo. São identificadas as restrições do processo como área de foco para um melhoramento futuro. A ferramenta utilizada nessa fase foi a estratificação.

- **Estratificação:** É uma técnica que tem como objetivo agrupar dados em subgrupos de acordo com alguns critérios adotados. É utilizada para identificar possíveis causas que afetam determinada etapa do processo. Por meio do agrupamento dos dados é possível identificar, estatisticamente, qual grupo está com o pior desempenho. Assim, é possível aprofundar o estudo em determinado grupo para gerar ações específicas e possibilitar o alcance da meta específica ou geral do projeto.

2.3 Fase Analisar

Nesta etapa são identificadas algumas relações críticas de causa e efeito que explicam a maioria das relações entre as variáveis de entrada e saída do processo. Assim, são estabelecidas as causas fundamentais que influenciam o problema por meio da priorização das causas potenciais identificadas. As ferramentas utilizadas nessa fase foram:

- **Matriz de Causa Efeito:** A Matriz de Causa e Efeito é uma ferramenta que relaciona dois conjuntos de dados e define a força de relacionamento entre

eles. Permite a priorização das variáveis de entrada do processo por importância, resultando nas variáveis chave. Esta priorização é realizada por meio de reunião da equipe e pode auxiliar na seleção do que é necessário monitorar para avaliar se existe relação de causa e efeito e se são necessários controles de entrada em processos chave. Os resultados do SIPOC e do mapeamento do processo auxiliam a elaboração da matriz.

- **Análise dos 5 Porquês:** Esta é uma ferramenta desenvolvida por Taiichi Ohno, pai do Sistema de Produção Toyota, que possibilita encontrar a causa raiz de um problema ou defeito após perguntar cinco vezes o porquê do problema está acontecendo, sempre relacionado à causa anterior. Não é obrigatório a utilização das cinco perguntas, pois este número vem de uma observação de Ohno de que seja o suficiente para encontrar a causa raiz.

2.4 Fase Aprimorar

Nesta etapa identifica-se as soluções que serão adotadas para a resolução dos problemas identificados a partir da fase “analisar”. As soluções alternativas são avaliadas com base na eficácia de cumprir o objetivo do projeto, de forma prática, e na aceitação do proprietário do processo. A ferramenta utilizada, foi a matriz RAB.

- **Matriz RAB:** A Matriz RAB é baseada nos fatores Rapidez, Autonomia, Benefício, sendo uma matriz de priorização de projetos ou ações para soluções de problemas. Esta ferramenta é utilizada na tomada de decisões.

2.5 Fase Controlar

Nesta etapa identifica-se o alcance da meta global do projeto e se estabelece ferramentas de monitoramento e repasse para os donos do processo. Além disso, para garantir que o processo esteja sob controle, são implementados controles para fornecer um retorno sobre o processo. Se necessário, são tomadas ações corretivas para colocar o processo novamente sob controle. A ferramenta utilizada foi o plano de monitoramento.

- **Plano de monitoramento:** É uma descrição resumida dos sistemas utilizados para minimizar a variação do processo, fornecendo um método estruturado para documentar e comunicar os métodos utilizados. Tem como objetivo documentar os métodos de controle atuais e sistemas de medição, sendo que este deve ser atualizado quando sistemas de medição e métodos de controle forem aprimorados.

3 APLICAÇÃO DE DMAIC SEIS SIGMA

O Lean Seis Sigma foi aplicado em uma planta de processamento de minério de ferro de uma empresa brasileira do ramo da mineração. O processo estudado é constituído pelos estágios de pré-moagem, moagem primária, classificação por hidrociclones e concentração por flotação. A planta é composta por treze malhas de controle de nível, sete de vazão e duas de pH e todas operam por meio de controladores PID. Esses controladores têm o objetivo de manter o valor da variável

de processo igual ao desejado, mesmo na presença de perturbações ou mudanças no ponto de operação.

A seguir serão discutidos os resultados da aplicação de cada fase do Lean Seis Sigma nessa planta de processamento de minério de ferro.

3.1 Fase Definir

A primeira atividade foi identificar os clientes e conhecer suas expectativas e necessidades. Os clientes deste trabalho são os profissionais responsáveis pela operação do concentrador. Então realizou-se uma entrevista com os principais clientes onde ouviu-se suas necessidades, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. VOC (voz do cliente)

VOC (Voz do Cliente)	Questões chave	Indicadores
Um processo mais estável	Reduzir a variabilidade do processo	Índice de Harris Percentual de Saturação
Um processo mais eficiente	Aumentar a eficiência do processo	Percentual de desempenho
Perda nas caixas da descarga dos moinhos	Reduzir as perdas de caixas	Percentual do tempo sem controle

Com o objetivo de mapear o processo a ser estudado utilizou-se a ferramenta SIPOC (*Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers*) obtendo-se o mapa de processo da malha de controle ilustrado na Figura 1.

O índice utilizado para mensurar o problema foi a “média diária da porcentagem de desempenho” de todas as malhas, o qual, em um período de cinco meses, foi de 31,89%. Foi estabelecido como objetivo uma média geral de 50% de desempenho. A nota de desempenho das malhas é gerada por um *software* de gestão, a partir das expressões mencionadas na Tabela 2. O cálculo é realizado pelo *software* a cada relatório gerado (a cada seis horas, nesse caso).

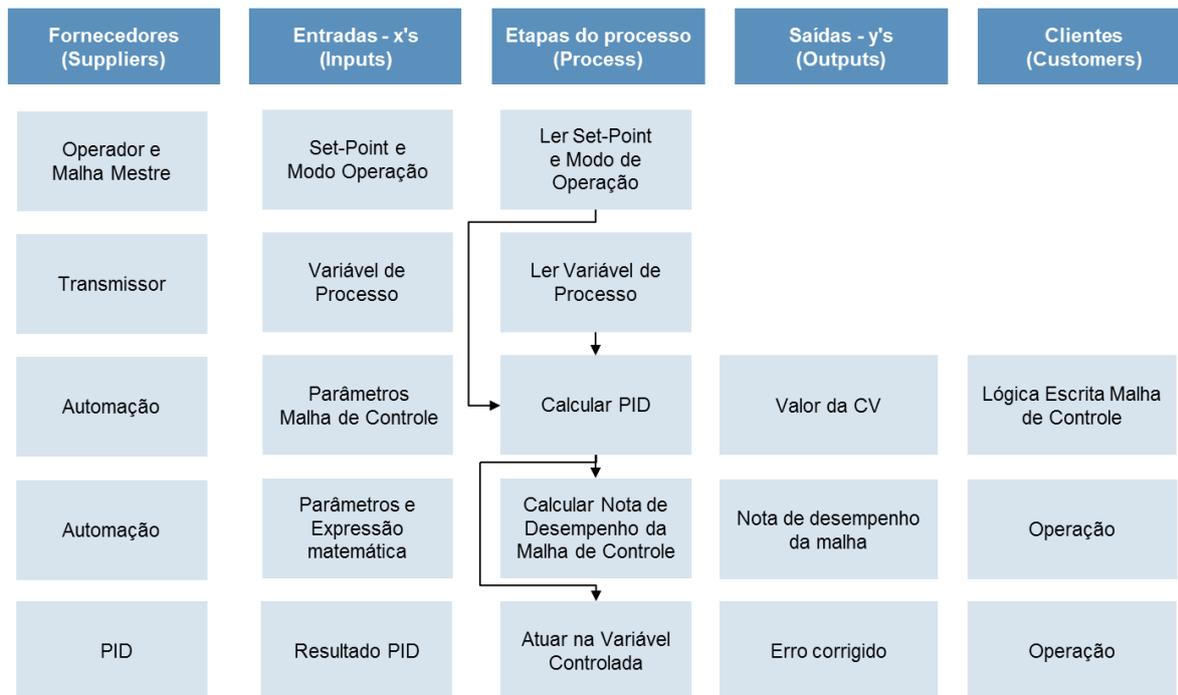


Figura 1. Mapa de processo da malha de controle.

Ao final da fase, estabeleceu-se um cronograma macro de entregas para o desenvolvimento do trabalho a fim de seguir o modelo DMAIC da metodologia *Lean Seis Sigma* para resolução do problema.

Tabela 2. Expressões para geração das notas de desempenho

Tipo de Malha	Expressão de Cálculo de Desempenho
Vazão	$\text{If} (\text{sppvrat} > 1, 1 / \text{sppvrat} * (100 - \text{manualpercent}) * (100 - \text{opsatpercent}) / 100, (100 - \text{manualpercent}) * (100 - \text{opsatpercent}) / 100)$
Nível	$\text{If} (\text{harris} > 0.4, (1 - \text{harris}^3) * (100 - \text{manualpercent}) * (100 - \text{opsatpercent}) / 100, (100 - \text{manualpercent}) * (100 - \text{opsatpercent}) / 100)$
pH	$\text{If} (\text{harris} > 0.4, (1 - \text{harris}^3) * (100 - \text{manualpercent}) * (100 - \text{opsatpercent}) / 100, (100 - \text{manualpercent}) * (100 - \text{opsatpercent}) / 100)$

Em que:

- manualpercent: porcentagem de tempo em modo manual.
- levelloops: cálculo da porcentagem do tempo em que uma determinada malha fica fora dos limites seguros de operação.
- opsatpercent: percentual do tempo em saturação.
- harris: cálculo do índice de Harris e da variância mínima de uma malha, além do cálculo da influência do ruído branco, tempo morto e ajuste do controlador sobre a variância total da variável de processo, utilizando um método que é uma adaptação da ideia por trás do índice de Harris.
- sppvrat: razão de custo do *set point* (SP) em relação a variável do processo (PV).

3.2 Fase Medir

O diagrama da Figura 2 ilustra a distribuição das malhas de controle para cada área do processo e resume os resultados obtidos nessa etapa após um estudo por estratificação. Os valores no diagrama representam diferença da máxima nota de desempenho possível e a atual, ou seja, o quanto de melhoria pode ainda ser obtida naquela área e naquele tipo de malha de controle em pontos percentuais.

Com o fechamento do estudo dessa fase, foi possível concluir que a maioria das malhas de controle estavam com baixo desempenho. Portanto, não foram estabelecidas metas específicas devido ao fato de que se entende (tecnicamente) que todas as malhas são passíveis de melhoria. Uma análise detalhada foi necessária para esse fim, o que será realizado na próxima etapa do trabalho. Assim, o problema foi tratado de forma sistêmica.

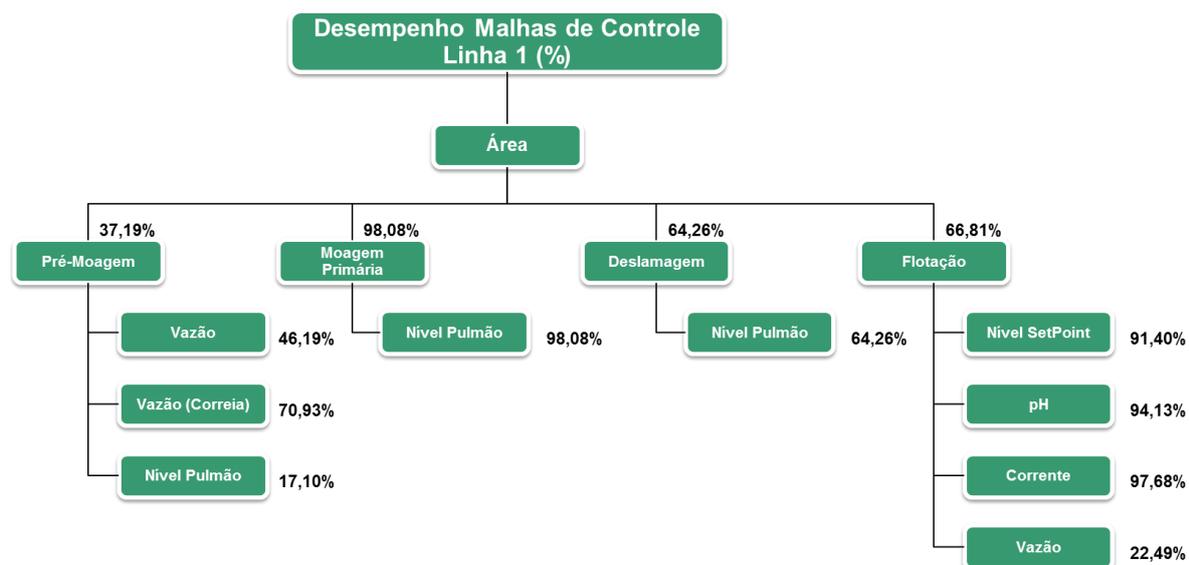


Figura 2. Resultado da estratificação por tipo de malha para cada área.

3.3 Fase Analisar

Para identificar o processo gerador do problema desenhou-se mapas de processo com as etapas de funcionamento e operação de todas as malhas envolvidas. O intuito do estudo o de foi aprofundar nas particularidades das malhas de controle com relação às variáveis de interferência e variáveis críticas, além de identificar os produtos de cada fase e produto final do processo.

A seguir, reuniram-se todas as informações levantadas e, a partir do *brainstorming* (tempestade de ideias) com a equipe, foram levantadas possíveis causas e identificadas as causas potenciais do baixo desempenho das malhas de controle. A partir disso foi feito o diagrama de causa e efeito, são apresentadas essas causas com suas classificações em PP (pouco provável), P (provável) e MP (muito provável).

Com o resultado da identificação das causas potenciais, por meio da análise dos 5 porquês, foram identificadas as causas raízes pela equipe para as variáveis: máquina, material, mão-de-obra, método e medidas.

Ao final da etapa analisar, obteve-se uma lista de causas fundamentais priorizadas (Tabela 3) que alimentam a etapa aprimorar para a construção do plano de ação.

Tabela 3. Priorização das causas fundamentais

Priorização das Causas	
1	Falta de materiais necessário para a mudança no processo
2	Priorização de outros serviços
3	Desconhecimento de todos os parâmetros necessário para a malha de controle
4	Falta de conhecimento do software de sintonia
5	Não utilização do software de auditoria para acompanhamento da malha
6	Falta de critério definido para operação das malhas de controle
7	Falta de sobressalente de equipamentos e componentes
8	Falta de Sintonia PID
9	Não utilização de automação para o método de calibração
10	Não disponibilidade das expressões no supervisório
11	Falta de um treinamento básico de malha de controle
12	Sistema de supervisão não disponibiliza a função para mostrar expressões das malhas
13	Equipe Instrumentação Reduzida para Efetivação do Plano de Manutenção

3.4 Fase Aprimorar

A primeira atividade realizada nessa etapa foi a elaboração do plano de ação. Para isso, foi realizado um *brainstorming* com a equipe para identificar ideias de soluções para eliminar as causas fundamentais. Com a lista de possíveis soluções, foi realizada a priorização das ações, por meio da matriz RAB (rapidez, autonomia e benefício), para a geração do plano de ação.

Uma das ações foi a manutenção preventiva dos instrumentos e válvulas das áreas envolvidas no processo, na qual foi realizada a limpeza dos posicionadores e instrumentos, calibração das válvulas e validação e parametrização dos instrumentos. Em outra ação, para auxiliar a operação de todas as malhas de controle, foi disponibilizada em todas as telas de detalhes do PID, informação sobre o cálculo dos parâmetros do processo.

Depois de realizar todas as manutenções em campo, as malhas de controle foram avaliadas utilizando o *software* de gerenciamento de malhas de controle disponível. Foi percebida a possibilidade de melhoria no desempenho do controlador PID, se realizada uma nova sintonia. Essa foi realizada pela equipe de automação com o monitoramento da equipe de processo, utilizando um *software* específico para sintonia de controladores PID.

3.5 Fase Controlar

O objetivo desta fase é acompanhar o índice de desempenho das malhas de controle. De acordo com a Figura 3, é possível observar que, ao fim a fase aprimorar, o índice de desempenho já se encontra com o valor estabelecido como meta na fase definir (50%).

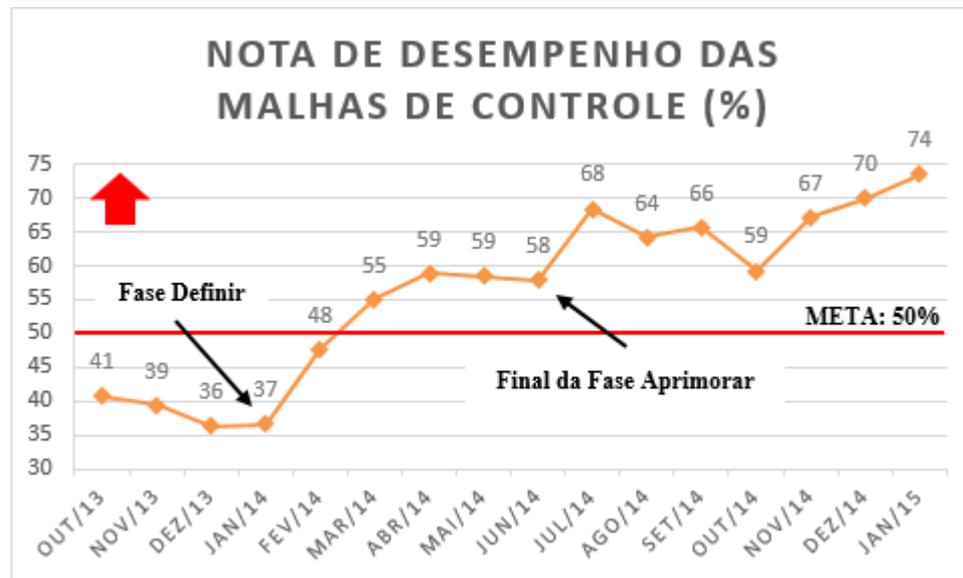


Figura 3. Monitoramento do índice de desempenho.

Um dos indicadores utilizados para mensurar o desempenho do controle regulatório é o percentual do tempo da operação das malhas em manual. Nesse estado, não existe nenhum controle da variável de processo, o que influencia negativamente na operação da planta. Durante o estudo foi realizado um trabalho junto à equipe de operação para aumentar o tempo de trabalho das malhas em automático o que influenciou diretamente na nota de desempenho. O percentual do tempo com controle pelo PID subiu de 54% no início do projeto para 83%.

Para as malhas de controle de nível, o indicador “percentual do tempo sem controle” traduz o percentual do tempo em que uma malha fica fora dos limites seguros de operação. Para os tanques estudados, o cálculo utiliza os limites superior de 90% e inferior de 30%. Verifica-se que houve uma redução deste tempo, reduzindo a perda de material nos tanques, ou seja, houve uma redução no tempo em que um tanque ficou em transbordo ou seco, de 33% para 7%.

A saturação indica o percentual do tempo, durante uma análise, em que a malha permaneceu em saturação. Malhas operando saturadas impactam diretamente no desempenho do controlador e nos demais índices. Os limites inferior e superior de saturação para uma válvula são de 10% e 90% respectivamente. Verificou-se uma redução do tempo em que a válvula fica totalmente aberta ou fechada. Assim pode-se concluir que com as manutenções realizadas nos posicionadores e com as sintonias das malhas, foi possível a redução deste indicador. O percentual do tempo da malha saturada caiu de 20% para 9%.

O índice de Harris indica o potencial de redução de variabilidade de uma malha. Índices de Harris baixos indicam pouco potencial de redução de variabilidade, enquanto índices próximos à unidade, indicam que há alto potencial de redução de variabilidade. No início do estudo a média geral do índice era aproximadamente 0,85. Com a finalização das implementações do plano de ação, o mesmo caiu para uma média de 0,75. O que corresponde numa redução de aproximadamente 12% da variabilidade das malhas de controle.

Ao final das análises dos resultados das melhorias realizadas, foi criado um plano de monitoramento com suas especificações de controle, ilustrado na Figura 4.

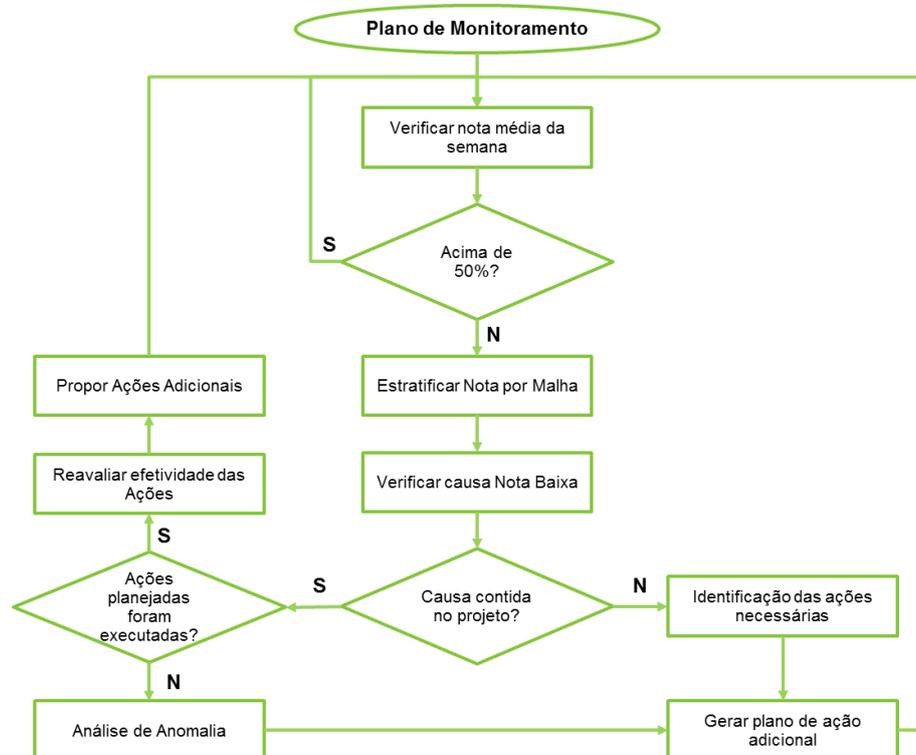


Figura 4. Esquemático do plano de monitoramento.

4 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi propor o uso de uma metodologia para o gerenciamento das malhas de controle de uma planta de beneficiamento de minério de ferro focando em melhorar seu desempenho. Para tal, foi utilizado o modelo DMAIC do programa Lean Seis Sigma em conjunto com *softwares* de gerenciamento de malhas de controle e sintonia de controladores PID disponíveis bem como o auxílio dos profissionais que trabalhavam diretamente com a planta.

As cinco etapas do modelo DMAIC foram aplicadas e como resultado, foi possível entregar todas as demandas dos clientes, informadas no início do projeto, na primeira etapa do modelo.

Com os resultados positivos obtidos é possível concluir que a integração do modelo adotado com um bom *software* de gestão de malhas de controle, foi efetivo na

redução da variabilidade das malhas, tornando possível ganhos qualitativos e quantitativos para o processo. Para ilustrar esses ganhos, pode-se citar a redução do tempo de trabalho da malha de controle em modo manual ou sem controle e a redução do índice de variabilidade de Harris. Além disso, pode-se mencionar a desativação de malhas não operacionais, melhorias na tela de operação da malha, aumento na robustez do sistema de controle do processo e melhora na operação dos atuadores.

Os resultados desse trabalho exemplificam os benefícios de se realizar o gerenciamento do controle regulatório de um processo produtivo além de mostrar uma forma de aplicá-lo em uma planta de beneficiamento de minério de ferro.

REFERÊNCIAS

- 1 Harris TJ, Seppala C, Desborough L. A review of performance monitoring and assessment techniques for univariate and multivariate control systems. *Journal of Process Control*. 1999; 9(1): 1–17.
- 2 Desborough L, Harris T. Performance assessment measures for univariate feedback control. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1992; 70(6): 1186–1197.
- 3 Stanfelj N, Marlin TE, MacGregor JF. Monitoring and diagnosing process control performance: the single-loop case. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1993; 32(2): 301–314.
- 4 Ziegler JG, Nichols NB. Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME*. 1942 Nov; 64(11).
- 5 Cohen G. Theoretical consideration of retarded control. *Trans. Asme*. 1953; 75: 827-34.
- 6 Rivera DE, Morari M, Skogestad S. Internal model control: PID controller design. *Industrial & engineering chemistry process design and development*. 1986 Jan; 25(1): 252-65.
- 7 Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of process control*. 2003 Jun 30; 13(4): 291-309.
- 8 O'Dwyer A. *Handbook of PI and PID controller tuning rules*. World Scientific; 2009 Jun 15.
- 9 Werkema C. *Lean seis sigma: Introdução às ferramentas do lean manufacturing*; 2012.
- 10 Watson GH. Cycles of learning: observations of Jack Welch. In: *Six Sigma Forum Magazine*. vol. 1. ASQ; 2001.