

APLICAÇÃO DO SEIS SIGMA EM PROJETOS DE CONFIABILIDADE

Marcelo de Paole Moreira Miranda, InSigma, marcelo.miranda@insigmaconsultoria.com.br
André Luís Siqueira, andre.siqueira@largoresources.com

Resumo: Este trabalho apresenta uma proposta de aplicação da metodologia Seis Sigma em projetos voltados para aumentar a confiabilidade de sistemas e equipamentos em uma empresa de mineração. Durante a execução de projetos de melhoria na área de manutenção, foi detectada a dificuldade, por parte dos Engenheiros de Manutenção, em aplicar alguns conceitos lecionados nos cursos tradicionais de Seis Sigma (SS). Os profissionais da área de manutenção necessitam aplicar ferramentas específicas de confiabilidade em seus projetos, pois a maioria dos indicadores não possui comportamento que se encaixa em distribuições normais. Constatou-se também que o tempo de execução de um projeto voltado à confiabilidade é diferente dos projetos SS empregados em outras áreas industriais. A metodologia e os prazos de execução dos projetos foram adaptados, garantindo assertividade no tratamento de problemas voltados ao baixo tempo médio entre falhas (MTBF).

Palavras-chave: Seis Sigma, MTBF, Confiabilidade e Disponibilidade.

1. Introdução

A gestão dos equipamentos e ativos, por muito tempo, foi vista com uma área secundária, tratada, em muitos casos, como uma área geradora de despesas e ausente de estratégias de gestão adequadas. O aumento da competitividade do mercado tem provocado mudanças de visão no nível estratégico, fazendo com que as empresas busquem estratégias para que os seus ativos atendam aos requisitos de produtividade e previsibilidade, vitais para o cumprimento das metas de uma Organização. Muitos autores, como Sellitto (2005), tratam as estratégias focadas em confiabilidade como um avanço relevante na gestão da manutenção industrial.

Dentro deste contexto, destaca-se a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC ou RCM – *Reliability Centered Maintenance*). Para Raposo (2004), o MCC é uma metodologia aplicada no planejamento de manutenção, que considera os conceitos de confiabilidade. Seu objetivo é garantir o nível de intensidade adequado de manutenção preventiva para que os equipamentos funcionem adequadamente. As correções e melhorias são baseadas no estudo das falhas e suas causas.

Sellitto (2005) define confiabilidade, com base na norma brasileira NBR 5462-1994, como sendo a probabilidade de um produto ou serviço operar adequadamente e sem falhas, sob as condições de projeto, durante um tempo especificado ou vida útil do projeto. As análises de confiabilidade se apoiam em ferramentas estatísticas que tratam dados de tempos de falha dos equipamentos. Os modelos de distribuições estatísticas são empregados para prever probabilidades de falha e a confiabilidade de um equipamento em um determinado tempo. São ferramentas vitais para estimar a quantidade de falhas, a disponibilidade de equipamentos e provisão dos custos de manutenção.

Outra metodologia empregada para melhorar processos é o Seis Sigma (SS), que atua na redução de defeitos e aumento de estabilidade dos processos. Segundo Miranda (2016), a medição de eficácia de um projeto SS repousa, muitas vezes, em conceitos estatísticos relacionados às distribuições normais. Domenech (2014) mostra que a redução de defeitos em um processo otimizado através do SS é medida por meio da quantidade de desvios padrões que estão dentro dos limites de especificação. Outra maneira de avaliar um projeto SS é medir o percentual de defeitos de um indicador, antes e depois de um projeto, através da medição do DPMO, denominado defeitos por milhão de oportunidades (Figura I).

O emprego do SS, aliado às ferramentas de confiabilidade, oferece excelentes subsídios para melhorar a estratégia de manutenção, baseando-se no diagnóstico do estágio de maturidade da planta. Segundo Miranda e Siqueira (2016), comumente o SS pode ser aplicado com três focos na área de manutenção: i) Redução de Custos; ii) Aumento de Produtividade da Equipe de Manutenção e, por último, iii) Aumento da Confiabilidade de equipamentos, componentes e sistemas.

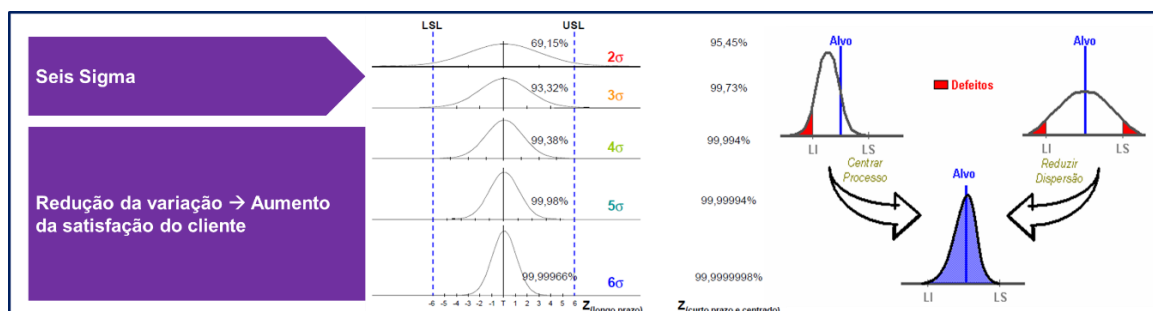


Figura I: Objetivos de um projeto Seis Sigma.

Miranda e Siqueira (2016) ainda acrescentam que a distribuição normal é a menos aplicada para estudos de confiabilidade, uma vez que sua extremidade esquerda se estende para o infinito negativo, causando modelagem incorreta de tempos de falha negativos. Isto faz com que algumas ferramentas de um curso tradicional de SS não sejam aplicadas à projetos de confiabilidade.

Este artigo apresenta uma proposta de execução de projetos SS utilizando ferramentas de confiabilidade, incluindo uma nova proposição de prazos para as etapas de análise, melhoria e controle. Um roteiro de implementação será apresentado baseado em um exemplo prático aplicado em uma empresa de mineração.

2. Conceitos de Confiabilidade e Estratégia de Manutenção

Marcorin e Abackerli (2001) enfatizam que os estudos de confiabilidade avançaram devido a crescente necessidade das empresas em identificar defeitos em produção e assim reduzir as falhas do produto, aumentando a sua qualidade. Mengue e Sellitto (2013) relatam diversos avanços que a confiabilidade tem proporcionado à área de manutenção das empresas, com o objetivo de evitar a interrupção do fluxo produtivo em um ambiente fabril.

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) define confiabilidade como: “Característica de um item eventualmente expressa pela probabilidade de que ela preencherá uma função dada, sob condições definidas e por um período de tempo definido”. Em outras palavras a NBR 5462/19943, item 2.2.6, descreve confiabilidade como: “Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições específicas, durante um dado intervalo de tempo”.

Segundo Sellitto (2005), as análises dos tempos de falha são baseadas em estimativas, ou seja, o valor exato da confiabilidade de um equipamento ou produto nunca será determinado. Os modelos empregados apresentam uma estimativa da taxa de falha do equipamento em função do tempo. Também podem ser usados para estimar a probabilidade de falha (ou sobrevivência) para uma dada idade, ou certo período, além de permitirem interpolações e algumas extrapolações. A confiabilidade possui oito funções estatísticas empregadas para estudar as falhas de um sistema (Figura II). São elas:

- 1 – Probabilidade de Falha $f(t)$: distribuição da frequência dos tempos de falhas no tempo “ t ”;
- 2 – Falhas Acumulativas $F(t)$: mostra a probabilidade de falha em algum tempo antes de “ t ”;
- 3 – Confiabilidade $R(t)$: probabilidade de um sistema ou equipamento não falhar antes de “ t ”;
- 4 – Taxa de Falha ou Risco $h(t)$: taxa de falha expressa como a razão de $f(t)$ para $R(t)$;

5 – Tempo Médio até a falha (MTTF): aplicado à sistemas não reparáveis, que não são passíveis de manutenção, ou seja, uma vez que apresentaram falha, não podem ter sua função reestabelecida, não havendo outro tipo de manutenção possível (*Reliasoft* 2014).

6 – Tempo Médio Entre Falhas (MTBF): aplicado para sistemas reparáveis. Estes sistemas são passíveis de manutenção, ou seja, uma vez detectada uma falha, sua condição operacional pode ser restaurada através de intervenções (*Reliasoft* 2014).

7 - Tempo Médio de Reparo (MTTR – *Mean Time To Repair*);

8 – Disponibilidade (D). Mengue e Sellito (2013), apresentam que a disponibilidade relaciona os tempos entre falhas (TBF) e o tempo de reparo (TTR) (Figura III). Projetos de aumento de disponibilidade podem ter dois focos: i) caso o problema seja a frequência de falhas, o foco será em aumentar o MTBF, isto significa que os equipamentos e sistemas devem ser mais confiáveis; ii) caso o problema esteja relacionado com altos tempos de reparo, o trabalho pode ser direcionado para reduzir o tempo das paradas.

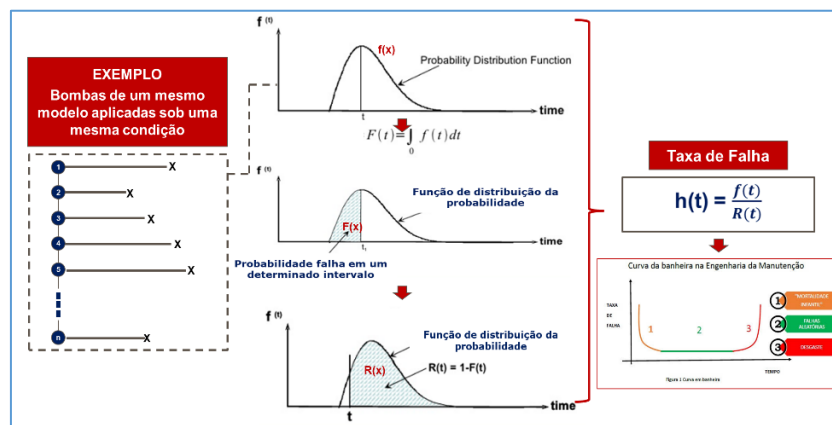


Figura II: Funções Densidade de Probabilidade $f(t)$, Falhas Acumuladas $F(t)$, Confiabilidade $R(t)$ e Taxa de Falha $h(t)$.

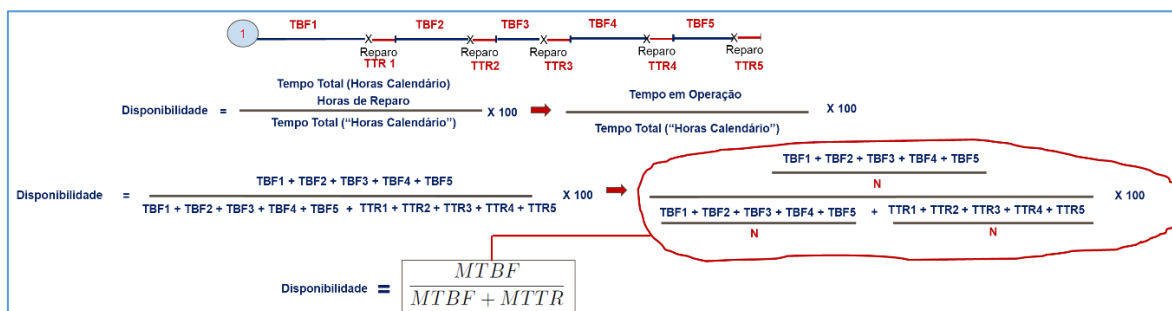


Figura III – Relação entre Disponibilidade, MTBF e MTTR.

Quando se toma os dados de falhas de vários equipamentos, sistemas ou componentes percebe-se que a maioria dos dados não segue uma distribuição normal. Segundo Matos e Zotti (2010), as distribuições estatísticas mais comuns, que descrevem os comportamentos dos equipamentos são: i) Distribuição de Weibull, ii) Distribuição Exponencial e iii) Distribuição Log Normal (Figura IV).

Rocha (2015) descreve a distribuição de Weibull como um modelo abrangente que pode assumir diferentes formas de acordo com os parâmetros obtidos. Estas distribuições podem ser utilizadas para obter as funções de falhas acumuladas, confiabilidade e taxa de falha, trazendo informações úteis para o estudo dos equipamentos (Figura IV).

Ao analisar a distribuição de Weibull, especificamente a sua função taxa de falha $h(t)$, pode-se classificar o comportamento das falhas de um equipamento de acordo com o parâmetro β . De acordo

com o β , a função taxa de falha pode ser classificada em três fases: i) maturidade infantil; ii) desgastes ou mortalidade senil e iii) falhas casuais ou maturidade (Figura V).

O gráfico da Curva da Banheira mostra o ciclo de vida de um equipamento, sistema ou componente. Na mortalidade infantil, a taxa de falha é alta, porém ela decresce com o tempo, tendendo a um valor mais baixo e constante. Nesta fase, geralmente as falhas ocorrem devido a: desqualificação de mão de obra, erros de projetos, peças defeituosas, etc. No início de novas ou expansão de operações existem problemas clássicos de falta de controle inicial que podem ser sanados através de ações específicas. Estas ações poderiam resultar na diminuição de perdas na etapa de mortalidade infantil.

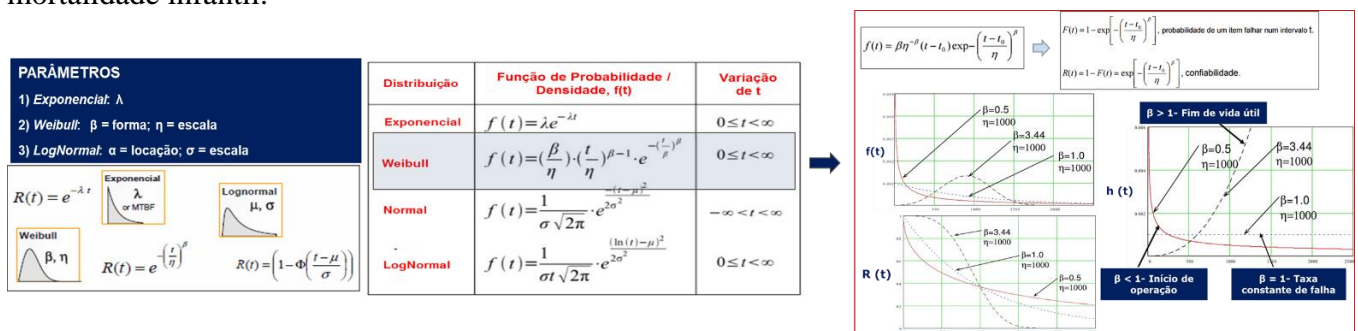


Figura IV – Distribuições comumente empregadas nas análises de confiabilidade e o modelo de Weibull.

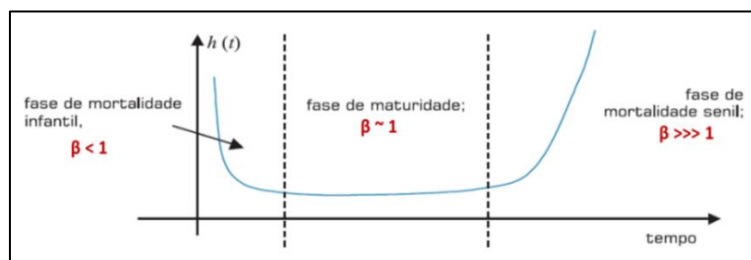


Figura V – Função taxa de falha h(t) para diferentes β – Curva da Banheira. Adaptado de Sellito (2005).

Quando a taxa de falha chega a um patamar constante, pode se dizer que o sistema chegou a fase de maturidade. Na fase de maturidade a taxa de falha é mais baixa, constante e distribuída aleatoriamente através do tempo. Segundo Sellito (2005), as falhas ocorrem por causas aleatórias e podem assumir diversas naturezas, tais como: sobrecargas aleatórias, vibrações, impactos mecânicos, variações bruscas de temperatura e erros humanos de operação. Não é fácil a eliminação dessas falhas, mas elas podem ser reduzidas aumentando a robustez dos equipamentos e padronizando a operação. Em relação a esta fase do equipamento ou sistema, Sellito (2005) propõe a implantação de um programa de gestão (TPM, 5S, Manutenção Autônoma), aumentando a interação entre o operador e a máquina. Outra estratégia que pode ser aplicada nesta fase é a manutenção preditiva, pois permite o monitoramento e a previsão dos processos de falhas progressivas que resultam em quebras.

Com o passar do tempo as taxas de falhas começam a crescer devido ao final de vida útil do sistema. Essa fase é denominada fase de mortalidade senil. Sellito (2005), Mengue e Sellito (2013) apontam que essa fase ocorre por desgaste, fadiga, trincas, deterioração mecânica, elétrica ou química, manutenção insuficiente, dentre outros. Para diminuir a taxa de falha, deve se ter um plano de inspeção e manutenção que detecte e/ou previna o potencial de falha do componente. Outro ponto crucial nesta fase é o planejamento de grandes paradas de manutenção. O setor de Planejamento e Controle de Manutenção (PCM) deve programar grandes eventos de manutenção, visando reestabelecer o desempenho. Após uma parada de manutenção, um novo ciclo inicia e o equipamento volta à faixa de “vida útil” da curva da banheira.

Para Moubray (1997), a empresa deve buscar estratégias de manutenção alinhadas com as análises de confiabilidade (Figura VI). Não basta realizar corretamente as tarefas, é preciso realizar as tarefas certas. É importante ressaltar que a coleta e preparação de dados para análise de confiabilidade devem ser consistentes, originando confiança, representatividade e informações sem desvios.

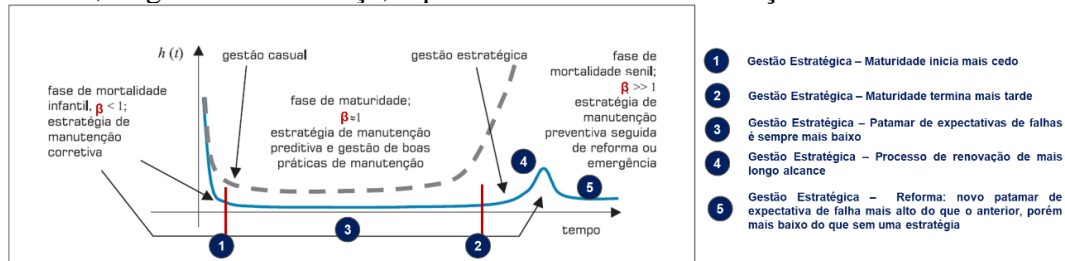


Figura VI – Estratégias de Manutenção de acordo com a maturidade do equipamento. Adaptado de Sellito (2005).

3. APLICAÇÃO DO LSS EM ANÁLISE DE CONFIABILIDADE.

Para Miranda (2016), o SS é uma adaptação da metodologia PDCA, que emprega, além das ferramentas clássicas da qualidade, ferramentas estatísticas robustas para aprofundar a investigação de problemas complexos. As empresas que adotam o SS em seu sistema de gestão possuem especialistas de vários níveis, responsáveis por conduzir projetos com metas alinhadas com a estratégia organizacional. Geralmente os especialistas passam por programas de treinamento que podem durar de 80 a 160 horas e, ao final deste período, desenvolvem um projeto com impacto financeiro para a organização. Diversos autores – Miranda (2016), Werkema (2012), Domenech (2014) – mostram que um projeto SS é dividido em cinco etapas, a saber: i) Definição; ii) Medição; iii) Análise; iv) Melhoria; e v) Controle (Figura XI). Cada etapa possui um objetivo específico e esta divisão auxilia os profissionais a estabelecer disciplina, foco e assertividade na conclusão do projeto.

Os treinamentos de SS possuem um conjunto de ferramentas padronizadas que podem ser usadas nos projetos, que devem ter duração entre 4 a 8 meses. Estas ferramentas são mais focadas em processos que se distribuem normalmente, com exceção dos processos da manutenção (Figura VII). Na empresa em questão, o time de manutenção, juntamente com o *Master Black Belt* da Unidade, propôs a junção entre o SS e Análises de Confiabilidade. Quando um especialista inicia um projeto para melhorar a confiabilidade de um determinado equipamento ou sistema, primeiramente ele deve iniciar com a Definição do projeto, empregando ferramentas clássicas, recomendadas dentro de um projeto Seis Sigma: Contrato de Performance, Análise Histórica de Dados, Definição de Meta, Estratificação do Problema, cronograma de projeto, definição de equipe, etc.

A confiabilidade relaciona-se com a estabilidade da Planta, focando não apenas no aumento da disponibilidade, mas também em sua estabilidade. Alguns projetos SS falham por focar somente em aumentar a Disponibilidade de um equipamento, esquecendo-se que a estabilidade é importante e tem interface com outros indicadores do OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) do equipamento.

A definição da meta de MTBF pode estar relacionada à disponibilidade. Sendo assim, se existir uma meta de disponibilidade determinada pela alta administração da empresa, pode-se empregar a expressão da Figura III para determinação das metas de MTBF e MTTR.

Na fase de definição, o uso de ferramentas, como SIPOC e Pareto, serve para ajudar o especialista para delimitar o escopo do projeto. A etapa de definição pode durar entre 1 e 2 Semanas. Na etapa de medição, o especialista se depara com a necessidade de coletar dados dos tempos entre falhas dos equipamentos ou sistemas que são objeto do estudo. Primeiramente deve-se avaliar se os dados disponíveis são confiáveis. Isto quer dizer, avaliar se os bancos de dados possuem apontamentos corretos, consistentes e com descrições de detalhes dos eventos de falha. Caso seja encontrada alguma inconsistência no sistema de medição, o especialista deve corrigi-la imediatamente e iniciar uma nova

avaliação de dados, para verificar se o problema realmente existe na nova condição do sistema de medição.

Para estudar a confiabilidade é preciso ter dados confiáveis, com profissionais focados em conferir, criticar e corrigir diariamente o apontamento das falhas (paradas por falhas de equipamentos). Na prática, para corrigir este problema é preciso ter um dono, responsável por vigiar e garantir a precisão do sistema de gestão de perdas. Entende-se que esse guardião é o engenheiro de confiabilidade que deve conscientizar, periodicamente, os operadores que lançam os eventos de falha no sistema. Padronizar os códigos de falha, garantir uma estrutura de tabulação que permita análise posterior também faz parte do trabalho do engenheiro de confiabilidade.



Figura VII – Etapas e ferramentas empregadas dentro do Seis Sigma tradicional.

Após coletar os dados de tempo entre falhas, o especialista deve realizar análises para determinar as funções de confiabilidade, taxa de falha, os atuais valores de MTBF, considerando o intervalo de confiança obtido pelo tratamento, verificando em que situação da curva da banheira o sistema ou equipamento se encontra. Esta primeira análise de confiabilidade permite ao especialista uma noção de qual estratégia seria mais adequada para estabilizar o sistema ou equipamento.

Paralelamente, a etapa de Medição prevê a realização de brainstormings para determinar quais são as causas eminentes relacionadas ao valor indesejado de MTBF. Miranda (2016) aponta que a participação da equipe de trabalho, composta por pessoas que tem experiência de atuação na área, é muito importante para que o processo de identificação de causas seja eficiente.

Caso a quantidade de causas eminentes seja muito elevada, após o brainstorming, devem-se empregar ferramentas de priorização. Neste caso, a mais adequada é a Matriz GUT (Figura VIII), que analisa a relação entre a causa e o problema através de três dimensões: i) Gravidade da causa sobre o problema; ii) Urgência em relação à atuação sobre a causa existente e, por último, iii) Tendência, relacionada à possibilidade da causa piorar e aumentar o seu impacto sobre o problema estudado.

Ao multiplicar os valores de G, U e T para cada causa, obtém-se um valor consolidado que pode ser utilizado na priorização das causas que serão investigadas com maior detalhe na etapa de Análise.

Causa	Matriz GUT (priorização)			G x U x T
	Gravidade (G)	Urgência (U)	Tendência (T)	
01 - Falha de instalação	5	5	5	125
02 - Falha de operação do equipamento (falha de operador)	5	5	5	125
03 - Falha de operação do equipamento (falha de equipamento)	5	5	5	125
04 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
05 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
06 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
07 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
08 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
09 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
10 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
11 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
12 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
13 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
14 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
15 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
16 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
17 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
18 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
19 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
20 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
21 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
22 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
23 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
24 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
25 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
26 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
27 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
28 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
29 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
30 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
31 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
32 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
33 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
34 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
35 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
36 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
37 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
38 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
39 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
40 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
41 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
42 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
43 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
44 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
45 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
46 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
47 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
48 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
49 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
50 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
51 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
52 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
53 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
54 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
55 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
56 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
57 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
58 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
59 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
60 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
61 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
62 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
63 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
64 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
65 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
66 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
67 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
68 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
69 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
70 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
71 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
72 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
73 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
74 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
75 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
76 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
77 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
78 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
79 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
80 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
81 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
82 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
83 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
84 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
85 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
86 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
87 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
88 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
89 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
90 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
91 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
92 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
93 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
94 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
95 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
96 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
97 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
98 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
99 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125
100 - Falha de instalação de equipamento	5	5	5	125

Nota	Gravidade	Urgência	Tendência ("Se nada for feito")
5	Extremamente Grave	Precisa de Ação imediata	Irã piorar rapidamente
4	Muito Grave	É urgente	Irã piorar em pouco tempo
3	Grave	O mais rápido possível	Irã piorar
2	Pouco Grave	Pouco urgente	Irã piorar a longo prazo
1	Sem Gravidade	Podem esperar	Não irá mudar

Figura VIII – Matriz GUT empregada para priorizar causas.

Um ponto relevante na etapa de Medição é avaliar se alguma das causas levantadas já é uma causa raiz, que pode ser rapidamente atacada pela equipe. Algumas ideias levantadas podem ser realizadas rapidamente, sem necessidade de análises aprofundadas. Exemplo disso são ações para organizar a área operacional, eliminação de fontes de sujeira que podem estar influenciando nas falhas dos equipamentos. Ações de limpeza, eliminação de desperdícios e organização podem trazer os primeiros resultados e elevar o nível de motivação das equipes que atuam na área. A etapa de Medição, em projetos voltados para confiabilidade, pode durar entre 2 a 5 semanas.

A Etapa de Análise é voltada para identificação das causas fundamentais do problema, partindo das causas priorizadas pela matriz GUT, empregando diversas ferramentas, destacando-se:

- 1 - Espinha de Peixe: usada para identificar as causas fundamentais relacionadas à causa eminente. Neste caso, deve fazer um papel semelhante a análises empregadas em métodos clássicos de análise e solução de problemas, como a análise de 5 Porquês;
- 2 - Correlações estatísticas, testes de hipóteses, séries temporais, cartas de controle e Pareto: empregadas em conjunto com as análises de espinha de peixe ou 5 Porquês para validar ou evidenciar que as causas raízes possuem influência significativa sobre o problema;
- 3 - FMEA (*Failure Mode Effect Analysis*) ou análises via RCM (*Reliability Centered Maintenance*): este método é bastante eficaz na medida em que identifica os modos de falhas e quais seriam as causas raízes que geram as falhas. A ferramenta permite identificar os níveis de controle atuais e mecanismos eficientes para bloquear as falhas, antes que causem distúrbios no indicador em estudo. O RCM direcionará as ações de manutenção mais adequadas para cada modo de falha. Moubray (1997) considera que um bom trabalho de RCM deve ser composto de 5 etapas principais, onde é fundamental a participação conjunta entre os times de manutenção e produção (Figura IX).



Figura IX – Principais etapas e questões Básicas relacionadas ao RCM.

Em projetos SS de confiabilidade, a Análise deve durar de 1 a 2 meses, pois ferramentas como FMEA e RCM demandam mais tempo e foco da equipe. Em alguns casos específicos, um RCM pode ser desenvolvido entre 1 a 2 semanas, dependendo da complexidade, engajamento e dedicação da equipe selecionada para resolver um problema específico. Nesta etapa, o especialista também deve confrontar a análise das causas raízes com a condição obtida através da análise da função $h(t)$, obtida na etapa de Medição. Deve-se verificar se as ações a serem tomadas para atacar as causas raízes estão alinhadas com a estratégia prevista para a condição de taxa de falha do equipamento (Figura VI).

Após levantar as causas fundamentais do problema, a equipe deve confeccionar um plano de ação assertivo e que seja capaz de evitar que as causas identificadas sejam recorrentes. A Melhoria, para projetos de confiabilidade, pode durar entre 2 a 4 meses, devido à natureza das ações que estão alinhadas com a estratégia de manutenção. Se a análise de causas e a estratégia indicarem a troca de peças ou componentes, por exemplo, a aquisição pode demorar um pouco mais tempo.

Na fase de Controle, a equipe de manutenção deve levantar novos dados do sistema ou equipamento estudado, avaliando seu perfil de falhas. Deve-se estudar novamente as funções de confiabilidade e avaliar se o plano de ação foi efetivo, resultando em diminuição da taxa de falha e aumento do MTBF.

Miranda (2016) ressalta que outro objetivo da etapa de Controle é a implantação de mecanismos para sustentação dos resultados. A equipe deve focar na padronização das melhorias através de procedimentos, além de ferramentas de bloqueio e dispositivos à prova de erro, como o *poka yoke*.

A avaliação das funções de confiabilidade, na etapa de Controle, é fundamental para consolidar uma nova estratégia de manutenção, adequada para manter a Planta em níveis satisfatórios de MTBF e estabilidade para cumprimento das metas de Disponibilidade. De acordo com Miranda e Siqueira (2016), as rotinas de manutenção devem ter alterações, conforme as análises realizadas, induzindo a uma nova condição de taxa de falha, com valores mais baixos e maior estabilidade. De forma resumida, as etapas descritas são mostradas na (Figura X).

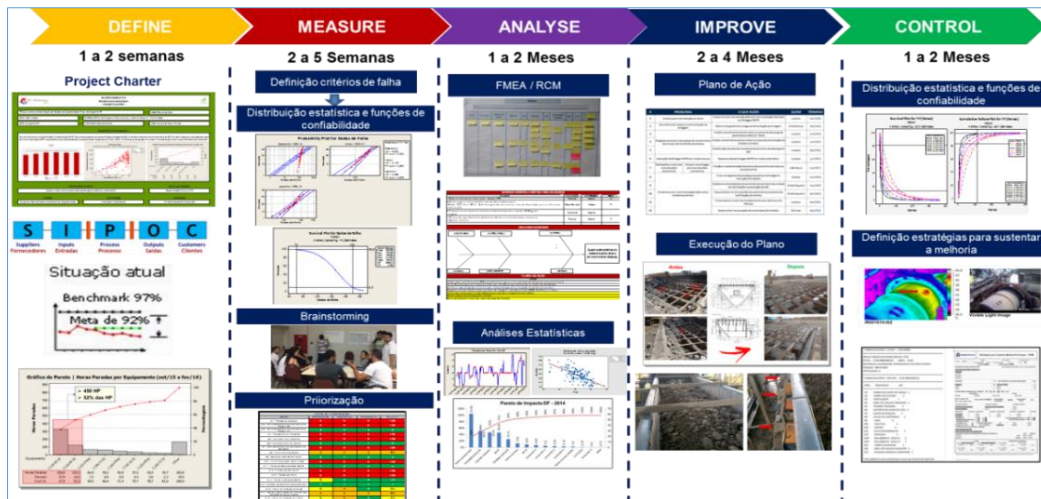
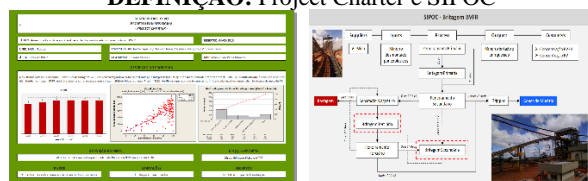
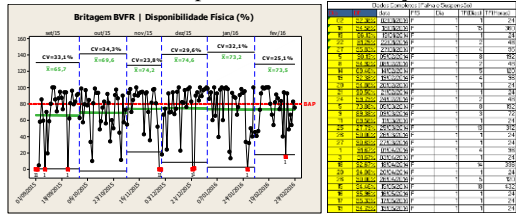
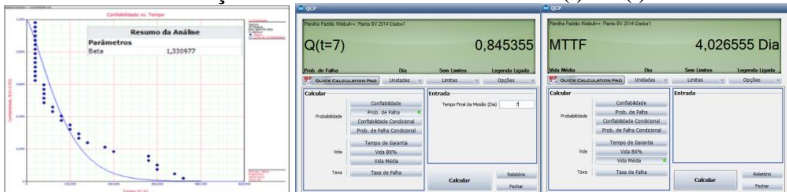


Figura X – Metodologia LSS para projetos de confiabilidade.

4. EXEMPLO E RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO LSS EM CONFIABILIDADE

Um resumo das etapas anteriormente citadas é mostrado para um caso aplicado em uma mineração, cujo objetivo era aumentar o MTBF de 4,0 para 9,0 dias em uma etapa de concentração de minério (Tabela I):

Tabela I – Etapas de um projeto SS aplicado para melhorar a confiabilidade de uma Planta mineração.

<p>DEFINIÇÃO: Project Charter and SIPOC</p> 	<p>Project Charter: estabelece as metas do projeto, escopo, descrição do histórico do problema, equipe, cronograma, riscos e ganhos financeiros.</p> <p>O SIPOC serve para entender e estratificar o processo.</p>
<p>DEFINIÇÃO: Histórico da Disponibilidade e Definição do Critério de Falha.</p> 	<p>Avaliação do Histórico do problema e comparação com a meta estabelecida para o projeto. A análise histórica refere-se a Disponibilidade Global da Planta, cuja meta é 96%. A equipe definiu, de acordo com as metas da empresa, o critério para considerar se o equipamento falhou ou não. Foi considerado como falha, qualquer condição em que a Planta apresente Disponibilidade inferior a 96%</p>
<p>MEDIÇÃO: Análises de Confiabilidade R(t) e H(t)</p> 	<p>Dados seguem a distribuição de Weibull, com $\beta = 1,33$: planta se encontra em final de vida útil. As análises de confiabilidade mostraram que existe uma probabilidade de 84,53% de falha da Planta em um período de 7 dias. Ao analisar o MTBF da Planta, tem-se um valor de 4,03 dias, valor mais baixo que o estabelecido pela meta (9,00 dias).</p>

MEDIÇÃO: Gráfico de Pareto – Avaliação por equipamento

Verificação dos principais equipamentos que apresentaram falha durante o ano de 2014.

MEDIÇÃO: Brainstorming e Matriz de GUT

Causa	Prevenção	Inspeção	Tolerância	GRAV
01 - Falha de Sensor	5	5	5	125
02 - Falha de Sistema de Alimentação de Energia	5	5	5	125
03 - Falha de Sistema de Alimentação de Energia	2	2	2	8
04 - Falha de Motor-Bomba	5	5	5	125
05 - Falha de Motor-Bomba	5	5	5	125
06 - Falha de Motor-Bomba	2	2	2	8
07 - Falha de Sistema de Alimentação de Energia	5	5	5	125
08 - Falha de Tubulação	4	4	4	64
09 - Condensador Desbalanceado	2	1	2	4
10 - Aumento de água na caixa	5	5	5	125
11 - Falha de Condensador de Resfriamento	1	2	2	4
12 - Falha de Condensador	5	5	5	125
13 - Falha de Motor-Bomba	5	5	5	125
14 - Falha de Motor-Bomba	3	2	2	12
15 - Falha de Cilindro de Estanqueamento	1	1	1	1
16 - Falha de Falha de Selo	3	4	2	24
17 - Responsabilidade de Manutenção	4	4	4	64
18 - Falha de Falha de Selo	3	4	2	24

Levantamento de causas relacionadas à baixa confiabilidade da Planta. Brainstorming está associado ao gráfico de Pareto obtido com os dados de 2014 e outras causas observadas em 2015. Posteriormente foi feita a priorização das causas via matriz GUT. De 18 causas levantadas, 10 foram priorizadas.

ANÁLISE: Análise de Causa Raiz e Análises Estatísticas (ex: Séries Temporais)

Para cada item priorizado através da matriz GUT foi feita uma análise detalhada para identificação de causas raízes.

MELHORIA: Plano de Ação

Causa	Ações Previstas	Quant.	Observação
1	1. Solicitar RFP para teste de compatibilidade de lubrificação	concluído	
2	2. Solicitar RFP para aquisição de um CCM para o novo sistema de lubrificação	concluído	
3	3. DEFINIR ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA AQUISIÇÃO DE UM PANEL PLC PARA O NOVO SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO.	concluído	
4	4. ABRIR RCD PARA AQUISIÇÃO DO CCM	concluído	
5	5. ABRIR RCD PARA AQUISIÇÃO DO PANEL PLC	concluído	
6	6. Testar as centrais de lubrificação antes da instalação	EM ANDAMENTO	
7	7. Trocar cabos de junção, no campo, abaixo do mocho de todos fap	concluído	
8	8. Equiparizar novo quadro de temperatura para o sistema de proteção do motor do mocho barra e bola fap.	concluído	
9	9. Fazer inspeção visual das novas peças de temperatura.	concluído	
10	10. Trocar o tubo de alimentação do mocho de barra (desbalanceado em carga)	concluído	
11	11. Trocar barra inventariada da grelha de descarga do mocho de barra fap.	concluído	

O Plano de ação foi baseado em todas as análises realizadas. Baseado nas análises de causas raízes, bem como a avaliação da posição da Planta na curva da banheira, verificou-se que as ações deveriam focar em três modalidades de manutenção: **1) Reforma de Equipamentos, 2) Preventiva e 3) Preditiva.**

MELHORIA: Execução do Plano de Ação

A execução do Plano de ação para as causas levantadas nas etapas de Medição e Análise. Algumas atividades de manutenção preventiva, preditiva e inspeção foram inseridas na rotina de manutenção da Planta. O plano de ação também incluiu reformas de diversos componentes que estavam falando por estarem em fim de vida útil.

CONTROLE: Análises de Confiabilidade R(t) e H(t)

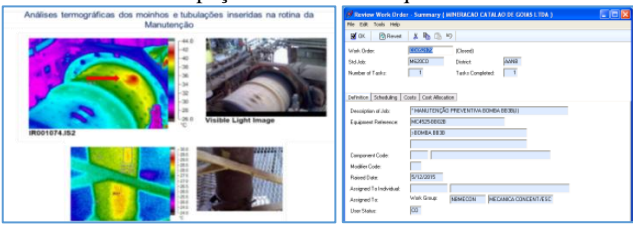
As análises de confiabilidade mostraram que existe uma probabilidade de 37,58 % de falha da Planta BV em um período de 7 dias.

Para analisar o MTTF da Planta, tem-se um valor de 11,44 dias, valor que superou a meta estabelecida (9,00 dias).

CONTROLE: Gráfico de Pareto e Box Plot de Disponibilidade

A análise de horas paradas mostrou uma redução significativa das horas paradas por manutenção na Planta que foi foco do projeto.

O foco de “ataque” da equipe de manutenção mudou para os anos seguintes.

<p>CONTROLE: Inspeção/Revisão da frequência de Preventivas</p> 	<p>As atividades de Inspeção e revisão das manutenções preventivas foram realizadas para adequar a estratégia de manutenção. Atividades de análise termográfica nos moinhos e tubulações foram necessárias, uma vez que a Planta passou a ser alimentada com minério mais abrasivo no ano em questão. Manutenções preventivas para as bombas da Planta foram inseridas na rotina, adequando a estratégia de manutenção.</p>
<p>CONTROLE: Revisão da matriz criticidade de equipamentos e rotinas de manutenção</p>	<p>A revisão da matriz de criticidade serviu para adequar a estratégia de manutenção da Planta.</p>

A aplicação da metodologia proposta surtiu efeito, aumentando a estabilidade da Disponibilidade, resultando em acréscimo de aproximadamente 1% da produção anual da empresa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de ferramentas de confiabilidade dentro da metodologia SS proporcionou impactos significativos para os indicadores de manutenção Empresa estudada. Estes resultados têm se traduzido em ganhos financeiros, tornando mais fácil a aceitação deste novo modelo por parte da alta administração. Destaca-se também o nível de motivação por parte dos Engenheiros de confiabilidade, que começaram a enxergar o SS como uma metodologia que auxilia na execução dos projetos, além de nortear a busca das estratégias de manutenção mais adequadas para cada condição.

6. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 5462. Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.
- DOMENECH, C. Formação de Green Belts Industriais. Catalão, Goiás, 2014. Treinamento Interno oferecido para a Anglo American Nióbio e Fosfatos.
- MENGUE D.; SELLITO M. Estratégia de Manutenção baseada em funções de confiabilidade para uma bomba centrífuga petrolífera. Revista Produção Online, Florianópolis, SC, v.13, n.2, p. 759-782, abr/jun. 2013.
- MARCORIN, A.; ABACKERLI, A. (2001) - Estudo Exploratório Sobre Áreas Potenciais de Aplicação de Técnicas de Confiabilidade. Anais do XXI ENEGEP. Salvador, 2001.
- MOUBRAY, J. *Reliability-centered maintenance: 2ª. ed. New York: Industrial Press Inc., 1997.*
- MIRANDA, M. Aplicando a cultura *Lean Six Sigma* visando a excelência operacional. Catalão, Goiás, 2016. Treinamento Interno do Curso de Engenharia de Produção – Centro de Ensino Superior (CESUC).
- MIRANDA, M.; SIQUEIRA, A. Estabilização da Disponibilidade Física da Planta BV. Ouvidor - GO, 2016. Apresentação interna – NioBrás.
- RAPOSO, J. Manutenção Centrada em confiabilidade aplicada a sistemas Elétricos: Uma proposta para uso de análise de risco no diagrama de decisão. Salvador: Universidade Federal da Bahia. 2004. 149p. Dissertação de Mestrado – UFBA 2004.
- ROCHA, J. Estudo sobre métodos de estimação de F(t) para o cálculo dos parâmetros de distribuições de Weibull com a aplicação em uma análise de falhas de garrafas PET. Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina. 2015. 18p. TCC de Graduação – UFSC 2015.
- RELIASOFT. Confiabilidade de Sistemas e Análise de Manutenção e Otimização. São Paulo, 2014.
- SELLITTO, M. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. Prod. [online]. 2005, vol.15, n.1, n.1, pp.44-59.
- WERKEMA, C. Criando a Cultura Seis Sigma. Volume 1. Belo Horizonte. Editora Werkema, 2012.

5. DIREITOS AUTORAIS

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.