



PEDRO HENRIQUE SOUZA FIGUEIREDO

IMPLEMENTAÇÃO DA OEE NA MELHORIA DA PERFURAÇÃO

Itabira, MG

2022

PEDRO HENRIQUE SOUZA FIGUEIREDO

IMPLEMENTAÇÃO DA OEE NA MELHORIA DA PERFURAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista em Lavra de Minas a Céu Aberto.

Área de concentração: Lavra de Minas

Orientador: Fabiano Veloso Ferreira, M.Sc

Itabira, MG

2022

Título: Alternativa para Extensão da Vida Útil do Complexo Água Limpa
Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (x) Pública

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço.

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados.

Dados Internacionais de Catalogação em Publicação (CIP)

F49o

Figueiredo, Pedro Henrique Souza
Otimização da OEE de Perfuração. Pedro Henrique Souza
Figueiredo... [et al.] - Ouro Preto, MG: ITV, 2022.

86 p.: il.

Monografia (Especialização latu sensu) - Instituto Tecnológico Vale, 2022.
Orientador: Fabiano Veloso Ferreira

1. Perfuratriz. 2. Litologia. 3. Produtividade. 4. Contexto Operacional. 5. OEE. 6. Operação Unitária. I. Ferreira, Fabiano Veloso. II. Título.

CDD.23. ed. 622.3

Pedro Henrique Souza Figueiredo

OTIMIZAÇÃO DA OEE DE PERFURAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em [Lavra de Minas a Céu Aberto].

Orientador: Prof. MSc. Fabiano Veloso Ferreira

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 21 de dezembro de 2022 pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. MSc. Fabiano Veloso Ferreira
Orientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Prof. Ph.D. Vidal Félix Navarro Torres
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Prof. D.Sc. Valdir Costa e Silva
Membro externo – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Os Signatários declaram e concordam que a assinatura será efetuada em formato eletrônico. Os Signatários reconhecem a veracidade, autenticidade, integridade, validade e eficácia deste Documento e seus termos, nos termos do art. 219 do Código Civil, em formato eletrônico e/ou assinado pelas Partes por meio de certificados eletrônicos, ainda que sejam certificados eletrônicos não emitidos pela ICP-Brasil, nos termos do art. 10, § 2º, da Medida Provisória nº 2.200-2, de 24 de agosto de 2001 (“MP nº 2.200-2”).



PROTOCOLO DE ASSINATURA(S)

O documento acima foi proposto para assinatura digital na plataforma Portal de Assinaturas Vale. Para verificar as assinaturas clique no link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/8ABF-0311-D4B7-2188> ou vá até o site <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> e utilize o código abaixo para verificar se este documento é válido. The above document was proposed for digital signature on the platform Portal de Assinaturas Vale . To check the signatures click on the link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/8ABF-0311-D4B7-2188> or go to the Website <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> and use the code below to verify that this document is valid.

Código para verificação: 8ABF-0311-D4B7-2188



Hash do Documento

36F39F6DBEE38CB7D301C6D01E0729769BC7F40497058FB712BF29216D762323

O(s) nome(s) indicado(s) para assinatura, bem como seu(s) status em 15/03/2023 é(são) :

☒ Valdir Costa e Silva (Signatário) - em 09/03/2023 16:39 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: valdircostasilva@hotmail.com

Evidências

Client Timestamp Thu Mar 09 2023 16:39:12 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -12.994316241451873 Longitude: -38.52663552827249 Accuracy: 90

IP 186.203.157.178

Hash Evidências:

127CE08B08A12A31C151859338D8EB31109E9C4099EF4AE1843B45EC6D886DC4

☒ Vidal Félix Navarro Torres (Signatário) - 275.950.565-00 em 08/03/2023 08:47 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: vidal.torres@itv.org

Evidências

Client Timestamp Wed Mar 08 2023 08:47:51 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -19.8745399 Longitude: -43.9947367 Accuracy: 20.9

IP 201.80.1.245

Hash Evidências:

19741336F2B85DB2668C867BAA2A80B0632BD8D577025D4B1703D0FC2B95D289

☒ Fabiano Veloso Ferreira (Signatário) - em 07/03/2023 09:08 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: fabiano.v.ferreira@itv.org

Evidências

Client Timestamp Tue Mar 07 2023 09:08:33 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -6.4148836 Longitude: -50.3205515 Accuracy: 13.678

IP 186.225.55.76

Hash Evidências:

242A80D19C7E7C8B67B9825CEB8A45C6A2ADCDC639567753101AA47D9175F45C



Dedico este trabalho a minha família, Caroline minha esposa e as minhas duas filhas, Livia e Cecilia. Os pilares que sustenta minha vida

AGRADECIMENTOS

À Deus pela luz nos momentos de dificuldade e por fomentar minha persistência em continuar e chegar ao fim de mais uma etapa.

À minha família pela compreensão, amor e dedicação concedidos a todo o momento.

Aos colegas de pós-graduação pelo companheirismo e aprendizado conjunto.

A meu orientador Fabiano Veloso Ferreira pelos ensinamentos.

Aos colegas de trabalho por tornarem o ambiente propício ao meu aprendizado e crescimento profissional fundamentais para a execução deste trabalho.

“A mente que se abre a uma nova ideia, jamais voltará a seu tamanho original.” (Albert Einstein).

RESUMO

As perfuratrizes de grande porte de uma mina a céu aberto são equipamentos de extrema importância no seu ciclo operacional, sendo responsáveis pelo início do processo de lavra, primeira operação unitária. Falhas nesse tipo de equipamento têm impacto direto na massa desmontada e os processos subsequentes, para tal se faz necessário uma atuação na OEE “Overall Equipment Effectiveness” a fim de otimizar as instalações e manter o processo mais estável, esse foi o objetivo do projeto trabalhar nos indicadores chave que compõem a OEE. Para fundamentar o trabalho, realizou-se uma revisão bibliográfica quanto aos fundamentos teóricos pertinentes para compreensão da operação de perfuração. Para conectar a influência da litologia, e condições de operação, comparou-se os dados de performance da frota de perfuratrizes do complexo minerador de Itabira. O principal resultado demonstrou fortes indícios de que as perdas produtivas estão relacionadas diretamente ao contexto operacional, e este precisa ser levado em consideração ao dimensionar as metas de produção.

Palavras-chave: Perfuratriz. Litologia. Produtividade. Performance. Contexto operacional. OEE. Operação Unitária.

Fase da Cadeia: Mina.

ABSTRACT

The large drills of an open pit mine are equipment of extreme importance in its operational cycle, being responsible for the beginning of the mining process, the first unit operation. Failures in this type of equipment have a direct impact on the dismantled mass and subsequent processes, for this it is necessary to act in the OEE "Overall Equipment Effectiveness" to optimize the facilities and maintain the most stable process, this was the goal of the project to work on the KPIs that make up the OEE. To support the work, a literature review was conducted regarding the relevant theoretical foundations for understanding the drilling operation. To connect the influence of lithology, and operating conditions, the performance data of the drill fleet of the mining complex of Itabira was compared. The main result showed strong indications that production losses are related to the operational context, and this needs to be considered when sizing production targets.

Keywords: Drill. Lithology. Productivity. Performance. Operational context. OEE. Unit operation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma típico de uma lavra a céu aberto	21
Figura 2: Método de perfuração rotativa com broca tricônica	24
Figura 3: Método de perfuração rotoperçussiva DTH	25
Figura 4: Método de perfuração rotoperçussiva - Top Hammer	26
Figura 5: Brocas de botões	27
Figura 6: Broca tricônica de botões.....	28
Figura 7: Os quatro reinos da perfuração	30
Figura 8: Classificação da dureza Mohs com a dureza Rockwell.....	31
Figura 9: Resistência a compressão uniaxial de determinadas rochas.	32
Figura 10: Processos: Original e com Variação Reduzida.....	41
Figura 11: Significado da qualidade Seis Sigma – Curto prazo.....	43
Figura 12: Significado da qualidade Seis Sigma – Longo prazo	44
Figura 13: Fluxograma representativo da metodologia aplicada a este projeto.	47
Figura 14: Fases do método PDCA/DMAIC	48
Figura 15: Análise Histórica do Indicador OEE de perfuração de grande porte.....	50
Figura 16: Boxplot do Indicador de OEE em 2020/2021	51
Figura 17: Gráfico de correlação pluviometria X OEE.....	52
Figura 18: Gráfico meta por período.....	53
Figura 19: Estratificação por subindicador	54
Figura 20: Gráfico evolução da meta geral de OEE.....	69
Figura 21: Gráfico evolução da meta de UF	70
Figura 22: Gráfico evolução da meta de Taxa	70
Figura 23: Gráfico evolução da meta de Furos válidos.....	71
Figura 24: sistema de mistura para abastecimento de comboios exclusivos para o abastecimento das caixas d'água das perfuratrizes, 100% da frota usando fluido na injeção de água.....	72
Figura 25: Implementação de controle dos indicadores operacionais nas trocas de turno e via CCO, equipe técnica operacional e supervisores.....	72
Figura 26: Matriz de priorização para todas as causas identificadas para o estudo da OEE de perfuração.	81
Figura 27: Análise da técnica de marcação de furos.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de botões para cada rocha.....	28
Tabela 2: Escala Sigma (longo prazo) x Defeitos por milhão x Nível de Qualidade.....	44
Tabela 3: Análise descritiva do indicador OEE entre Jan/19 e Jun/20.....	50
Tabela 4: Causas de maior impacto em função de cada subindicador.	66

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CFEM - Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

DN - Deliberação Normativa

OEE – Overall Equipment Effectiveness

MTBF - Mean Time Between Failures

MTTR - Mean Time to Repair

DF – Disponibilidade Física

UF – Utilização Física

DTH – Down The Role

HMNP - Horas de manutenção não programadas

RO – Rendimento operacional

PDCA – Plan, Do, Check, Act

DMAIC – Define, Measure, Analyze, Improve e Control

OCAP - Out of Control Action Plan

ROM – Run of Mine

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	Objetivo.....	19
2.1	Objetivo geral	19
2.2	Objetivo específico.....	19
3	ESTADO DA ARTE DO INDICADOR DE OEE	20
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
4.1	Operações unitárias de uma mina a céu aberto.....	21
4.2	Perfuração e desmonte de rochas.....	21
4.3	Carregamento e transporte	22
4.4	Características da atividade de perfuração	22
4.5	Métodos de perfuração	23
4.6	Acessórios de perfuração	26
4.7	Desgaste dos acessórios	29
4.8	Propriedades mecânicas das rochas	29
4.9	Indicadores de desempenho.....	33
4.9.1	Indicadores de manutenção	33
4.9.2	Indicadores de operação:.....	37
4.10	Metodologia Seis Sigma - Contextualização; aplicações e vantagens	40
5	METODOLOGIA	46
5.1	Caracterização do Objeto de Estudo	46
5.2	Estudo de caso	46
5.3	Etapas da metodologia	47
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
6.1	Detalhamento do indicador principal.....	50
6.2	Definição da meta	52
6.2.1	Cálculo do ganho financeiro previsto no projeto:	53
6.3	Análise do fenômeno	54
6.3.1	Definição de metas específicas:	61

6.4	Análise do processo	64
6.5	Levantamento, priorização e comprovação das causas:	64
6.6	Ações de correção/melhoria aplicadas.....	67
6.7	Resultados obtidos	69
6.7.1	Padronizações e treinamentos:	71
7	CONCLUSÕES	73
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro é um bem mineral crucial para o desenvolvimento industrial mundial. As indústrias de base o utilizam em larga escala na cadeia produtiva do aço, que, por sua vez, é matéria-prima importante para as indústrias de transformação das mais diversas áreas como a automotiva, construção civil e demais setores que produzem bens de consumo duráveis.

O Brasil possui alguns dos maiores depósitos de minério de ferro do mundo, cerca de 17%, sendo o teor médio de ferro encontrado em torno de 45,7% (SIMINERAL, 2018). Um dos principais depósitos brasileiros é o chamado Quadrilátero Ferrífero, que abrange cerca de 7000 km² da região centro-sul do estado de Minas Gerais. A exploração de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero ocorre pelo método de lavra a céu aberto. As operações neste tipo de lavra normalmente são sequenciadas através das seguintes etapas: perfuração, desmonte, carregamento e transporte.

O minério de ferro, como todas as commodities, está sujeito à lei da oferta e da demanda. Isso significa que, quanto maior a produção ao redor do mundo, menor será o seu preço. Consequentemente, quando a demanda por ele aumenta, elevam-se também os preços no mercado internacional. Nos últimos anos, o preço do minério de ferro tem passado por diversas oscilações, as quais levaram a uma necessidade constante de otimizar os custos em cada etapa do processo de extração, inclusive a etapa de perfuração. Reduzir as perdas produtivas tem se tornado estratégico para a sobrevivência do empreendimento minerador no mercado.

Na etapa de perfuração, máquinas denominadas perfuratrizes são responsáveis por realizar furos nas rochas, que posteriormente serão carregados com explosivos para o desmonte. Estas máquinas são equipamentos de extrema importância no seu ciclo operacional, sendo responsáveis pelo início do processo de lavra. Com isso, interrupções na operação desse tipo de equipamento têm impacto direto na produção de massa desmontada. Controlar anomalias do processo de perfuração é fundamental para se atingir as metas de produção estabelecidas. Essas anomalias podem estar relacionadas diretamente a todas as parcelas que compõem a OEE de perfuração.

A OEE (Overall Equipment Effectiveness) expressa a relação entre a eficiência da perfuração desde a performance do equipamento ao produto gerado, os furos na mina. Escrever 1 a 2 parágrafos comentando e citando trabalhos que apresentaram métodos relacionados a OEE citando os métodos e resultados obtidos. Dê preferência para trabalhos realizados nos últimos 5 anos (cite uns 5 pelo menos de maneira breve). Hoje no Complexo Ferrífero de Itabira, é cada vez mais importante garantir a ótima performance da OEE nos equipamentos aplicados na lavra

de minas, pois é um indicador estratégico devido ao seu impacto para toda cadeia produtiva, uma vez que mais de 80% do ROM (Run of Mine) do complexo de Itabira-MG é desmontado e as minas possuem geologia, por vezes bem peculiares e de longa extensão.

Com o intuito de buscar prováveis saídas as instabilidades no processo de perfuração do Complexo de Itabira, e obter futuras tomadas de ação em busca da eficiência na perfuração. O trabalho a ser desenvolvido tem como foco o pesquisar as anomalias dentro das variáveis de processos que envolvem o indicador macro OEE de perfuração, abordando os diferentes aspectos que pertencem o processo operacional de perfuração. O estudo contribuirá para um melhor entendimento das anomalias de forma a nortear possíveis ações e tomadas de decisão.

Este trabalho foi realizado com base de um embasamento teórico e prático com aplicabilidade de coletas de informações em campo e através de dados históricos armazenados nos sistemas gerenciadores do processo. Esta pesquisa tem uma alta relevância, uma vez que pode contribuir para estabilidade e otimização do indicador de processo trazendo benefícios para toda cadeia produtiva, e pode ser aplicado em todas as áreas afins da empresa, minimizando impactos, socioambientais, financeiro e produtivo.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Determinar as causas que afetam o indicador OEE na perfuração, tais como a disponibilidade física, utilização efetiva, produtividade e qualidade.

2.2 Objetivo específico

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

- Compreender o processo produtivo da organização estudada através do mapeamento de processos;
- Definir as ferramentas do método PDCA (Planejar, fazer, verificar, agir) que se enquadram no contexto desta pesquisa;
- Identificar as variáveis que impactam no processo de perfuração de rochas;
- Estratificar os indicadores de processo que impactam no indicador da OEE;
- Propor soluções com base nestes indicadores e no impacto destes nas variáveis da OEE, complexidade, custo e prazo;
- Estimar ganhos econômicos no processo com a implantação da metodologia PDCA

3 ESTADO DA ARTE DO INDICADOR DE OEE

Introdução:

O OEE tem sido amplamente utilizado em vários setores industriais, incluindo manufatura, automotivo, farmacêutico e alimentos e bebidas. Ele é utilizado para avaliar o desempenho dos equipamentos, identificar oportunidades de melhoria e aumentar a eficiência da produção. O OEE também pode ser usado para comparar o desempenho de diferentes equipamentos ou linhas de produção e monitorar o desempenho ao longo do tempo.

Conceitos e Definições:

O OEE é uma métrica de eficiência que leva em consideração três fatores principais: Disponibilidade, Desempenho e Qualidade. A Disponibilidade mede o tempo em que o equipamento está disponível para operar em relação ao tempo total disponível, o Desempenho mede a velocidade do equipamento em relação à velocidade teórica e a Qualidade mede a quantidade de produtos de qualidade produzidos em relação ao total produzido. O OEE é calculado multiplicando esses três fatores.

Métodos de Cálculo:

Existem vários métodos para calcular o OEE, incluindo o método padrão e o método simplificado. O método padrão é mais detalhado e leva em consideração todas as paradas e perdas do equipamento, enquanto o método simplificado é uma abordagem mais rápida que considera apenas a produção total e a produção de boa qualidade.

Aplicações:

O Indicador de OEE é amplamente utilizado em vários setores industriais, incluindo manufatura, automotivo, farmacêutico e alimentos e bebidas. Ele é utilizado para avaliar o desempenho dos equipamentos, identificar oportunidades de melhoria e aumentar a eficiência da produção. O OEE também pode ser usado para comparar o desempenho de diferentes equipamentos ou linhas de produção e monitorar o desempenho ao longo do tempo.

Conclusão:

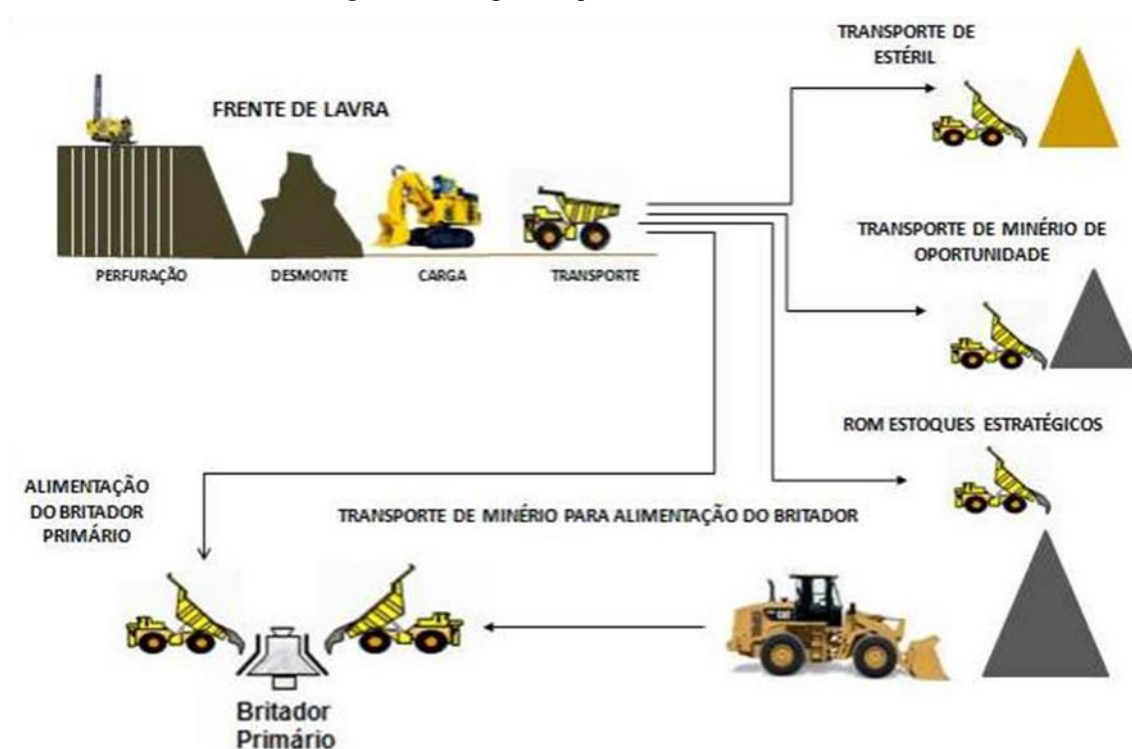
O Indicador de OEE é uma métrica importante para avaliar a eficiência dos equipamentos de produção e tem sido amplamente utilizado em vários setores industriais. Com a evolução das tecnologias de coleta e análise de dados, o OEE está se tornando cada vez mais preciso e útil para gerenciar a produção e otimizar o desempenho dos equipamentos. Com uma compreensão clara dos conceitos, métodos e aplicações do OEE, as empresas podem melhorar seu desempenho e aumentar sua eficiência.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Operações unitárias de uma mina a céu aberto

Segundo Cavadas (2012), durante as etapas de exploração de uma mina, o minério é extraído do solo através de operações unitárias que são integradas, sendo indispensável a realização de cada uma dentro do ciclo operacional. Estas etapas podem ser observadas na Figura 1.

Figura 1: Fluxograma típico de uma lavra a céu aberto



Fonte: CSN *apud* Rodovalho (2013).

Foi abordada cada etapa unitária de forma superficial e, posteriormente, dado um enfoque na atividade de perfuração, operação unitária chave para este trabalho acadêmico.

4.2 Perfuração e desmonte de rochas

De acordo com Jimeno et al. (2003) *apud* Mariano (2018), a primeira etapa dentro das operações unitárias da mina é a perfuração de rochas, onde se realizam furos no maciço rochoso em concordância a um planejamento alinhado à malha de perfuração. Esses furos são posteriormente carregados com explosivos para a iniciação do fogo. A detonação dos

explosivos proporciona a energia necessária para a desagregação do maciço rochoso. Segundo Alonso (2013) *apud* Mariano (2018) há uma relação intrínseca entre a perfuração e detonação, quando a perfuração é bem executada o resultado da detonação tenderá a ser satisfatório.

O desmonte de rocha, segundo Pontes (2013) *apud* Amorim (2019), pode ser definido como um agrupamento de processos utilizados para dar continuidade na desagregação de um volume de rocha estabelecido. O desmonte pode ser feito através dos métodos hidráulico, mecânico ou com explosivos. Para Amorim (2019), quando ocorre uma boa execução da perfuração e desmonte, resultados satisfatórios são atingidos como: uma boa fragmentação da rocha, diminuição de repés e matacos, taludes bem definidos e um bom controle de vibração e poeira.

4.3 Carregamento e transporte

As etapas de carregamento e transporte têm o objetivo de retirar e movimentar o material desmontado da frente de lavra até o local de despejo, como ilustrado na Figura 1. Os caminhões carregados por pás carregadeiras ou escavadeiras transportam o material até o local desejado para descarga. Diversas viagens são feitas pelos caminhões até que a frente de lavra esteja limpa e preparada para retornar à etapa de perfuração, o que ocorre de forma cíclica em uma mina (QUEVEDO, 2009).

4.4 Características da atividade de perfuração

A primeira etapa do processo de lavra que necessita de desmonte por explosivos consiste em perfurar a rocha para o carregamento dos furos. Estes furos consistem em uma abertura cilíndrica feita pela perfuratriz através de brocas que vão de encontro à rocha (SILVA, 2009). Para Gama (1977), para que a perfuração seja eficiente, algumas variáveis são importantes, dentre elas a litologia e as propriedades mecânicas da rocha, a perfuratriz utilizada na operação e as características do fluido de limpeza utilizado. Segundo Cavadas (2012), para originar um furo de perfuração, são necessários os seguintes trabalhos em uma perfuratriz:

- Percussão: movimento feito pelo pistão do martelo onde se transmite uma onda de choque à broca, no intuito de fragmentar a rocha;

- Rotação: movimento que gira a broca, fazendo com que os botões se reposicionem permitindo um impacto na área que ainda não foi fraturada;
- Avanço: força descendente que garante o contato constante da broca com a rocha durante a realização do furo;
- Limpeza: ação de retirada dos resquícios de rocha fragmentada (cavacos) no interior do furo, feito por um fluido de limpeza como água ou ar comprimido.

4.5 Métodos de perfuração

Segundo Mariano (2018), normalmente são utilizados três métodos de perfuração, tendo cada um deles suas aplicações e particularidades. Estes métodos são:

- Perfuração rotativa com broca tricônica;
- Perfuração rotopercussiva com martelo de fundo, DTH (Down the Hole);
- Perfuração rotopercussiva com martelo de superfície, Top Hammer.

Perfuração rotativa com broca tricônica:

Curiosamente, este método foi criado, segundo Silva (2009), para ser utilizado em perfuração de poços de petróleo. A atuação desse método é indicada para rochas menos competentes pois as características operacionais permitem maior eficiência nessas litologias uma vez que se aplica somente um vetor de força direcional e rotacional comprimento e cortando a rocha sem aplicação da percussão, que tem a função de fragmentar rochas mais compactas. Utiliza-se para tanto um tipo de broca específico conhecida como tricônica. O funcionamento desse método, conforme Figura 2, consiste na transmissão de energia na forma de rotação, que vem pela coluna de perfuração, mais a aplicação de uma força descendente até chegar na broca no fundo do furo.

Figura 2: Método de perfuração rotativa com broca tricônica



Fonte: Jimeno et al. (2003) *apud* Mariano (2018).

Perfuração rotopercussiva com martelo de fundo (*Down the Hole*)

Este método combina dois movimentos: percussão e rotação. A rotação é transmitida para a broca de perfuração através da haste, já a percussão é transmitida pelo pistão do martelo diretamente para a broca, conforme ilustrado na Figura 3. Esta combinação resulta na energia responsável pela fragmentação da rocha. A limpeza do furo é feita por meio de ar comprimido (MARIANO, 2018). Segundo Silva (2009), o martelo de fundo foi criado na década de 50 com intuito de alavancar a taxa de penetração em rochas mais compactas. Nesse método, o bit e o martelo mantêm-se sempre no fundo do furo, o que contribui para que a energia não seja dissipada ao longo da coluna de perfuração.

Figura 3: Método de perfuração rotopercussiva DTH



Fonte: Atlas Copco, 2012.

Perfuração rotopercussiva com martelo de superfície (*Top Hammer*)

Este método também combina dois movimentos como no DTH: percussão e rotação. O que diferencia um do outro é que no Top Hammer a percussão é aplicada pelo martelo fora do furo, sendo a energia transmitida através das hastes até chegar no bit (MORAIS, 2001). A Figura 4 ilustra a aplicação do martelo no topo da haste.

Figura 4: Método de perfuração rotopercussiva - Top Hammer



Fonte: Atlas Copco, 2012.

4.6 Acessórios de perfuração

São as ferramentas acopladas à coluna de perfuração onde é aplicada a energia que será transmitida para a rocha, permitindo a realização dos furos (GERALDI, 2011).

A seguir, serão abordados os tipos de ferramentas utilizadas na perfuração de minério de ferro.

Broca para o método rotopercussivo:

Para este método existem dois modelos de broca, de botões (bit) ou de pastilhas. O modelo mais usado na perfuração de rochas é a broca de botões, cuja superfície é revestida por metal duro do tipo carboneto de tungstênio. As brocas de pastilhas são posicionadas em “X” (CAVADAS, 2012). Os bits, também conhecidos por botões, têm uma melhor performance na perfuração rotativa com velocidades de avanço maiores e com isso, tendem a ter uma maior resistência ao desgaste pelas posições dos botões na broca (JARDIM, 2017). O diâmetro do bit

mais utilizado na mineração pelo método de lavra em bancadas está entre 51 mm e 250 mm. Alguns exemplos disponíveis são ilustrados na Figura 5.

Figura 5: Brocas de botões



Fonte: Sandvik (s.d.).

A Tabela 1 apresenta alguns tipos de botões existentes e sua respectiva aplicação em função da dureza da rocha e compressão axial resultante da perfuração.

Tabela 1: Tipos de botões para cada rocha

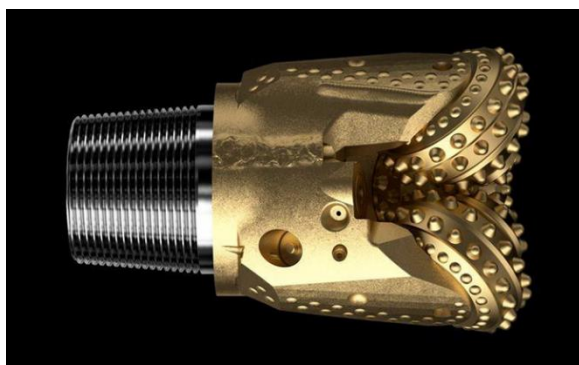
Formação Geológica	Formas do inserto	Forma do inserto	Aplicação	Resistência à Compressão
Macia		Dente Alongado	Perfura economicamente formações macias que podem ser perfuradas com brocas de dentes de aço. Máxima taxa de penetração com mínimo de força de avanço	0 - 10.000 psi / 0 - 69 Mpa
Média		Em forma de dente	Para formação média e pouco abrasiva. Alta taxa de penetração com baixa carga sobre a broca.	10.000 - 20.000 psi / 69 - 138 Mpa
Dura		Cônico	Para a formação dura e abrasiva. Requer alta carga sobre a broca.	20.000 - 40.000 psi / 138 - 276 Mpa
Muito Dura		Ovóide	Para formação muito dura e abrasiva, querendo altíssima força de avanço. Estrutura de corte durável e de longa vida.	40.000 - 100.000 psi / 276 - 689 Mpa

Fonte: Junior (2020).

Broca para método rotativo:

Segundo Karanam & Misra (1998) *apud* Silva (2009), para este método a broca utilizada é a tricônica, denominada assim devido à sua geometria em forma de três cones. A Figura 6 exemplifica o modelo de broca tricônica de botões.

Figura 6: Broca tricônica de botões



Fonte: Sandvik (2018).

Esse tipo de broca é constituído de três elementos principais: os cones, o rolamento e o corpo. Os elementos dos cones constituem-se de circunferências de dentes salientes ou botões (SILVA, 2009).

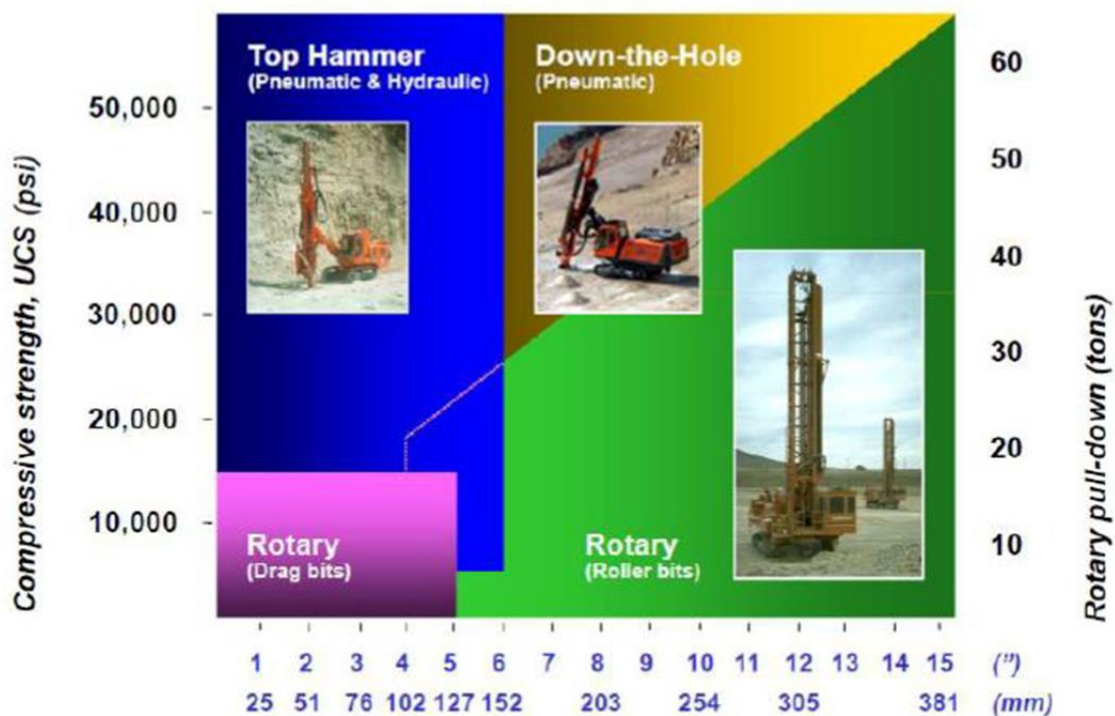
4.7 Desgaste dos acessórios

Desgaste é uma perda gradativa do material de uma superfície em um elemento causado pelo atrito contra uma outra superfície (GAHR, 1987 *apud* MORAIS, 2014). Segundo Jardim (2017), grande parte das brocas tem a tendência em perfurar mais lentamente à medida que os botões vão se desgastando. Normalmente esse desgaste se dá pela abrasão da broca contra o fundo da rocha e paredes do furo. Com o desgaste, a taxa de penetração tende a ficar cada vez menor devido à perda de afiação da broca, resultando em maiores esforços para perfurar. O desgaste da broca tem que ser acompanhado para não prejudicar todo o equipamento. (GERALDI, 2011).

4.8 Propriedades mecânicas das rochas

As propriedades mecânicas das rochas influenciam diretamente no desempenho da perfuração e no método utilizado. Na Figura 7, pode-se observar a relação entre a resistência à compressão axial da rocha, o diâmetro a ser perfurado e a força aplicada sobre a broca, vinculando estas variáveis aos métodos de perfuração disponíveis (JUNIOR, 2020).

Figura 7: Os quatro reinos da perfuração



Fonte: Junior (2020).

Segundo Jimeno *et al.* (2003), algumas propriedades mecânicas das rochas de maior influência são:

- Dureza;
- Resistência à compressão
- Abrasividade.

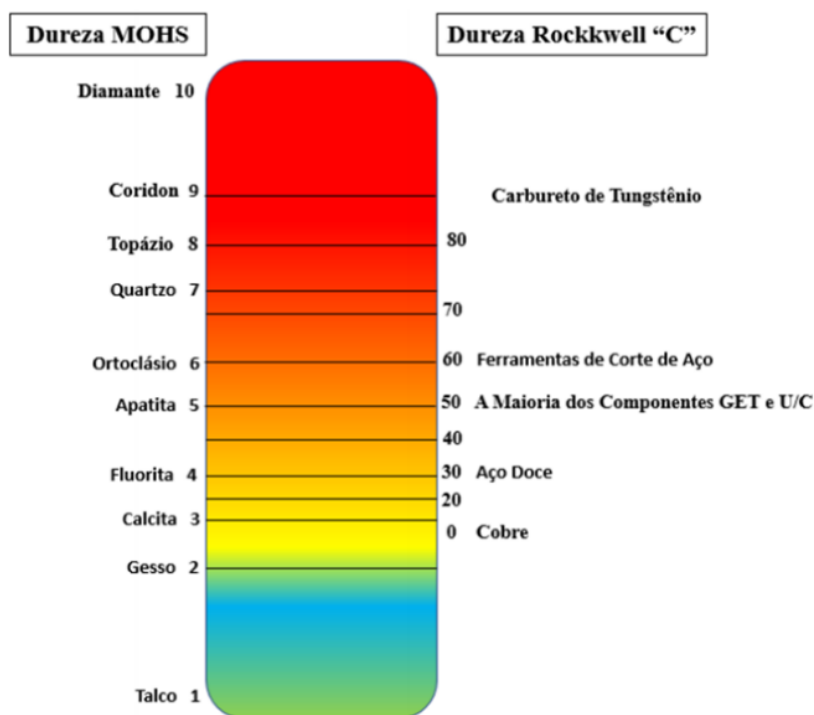
Dureza:

No contexto de perfuração, pode ser compreendido a dureza como a resistência de uma camada superficial de material à penetração de outro corpo mais duro. A dureza do maciço rochoso é o primeiro tipo de resistência a enfrentar durante a perfuração. Desse modo, quando ocorre a penetração da ferramenta na rocha a sequência da atividade ocorre mais facilmente (JIMENO *et al.*, 2003).

A escala de Mohs é utilizada para determinar a dureza dos minerais de forma individual, contudo, estabelecer a dureza de uma rocha é algo mais complexo, pois a dureza dos grãos

individuais dos minerais pode ser bem diversificada em comparação a rocha como um todo (CASTRO & PARRAS, 1986). A Figura 8, faz uma comparação entre a unidade de dureza Mohs utilizada para minerais, com a unidade de dureza Rockwell C utilizada para metais. Nesta escala pode-se observar também a elevada dureza dos carbonetos metálicos (tungstênio) utilizado como material das brocas de perfuração.

Figura 8: Classificação da dureza Mohs com a dureza Rockwell

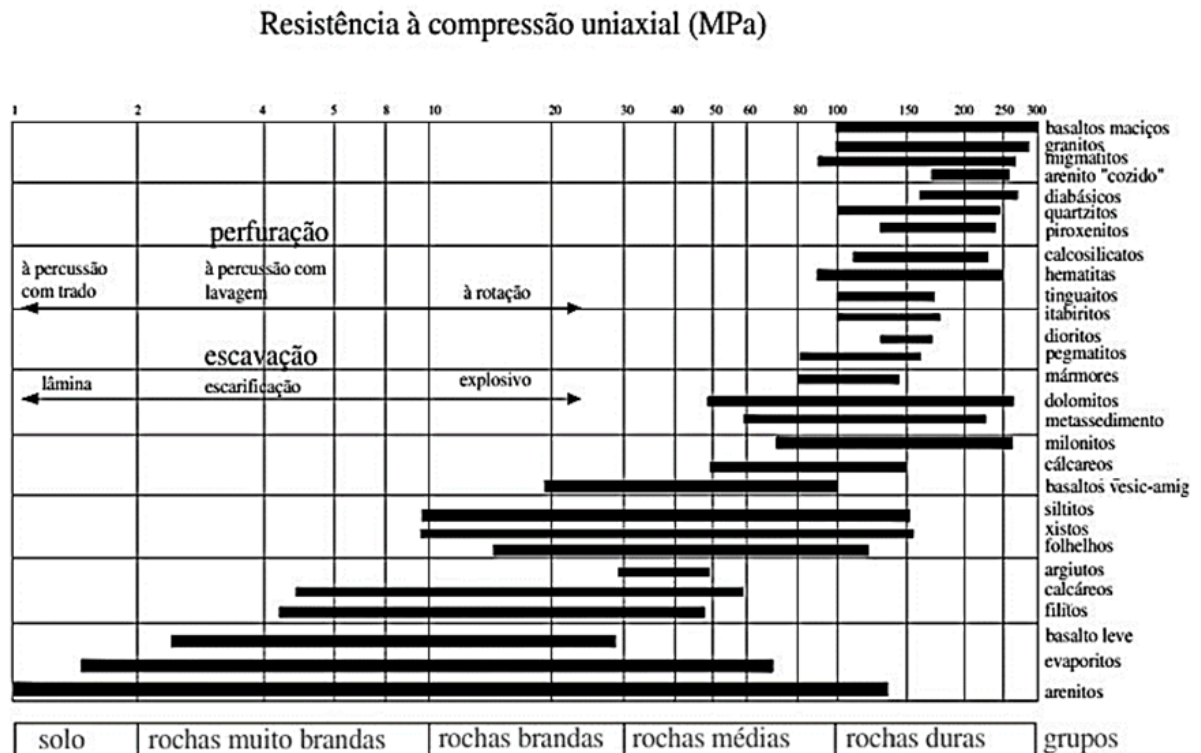


Fonte: Caterpillar (2000) *apud*. Jardim (2017).

Resistência à compressão

A resistência mecânica de uma rocha é a propriedade que se opõe à destruição desde uma força exterior, dinâmica ou estática. Segundo Jimeno et al., (2003) *apud* Jardim (2017), as rochas se compõem de vários minerais. Como mostrado na Figura 9 entre os minerais que integram as rochas, o quartzo é o mais duro, pois sua resistência ultrapassa os 500 Mpa, ao contrário dos silicatos ferromagnéticos e os alumínio silicatos que variam de 200 a 500 Mpa, e a calcita que alcança de 10 a 20 Mpa. As rochas de Itabiritos presentes no site minerador objeto de estudo, tem sua compacidade variando entre 250 a 400 Mpa, valores mensurados com base em análise químicas e mecânicas de fragmentação do ROM.

Figura 9: Resistência a compressão uniaxial de determinadas rochas.



Abrasividade

Para Jardim (2017), o poder abrasivo das rochas é decorrente da dureza, tamanho dos grãos, forma e sua porosidade. Isto pode-se exemplificar da seguinte forma:

- Forma dos grãos: os grãos agudos são mais abrasivos;
- Dureza dos grãos: as rochas que contêm grãos de quartzo são mais abrasivas;
- Porosidade da rocha: aumenta a rugosidade da superfície;
- Graus de heterogeneidade: as rochas que são mono minerais são menos abrasivas;
- Rocha de muitos grãos: quanto mais grãos existir na rocha mais eles se desagregam e se tornam mais abrasivos;
- Umidade: quanto mais úmida a rocha menor é a dureza e a abrasividade.

4.9 Indicadores de desempenho

Em todo processo produtivo é necessário o acompanhamento do desempenho das tarefas executadas, para que seja possível verificar se os objetivos que foram traçados pela instituição estão sendo alcançados. Esse desempenho pode ser medido através de indicadores, que são índices numéricos utilizados para traduzir a performance em algo de fácil interpretação. A partir dos resultados demonstrados pelos indicadores, as instituições podem focar seus esforços priorizando ações e suportando tomadas de decisão, além de direcionar procedimentos.

É importante ressaltar que indicadores de performance não são metas a serem alcançadas, contudo, existe uma forte relação entre as duas coisas. Para alcançar as metas estipuladas, primeiro é necessário quantificar a performance. Com números que refletem a realidade do que se está medindo é possível tomar decisões assertivas (TELES, 2018).

Na indústria de mineração, os indicadores de performance são fundamentais para estimar a capacidade produtiva, sobretudo, são a base para o correto dimensionamento da frota de equipamentos necessários para cumprir a produção planejada (BORGES, 2013). Para Pereira (2019), é possível inferir se os equipamentos estão entregando o que é esperado em termos produtivos versus o que é prometido pelos fabricantes.

A ocorrência de desvios no processo produtivo tem por consequência o não atendimento da produção pactuada para o momento esperado. Para os casos em que a produção é seriada, há um efeito em cadeia, onde o impacto na performance produtiva dos equipamentos posteriores é consequência de não conformidades ocorridas nos equipamentos anteriores (ARHENS, 2017).

Segundo Xavier (2013), vale mais ter poucos indicadores, de grande importância para seu acompanhamento. Nesta mesma filosofia, para este estudo, os indicadores de desempenho mais relevantes para o equipamento perfuratriz, foram divididos em dois grupos: no primeiro, os indicadores de desempenho relevantes para manutenção; já no segundo, os indicadores de desempenho relevantes para a operação. Estes indicadores foram detalhados a seguir.

4.9.1 Indicadores de manutenção

A parcela do desempenho dos equipamentos que está vinculada à atuação do setor de manutenção é vista com grande importância nos grandes empreendimentos. Para garantir a

competitividade em nível de classe mundial e permanecer no mercado com uma participação estável ou crescente, a produção deve ocorrer com custos controlados. Neste sentido, a manutenção torna-se uma área vital para garantir a redução de custos de produção (XAVIER, 2013).

O setor de manutenção é o responsável por garantir a disponibilidade e a confiabilidade dos equipamentos. O que se espera da manutenção, segundo Kardec & Nascif (2009), é garantir uma maior disponibilidade e confiabilidade com o menor custo possível. Um paradigma moderno é que a manutenção precisa se estruturar para garantir que as paradas de produção ocorram somente de forma planejada, o que na prática não ocorre sempre desta maneira. Para Menezes e Almeida (2002) apud Pereira (2019), alguns indicadores se destacam na avaliação da performance da manutenção. Estes indicadores são:

- Disponibilidade física:

Existem diferentes abordagens e formas de utilizar o indicador de disponibilidade. Normalmente, a forma mais utilizada pelas empresas é conhecida como disponibilidade física, que considera o tempo total de horas de manutenção, independente do motivo, ou seja, preventiva, corretiva dentre outras. Quanto maior a disponibilidade física, melhor.

Para Kardec e Nascif (2009), um equipamento que falhou e está inoperante contabiliza para o custo devido à perda produtiva. Isto acontece porque existe a interrupção de uma atividade produtiva que já estava planejada e não foi cumprida. Quando se trata de uma perfuratriz, o impacto negativo pode ser relacionado à massa de minério não desmontada. A forma de calcular a disponibilidade física (DF) é dada, segundo Menezes e Almeida (2002) apud Pereira (2019), levando-se em consideração todo o tempo gasto em manutenções corretivas e preventivas nos equipamentos. Pode-se compreender a DF como o percentual de tempo em que o equipamento esteve disponível para operar em relação ao tempo total disponível que existia. A expressão matemática para DF é dada conforme a Equação 1

$$DF = \frac{HC - HM}{HC} * 100 \quad (1)$$

Onde:

DF = Disponibilidade física em percentual;

HC = Horas calendário, ou total de horas do período considerado;

HM = Horas de manutenção, considerando o somatório de horas de manutenção preventiva e corretiva.

- Tempo médio entre falhas:

Mais conhecido como MTBF (do inglês - Mean Time Between Failures), é um indicador que reflete a confiabilidade, portanto, quanto maior o MTBF melhor, ou mais confiável é o equipamento.

É uma métrica utilizada para itens reparáveis, ou seja, aqueles que quando acometidos de uma falha, são passíveis de reparo para reestabelecimento de sua função (KARDEC & NASCIF, 2009). Para melhor entendimento deste indicador, faz-se necessário compreender bem o conceito de confiabilidade. Segundo Kardec & Nascif (2009), confiabilidade é uma medida probabilística. Aplicando o conceito, a confiabilidade de uma perfuratriz pode ser entendida como a probabilidade de ela desempenhar bem suas funções, observando os padrões de performance que se espera num dado período.

A forma de calcular o MTBF é dada segundo Lafraia (2001) apud Pereira (2019) pela Equação 2:

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n HT}{N^{\circ} \text{ de falhas}} \quad (2)$$

Onde:

MTBF = Tempo médio entre falhas, dado em horas;

HT = Horas trabalhadas;

Nº de falhas = Quantidade de paradas não programadas do equipamento devido a necessidade de realizar manutenções corretivas.

- Tempo médio de reparo:

mais conhecido como MTTR (do inglês - Mean Time to Repair), é um indicador que reflete a performance da manutenção. Ele está diretamente associado à manutenibilidade, que

determina quão fácil é executar um serviço de manutenção no equipamento (KARDEC & NASCIF, 2009). De acordo com Pereira (2019), quanto menor o MTTR melhor, visto que este indicador está intimamente associado à disponibilidade física do equipamento.

Segundo Kardec e Nascif (2009), o MTTR estaria associado ao tempo efetivo gasto na atividade de reparo de um equipamento, ou seja, não consideraria outras categorias de tempo inerentes à atividade de manutenção, como: atrasos por falta de material ou ferramentas, deslocamento até a frente de serviço, dentre outras.

Na mina, é comum generalizar a interpretação, e desde que a perfuratriz esteja parada realizando uma manutenção corretiva, normalmente considera-se todo o tempo gasto para reestabelecer o seu pleno funcionamento, mesmo que ele seja comprometido por aguardo de suprimentos, logística ou outros recursos necessários para novamente disponibilizá-la ao sistema produtivo. A forma de calcular o MTTR é dada segundo Lafraia (2001) *apud* Pereira (2019) pela Equação 3:

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n HMNP}{N^{\circ} \text{ de falhas}} \quad (3)$$

Onde:

MTTR = Tempo médio de reparo, dado em horas;

HMNP = Horas de manutenção não programadas, ou o somatório de horas de manutenção corretiva a que o equipamento foi submetido;

Nº de falhas = Quantidade de paradas não programadas do equipamento devido a necessidade de realizar manutenções corretivas.

- Número de ocorrências (NIC):

Conhecido internamente na empresa como NIC (número de intervenções corretivas), talvez este indicador seja o de mais fácil compreensão. O número de ocorrências reflete diretamente a quantidade de falhas, ou manutenções corretivas no período analisado (PEREIRA, 2019), por este motivo, quanto menor seu valor, melhor. O número de ocorrências, por ter o mesmo significado do denominador (nº de falhas) das fórmulas de cálculo de MTBF e MTTR, acaba sendo intimamente ligado a estes outros indicadores, e seu acompanhamento

na mina é normalmente feito para acompanhar tendências de redução, estabilidade ou aumento nas paradas não programadas da perfuratriz frente ao sistema produtivo.

4.9.2 Indicadores de operação:

Todo empreendimento visa o maior lucro admissível, e para que isso aconteça, a produção deve ser a maior possível com o menor custo. Com o processo de perfuração de rocha em uma mina não é diferente (JUNIOR, 2020). Na busca por uma produção cada vez mais enxuta, procura-se mitigar ao máximo as margens de erro e gastos desnecessários, fazendo com que também os fabricantes de equipamentos de mineração construam máquinas operacionalmente mais seguras e eficientes (MIRANDA *et al.*, 2016). Borges (2013) demonstra como os indicadores de operação são importantes, visto que uma pequena variação nestes indicadores pode aumentar ou reduzir a quantidade de equipamentos necessários numa frota de mina a céu aberto.

Para Junior (2020), a operação de perfuração de rochas em uma mina é uma das atividades mais complexas, e por utilizar máquinas e ferramentas de alto custo deve ser bem estudada para garantir uma correta aplicação e excelentes resultados. Segundo Guazzelli (2013), diversos fatores influenciam na atividade de perfuração, sendo os principais a litologia do local perfurado e as características do tipo de equipamento, inclusive sua disponibilidade, já mencionada.

No processo de perfuração é envolvido um grande consumo de dispositivos como: bits, hastes, martelo e demais acessórios da coluna de perfuração e, uma vez que estes dispositivos sofrem impacto direto durante a atividade, são constantemente trocados, o que influencia diretamente no tempo improdutivo da perfuratriz.

Alguns indicadores são comumente utilizados para acompanhar a performance da operação de equipamentos de mina. Borges (2013) elenca alguns destes indicadores:

- Utilização física:

Segundo Borges (2013), este indicador mensura, em relação ao tempo disponibilizado de um equipamento, o quanto ele foi utilizado efetivamente, dado pelo percentual do tempo de

operação em relação ao tempo em que o equipamento esteve disponível para operar. Entendendo que o objetivo da mina é produzir ao máximo, pode-se inferir que quanto maior o este indicador melhor.

A forma de calcular a utilização é dada segundo Borges (2013) pela Equação 4.

$$UF = \frac{HT}{Hp - MH} \quad (4)$$

Onde:

UF = Utilização em percentual, também conhecida como utilização física ou UF; HT = Horas trabalhadas efetivamente no período analisado;

HP = Horas produtivas disponíveis no período analisado, também conhecida como HC ou horas calendário.

HM = Horas de manutenção, independentemente de sua natureza, seja ela corretiva ou preventiva.

Contextualizando algumas razões que Borges (2013) aponta como influência direta no indicador de utilização, temos como impacto neste indicador para a atividade de perfuração:

- Paralisação de outras perfuratrizes, que por um motivo qualquer estavam planejadas para serem utilizadas, mas não foram transferindo esta demanda para outra perfuratriz aumentando sua utilização;
- Tempo gasto para preparação das frentes de lavra, por vezes necessário que perfuratrizes de grande porte fiquem aguardando condições de acesso à praça de perfuração;
- Tipo de desmonte de rocha, no caso de desmonte por explosivos em rochas mais brandas ou mais competentes, correlaciona-se as propriedades mecânicas da rocha, o que culmina em um maior ou menor necessidade de paradas na produção para troca de ferramentas desgastadas.

- Rendimento operacional:

O rendimento operacional RO é um indicador que consolida a performance da manutenção e a operação. Segundo Borges (2013), o rendimento é dado pelo produto da disponibilidade física pela utilização física. Entende-se por consequência que, quanto maior o seu valor, melhor.

De acordo com o conceito de RO dado por Borges (2013), pode-se inferir a forma de calculá-lo através da equação 5:

$$RO = DF * UF \quad (5)$$

Onde:

RO = Rendimento operacional em percentual;

DF = Disponibilidade física em percentual;

UF = Utilização física em percentual.

Para melhor entendimento, o RO pode ser compreendido como a relação entre as horas efetivamente trabalhadas por uma perfuratriz dentro da quantidade de horas que havia possibilidade de ela operar no mesmo período.

- Produtividade:

O indicador de produtividade reflete a produção média de um equipamento em função do tempo, e no caso da mineração, normalmente expressa a massa movimentada em determinado período (PEREIRA, 2019).

Com base no argumento de Junior (2020) em que o empreendimento capitalista visa o maior lucro admissível, e para que isso aconteça a produção deve ser a maior possível, não é difícil concluir que quanto maior este indicador melhor.

A forma de calcular a produtividade é dada segundo Borges (2013) pela Equação 6:

$$TAXA DE PERFURAÇÃO = \frac{COMPRIMENTO DO FURO}{TEMPO DE PERFURAÇÃO} \quad (6)$$

Onde:

TAXA DE PERFURAÇÃO = velocidade para execução do furo em metros por hora;

COMPRIMENTO DO FURO = tamanho do furo em metros, considerando a altura total da bancada mais sub furação;

TEMPO DE PERFURAÇÃO = tempo necessário para realização de um furo em horas

Definição de taxa de perfuração: é uma medida de desempenho que quantifica a quantidade de furo em metros por unidade de tempo. É frequentemente utilizada na indústria de perfuração para avaliar o desempenho da perfuratriz, da equipe de perfuração e da formação geológica sendo perfurada. A taxa de perfuração é expressa em pés ou metros por hora, dependendo da unidade de tempo utilizada. Uma taxa de perfuração mais alta indica uma perfuração mais eficiente e, portanto, um desempenho melhor.

Guazzelli (2013) indica que na prática é comum calcular a taxa de perfuração pelos dados apropriados nos sistemas, onde é feita uma razão entre o comprimento total perfurado pela quantidade total de furos realizados na praça. Neste caso, estaria sendo contabilizado para a taxa de perfuração, parcelas de tempo que não tem a ver com a execução do furo propriamente dita, como o tempo de descolamento da perfuratriz entre os furos.

4.10 Metodologia Seis Sigma - Contextualização; aplicações e vantagens

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

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

abordagem estatística e estratégica, o Seis Sigma deve ser implantado somente se houver um plano de ações para melhoria da qualidade desenvolvido e orientado aos objetivos da empresa.

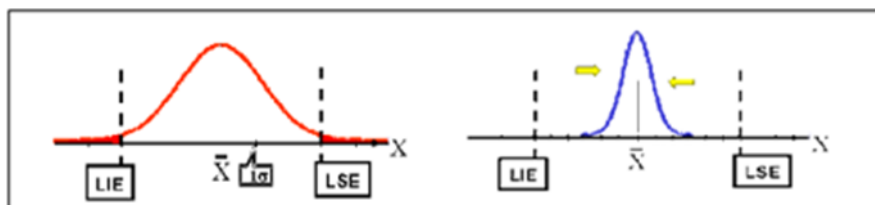
Em síntese, o Seis Sigma é uma metodologia sistemática, voltada para negócios, que gera um aumento significativo de rentabilidade via ganhos dos produtos, garantia de qualidade, satisfação do cliente e produtividade. Tem como objetivo principal conquistar zero erros na performance da empresa, obtendo um nível mínimo de falhas na produção (TÁVORA, 2009). São benefícios dessa metodologia que a tornam atrativas (SANTOS; MARTINS, 2008):

- Aumento da eficiência dos processos de produção com a redução dos custos associados com inspeção, retrabalho, insatisfação dos clientes e desperdício; foco em processos;
- Melhoria contínua;
- Foco no cliente;
- Mudança de cultura;
- Redução da variação e comprometimento.

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

O Seis Sigma consiste em melhoria dos processos, reduzindo a variabilidade até um nível de 3,4 ppm – partes por milhão (6 desvios padrão) da média até a especificação superior ou inferior (SCATOLIN, 2005). A Figura 10 apresenta a demonstração ilustrativa dessa redução de variabilidade:

Figura 10: Processos: Original e com Variação Reduzida



Fonte: Scatolin (2015).

Sigma, letra grega σ , é utilizada para medir a variabilidade de um processo, mediante o cálculo do desvio padrão, feito conforme a seguinte Equação 7:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (7)$$

Onde:

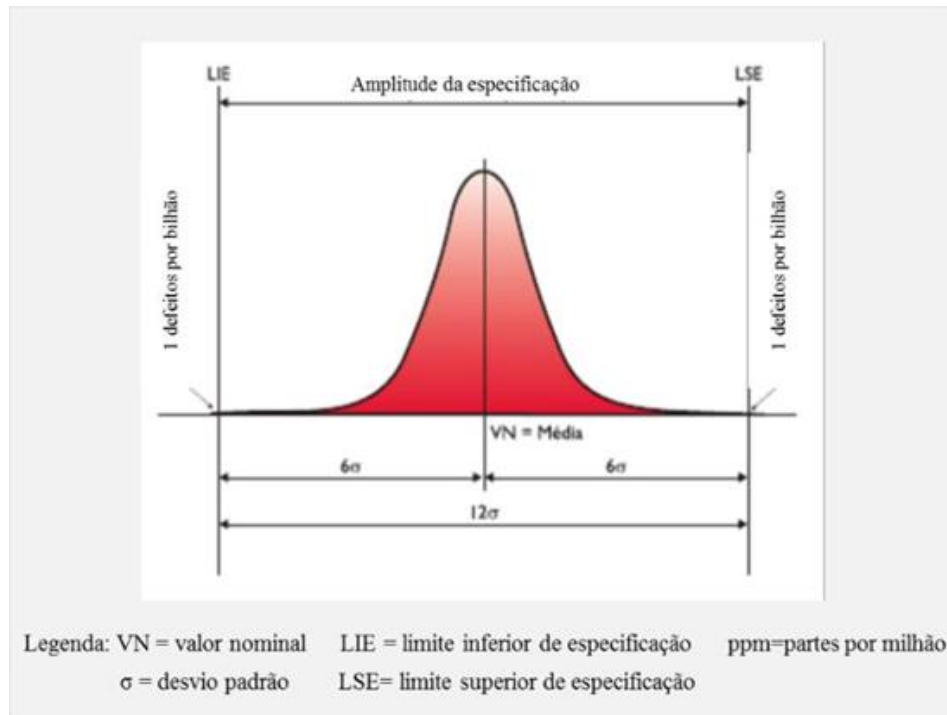
X_i = resultado individual do processo;

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

n = número de resultados avaliados.

Werkema (2012) afirma que para ter significado, a análise do desvio padrão de um processo deve ser comparada com alguma referência e, que, quando comparado com os limites de especificações, surge à escala Sigma, que mede a qualidade do processo. Ainda segundo Werkema (2012), um processo centralizado, onde o valor nominal é igual à média dos dados, com nível de desempenho Seis Sigma, ocorre quando a distância entre a média e o limite inferior/superior de especificação é igual a 6. Afirma-se que, nessa condição, o número de defeitos por bilhão é igual a dois. Abaixo, na Figura 11, pode-se verificar tal comportamento:

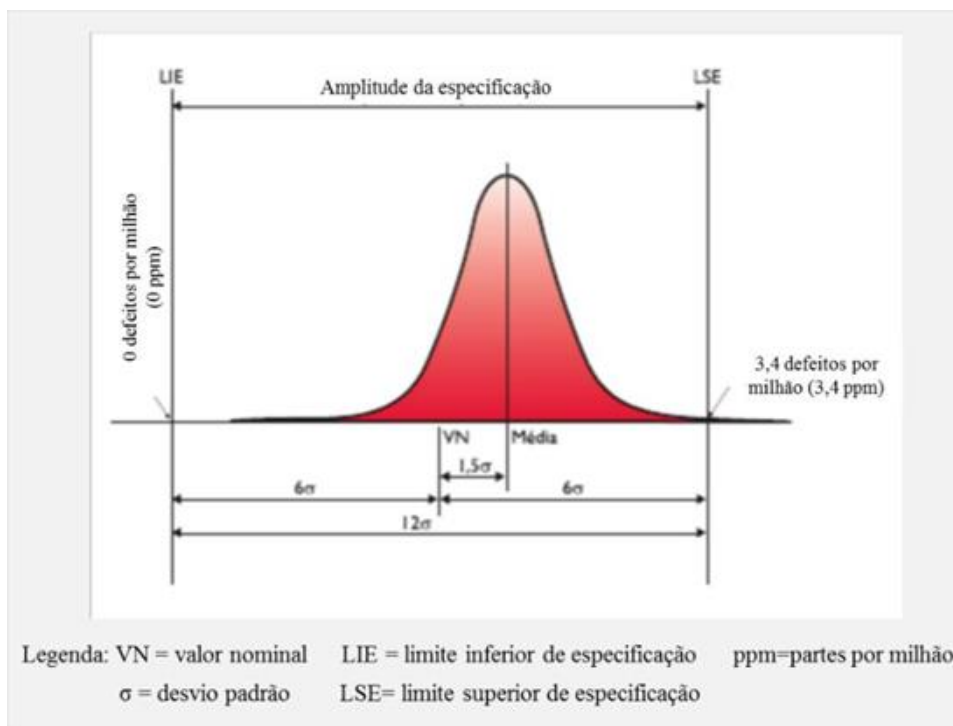
Figura 11: Significado da qualidade Seis Sigma – Curto prazo



Fonte: Adaptado de Werkerma (2012).

Porém, conforme Rotondaro *et al.* (2002) é complexo manter um processo centralizado em longo prazo. Dessa forma, admite-se que o nível Seis Sigma em longo prazo se desloca até 4,5 desvios padrões entre a média e o limite inferior/superior de especificação, o que pode ser visualizado na Figura 12. Nessa situação, o número de defeitos em Partes Por Milhão (PPM) passa a ser 3,4.

Figura 12: Significado da qualidade Seis Sigma – Longo prazo



Fonte: Adaptado de Werkema (2012).

Segundo Rotondaro *et al.* (2002), o nível sigma mede a capacidade do processo em atuar sem falhas, de forma que quanto menor o nível sigma maior a quantidade de defeitos por milhões. Tal relação pode ser analisada na Tabela 2:

Tabela 2: Escala Sigma (longo prazo) x Defeitos por milhão x Nível de Qualidade

Escala sigma	Defeitos por milhão (ppm)	Nível de qualidade (%)
1 sigma	691462	30.9
2 sigma	308537	69.1
3 sigma	66807	93.3
4 sigma	6210	99.38
5 sigma	233	99.977
6 sigma	3.4	99.99966

Fonte: Adaptado de Werkema (2012).

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

5 METODOLOGIA

5.1 Caracterização do Objeto de Estudo

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

5.2 Estudo de caso

Para a realização da coleta de dados da pesquisa, foi estabelecido como base histórica do projeto o comportamento do indicador de OEE de perfuração no ano base de 2020/2021 do complexo minerador de Itabira, com comportamento geológico complexo de formação ferrífera heterogênea com abundância em Itabiritos, rochas com alto grau de dureza muito complexas para a perfuração.

As minas do complexo Itabira, MG são bem próximas a cidade de Itabira, MG, alguns bairros chegam a margear os acessos as cavas, questão muito crítica para exploração mineral.

Figura 13: Mapa complexo minerador de Itabira.



Fonte: Google Earth.

O projeto teve o foco nas perfuratrizes de grande porte do complexo com uma frota de 14 máquinas no período estudado, a frota era dividida entre perfuratrizes convencionais e perfuratrizes autônomas sendo 7 máquinas de cada modelo, a grande diferença entre ambos os modelos são o fato de que as máquinas autônomas realizam as tarefas com etapas automáticas com decisões baseado em algoritmos com precisão do sistema GPS e não são tripuladas .

5.3 Etapas da metodologia

A metodologia aplicada a este estudo pode ser observada através do fluxograma representado na Figura :

Figura 14: Fluxograma representativo da metodologia aplicada a este projeto.



Fonte: Autor.

1ª Etapa (Levantamento dos dados): Para levantamento dos dados pertinentes a pesquisa, como os indicadores secundários, o sistema Devex – EXAGON foi utilizado, software

de controle dos indicadores de performance da frota de perfuração, o qual fornece dados históricos e online dos seus principais indicadores operacionais. A metodologia utilizada para melhoria do processo é o Seis Sigma, para a realização do método, seguiu-se o método PDCA como direcionador das atividades, conforme fases abaixo (Figura):

Figura 15: Fases do método PDCA/DMAIC



Fonte: Instituto VALER – Vale S/A.

2ª Etapa (Análise estatística): Etapa que se dá pelo detalhamento estatístico e gráfico do indicador. De modo que seja possível identificar variações do indicador ao longo de um determinado período e avaliar elementos e padrões que possam estar relacionados às variações identificadas.

3ª Etapa (Definição dos ganhos): Determinar a meta com base nas variações do indicador afim de atingir o melhor resultado em situações de menor desempenho. Determinar ganho financeiro. A análise do indicador principal se dá pelo detalhamento estatístico e gráfico do indicador. De modo que seja possível identificar variações do indicador ao longo de um determinado período e avaliar elementos e padrões que possam estar relacionados às variações identificadas.

4ª Etapa (Análise do fenômeno/processo): A análise do indicador e identificação dos subindicadores. O intuito é identificar o quanto cada subindicador pode influenciar no

desempenho e variação do indicador principal, e assim, levantar as causas do comportamento do indicador.

5ª Etapa (Comprovação das causas): Nesta etapa se evidencia os estudos para comprovação de impactos gerados pelas causas priorizadas na etapa anterior, para que seja evidenciado foram geradas análises, comprovações por imagem de anomalias físicas entre outras formas de evidenciação.

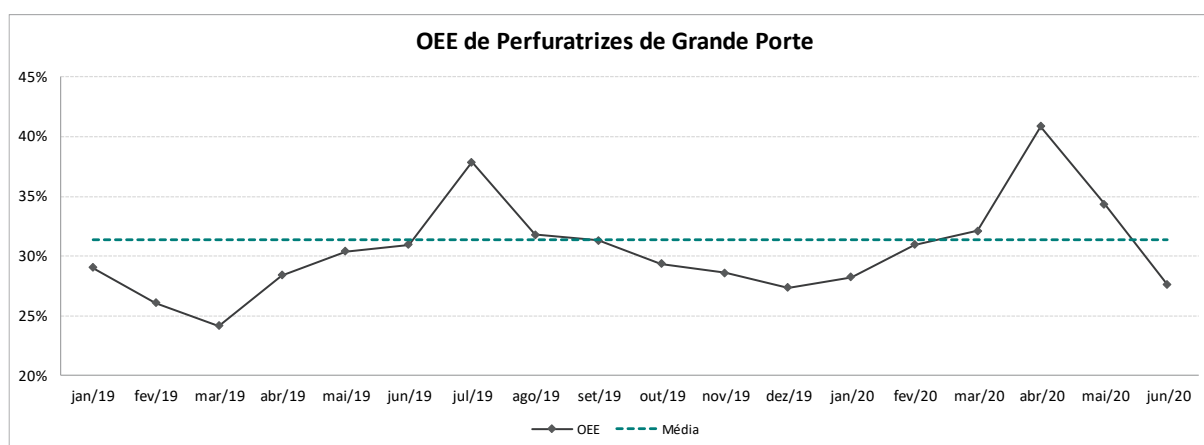
6ª Etapa (Ação): Comprovadas as causas, a última etapa se dá pela aplicação de ações que permitam corrigir, melhorar o resultado com o intuito de atingir a meta estipulada na 3ª Etapa.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Detalhamento do indicador principal

Para melhor entender o indicador de OEE de perfuração (%), foi realizado um levantamento dos dados históricos mensais de janeiro 2020 a junho de 2021 (baseline), elaborando um gráfico em série temporal para representação dos valores obtidos (Figura 14).

Figura 14: Análise Histórica do Indicador OEE de perfuração de grande porte



Fonte: VALE (2021).

Realizado ainda a análise descritiva, que apresenta dados importantes em relação ao indicador como a média, quartis, mínimo máximo e desvio padrão (Tabela 3).

Tabela 3: Análise descritiva do indicador OEE entre Jan/19 e Jun/20

Nº de dados	Média	Desv. Padrão	Min	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo	Amplitude
18	31.40%	4.10%	26%	28.20%	30.90%	33.20%	40.90%	14.90%

Fonte: Autor.

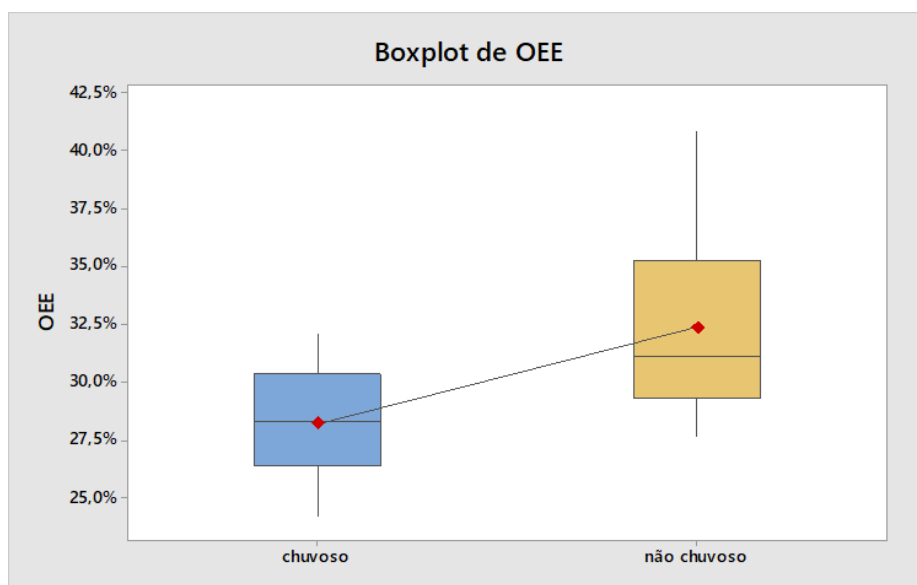
Após análise do gráfico e da análise descritiva, pode-se afirmar que a OEE durante jan./19 a jun./20, variou entre 26,0% e 40,9%, com média igual a 31,4%. Pelo 3º quartil, 25% dos valores de OEE são iguais ou maiores que 33,2%.

Historicamente, a OEE a partir de jul./19 apresentou comportamento de queda que se estendeu até jan./20, isso se deve em parte por baixo rendimento operacional da frota de perfuratrizes bem como impacto causado pelo período chuvoso (alto índice pluviométrico). A

partir de fev./20 houve uma melhoria no indicador que se sustentou até abr./20. Porém, a partir de mai./20 houve novamente comportamento de queda em função do cenário da pandemia COVID-19, alto índice de absenteísmo. Observa-se que há diferença na performance da OEE por período.

Ao avaliar a OEE durante o período considerado como não chuvoso, foi observada uma média igual a 32,5%, mas também uma maior variação de 4,2% (desvio padrão). Já o período chuvoso possui uma média de OEE igual a 28,3%. Através desta análise percebe-se que há sazonalidade no indicador por isso se fez necessário uma análise gráfica separada por períodos conforme gráfico BloxPlot apresentado na Figura .

Figura 17: Boxplot do Indicador de OEE em 2020/2021



Fonte: Autor.

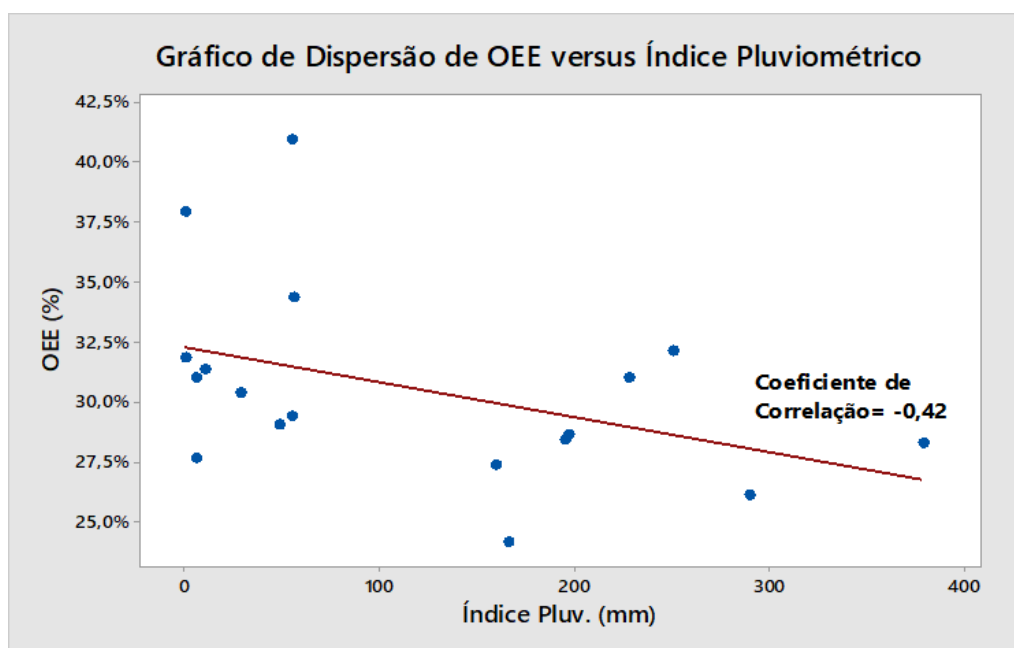
Observa-se que há diferença na performance da OEE por período de forma estatística (valor- $p < 0,10$). A OEE durante o período considerado como não chuvoso possui uma média igual a 32,5%, mas também uma maior variação também 4,2% (desvio padrão). Já o período chuvoso possui uma média de OEE igual a 28,3%.

Para comprovar a hipótese foi realizada a correlação entre a OEE x Índice Pluviométrico, e notou-se uma correlação linear significativa de -0,42. Ou seja, à medida que chove mais, em geral, há um valor menor para a OEE. Foi feita também uma análise histórica para avaliar os indicadores que compõe a OEE por período categorizado como chuvoso / não

chuvoso. Para classificação foi estabelecido um ponto de corte para o índice de pluviometria mensal acumulado.

- **Até 80 mm:** Período não chuvoso (jan/19, mai/19 a out/19, abr/20 a jun/20)
- **Acima de 80 mm:** Período chuvoso (fev/19 a abr/19, nov/20 a mar/20)

Figura 15: Gráfico de correlação pluviometria X OEE



Fonte: Autor.

6.2 Definição da meta

Para estabelecimento da meta geral foram analisados em conjunto os indicadores que compõem a OEE similarmente ao que foi realizado para a OEE, foi categorizado o período entre chuvoso e não chuvoso para cada um dos indicadores e confirmado se havia diferença estatística entre esses períodos. Finalmente, foram avaliadas propostas de metas para cada um desses indicadores (exceto DF) e ao final, o aumento total esperado será o esperado para a meta geral (Figura 16).

Figura 16: Gráfico meta por período

CENÁRIO: CHUVOSO							CENÁRIO: NÃO CHUVOSO						
	OEE (%)	UF (%)	DF (%)	Taxa (%)	Acertos (%)	Metros Perfurado		OEE (%)	UF (%)	DF (%)	Taxa (%)	Acertos (%)	Metros Perfurado
Patamar Atual	28,3%	65,3%	52,5%	92,6%	89,2%	51473	Patamar Atual	32,5%	67,5%	56,5%	96,0%	88,8%	59108
Benchmark		69,2%		105,0%	92,8%		Benchmark		73,4%		107,7%	95,8%	
Lacuna		3,9%		12,3%	3,6%		Lacuna		5,9%		11,6%	7,0%	
% da Lacuna		2,5%		2,5%	0,9%		% da Lacuna		4,1%		2,3%	1,8%	
Meta	30,5%	67,8%	52,5%	95,1%	90,1%	55446	Meta	36,0%	71,6%	56,5%	98,4%	90,5%	65516
% Esp. Aumento	7,7%	3,9%	0,0%	2,7%	1,0%		% Esp. Aumento	10,8%	6,1%	0,0%	2,4%	2,0%	
3º Quartil	30,4%	68,2%	54,8%	98,1%	92,4%		3º Quartil	35,2%	70,0%	59,1%	101,8%	94,0%	

Fonte: Autor.

6.2.1 Cálculo do ganho financeiro previsto no projeto:

Para estabelecer os ganhos apurados pelo projeto foi estabelecida uma correlação direta com o aumento da performance da frota de perfuração de grande porte, esta correlação foi estabelecida com base nos metros perfurados indicador chave do processo, assim pode se calcular através da diferença oriundo do aumento da performance geral OEE estabelecida através da meta geral quantos metros perfurados seriam aumentados anualmente com a mesma frota, esse valor multiplicado pelo custo projetado por metro demonstra o ganho potencial do projeto conforme imagens seguinte.

Indicador Principal do Projeto:	OEE
Período Baseline (data):	01/01/2019 a 30/06/2020
Valor do Indicador no Baseline:	28,3%
	32,5%
	Período Chuvoso
	Período Não Chuvoso
Valor da Meta do Projeto:	30,5%
	36,0%

Fonte: Autor.

Período Chuvoso - Tipo	Ganho PREVISTO - Período de Verificação	Ganho PREVISTO - Anualizado
Potencial		R\$ 1.313.625,41
Real		
Período Não Chuvoso - Tipo	Ganho PREVISTO - Período de Verificação	Ganho PREVISTO - Anualizado
Potencial	R\$ 1.601.801,23	R\$ 19.221.614,73
Real	R\$ -	R\$ -

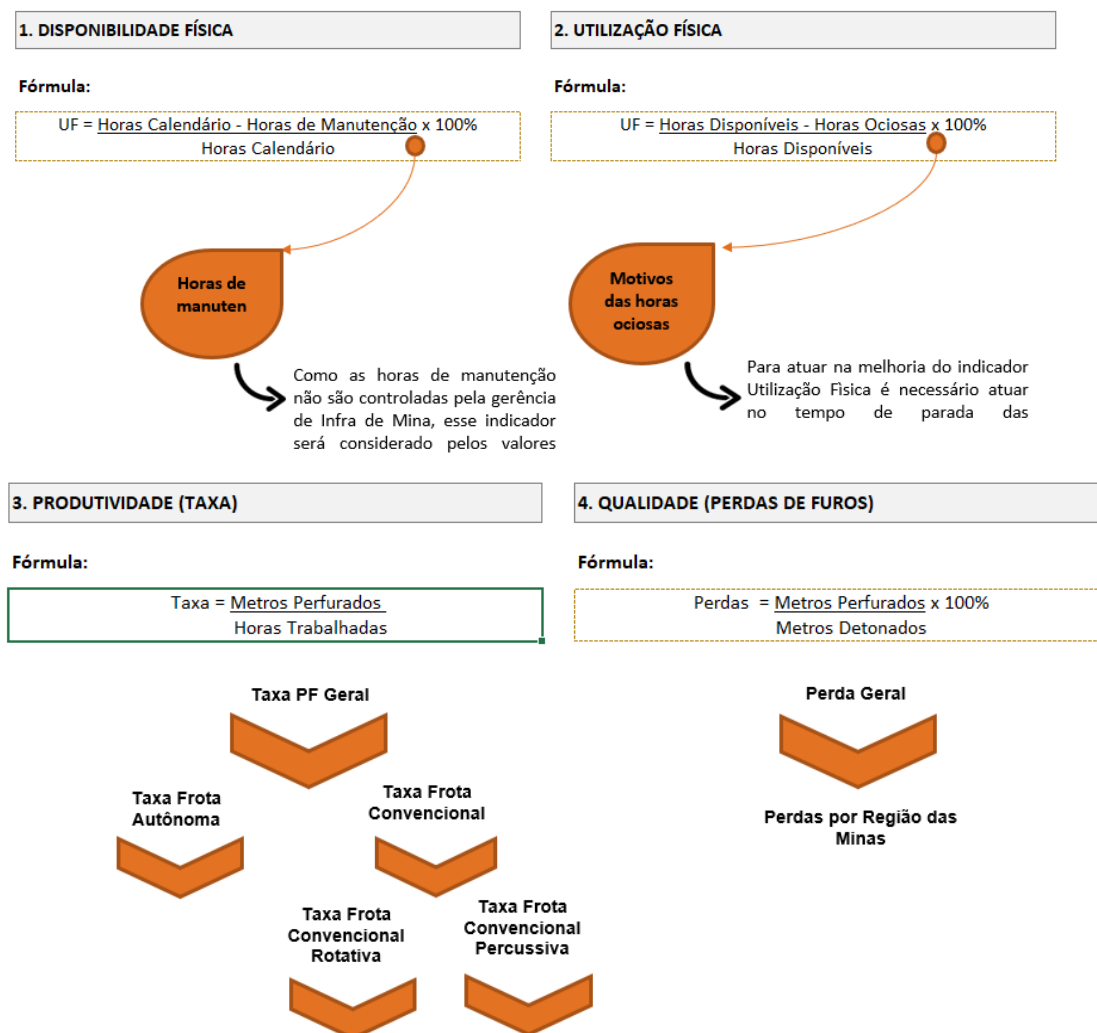
Fonte: Autor.

6.3 Análise do fenômeno

Ao estratificar o indicador global OEE em sub “KPI (*Key Performance Indicators*)”, os subindicadores identificados para OEE da perfuração são: Utilização física; disponibilidade física; taxa de perfuração e o indicador de qualidade perdas de furos, a Figura demonstra como foi elaborada a estratificação por indicadores.

- Fator rendimento operacional (RO) na parcela do OEE se dá pelas parcelas de DF e UF.
- Fator produtividade na parcela do OEE se dá pela Taxa global de perfuração.
- Fator de qualidade na parcela do OEE se dá pela perda de furos no processo operacional.

Figura 20: Estratificação por subindicador

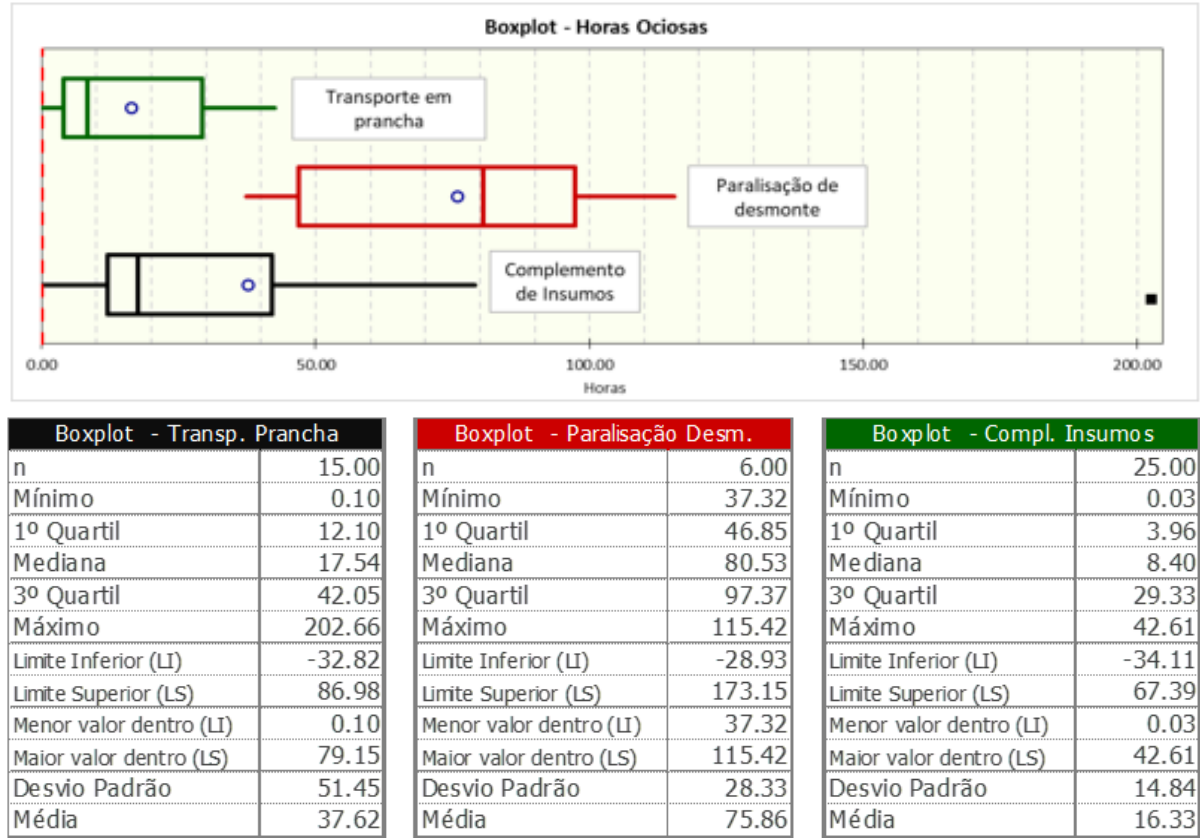


Fonte: Autor.

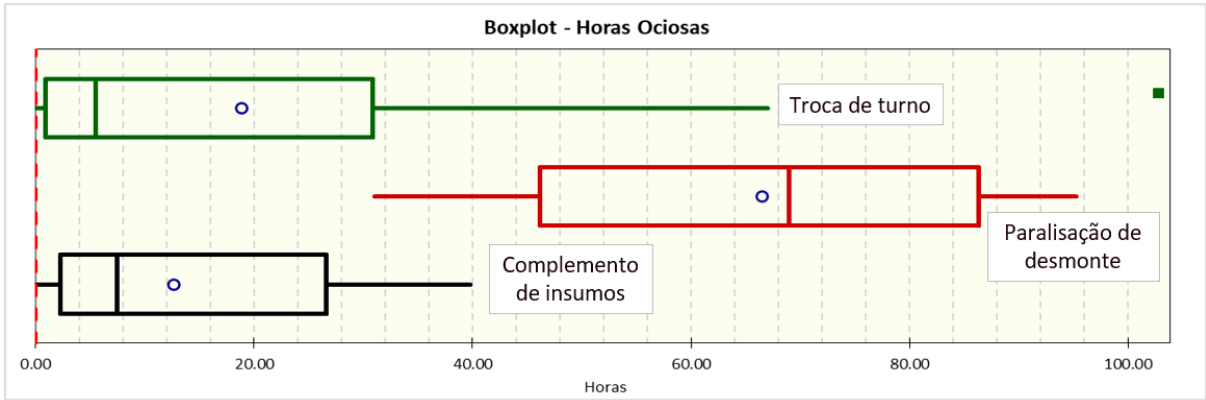
Ainda em cada subindicador foram realizadas análises estatísticas de variação do foco, essas análises buscaram identificar em cada parcela do indicador se existem relações de causa e efeito vinculadas ao indicador global, as análises de variação de foco por subindicadores em seguida ilustram a iniciativa.

Análise de variação de foco da UF (Utilização Física)

Frota autônoma:



Fonte: Autor.



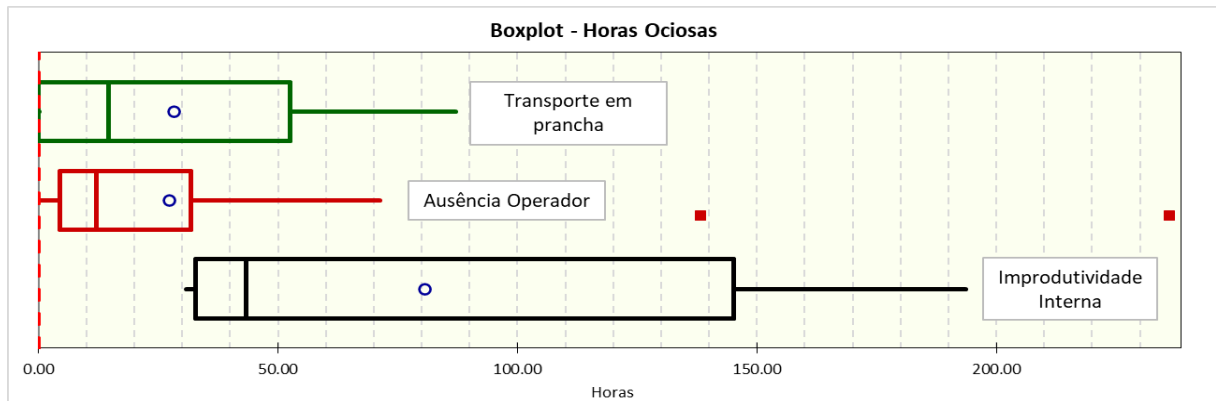
Boxplot - Aus. Operador	
n	32.00
Mínimo	0.01
1º Quartil	2.27
Mediana	7.44
3º Quartil	26.64
Máximo	39.80
Limite Inferior (LI)	-34.28
Limite Superior (LS)	63.20
Menor valor dentro (LI)	0.01
Maior valor dentro (LS)	39.80
Desvio Padrão	12.41
Média	12.66

Boxplot - Locomoção	
n	6.00
Mínimo	31.04
1º Quartil	46.19
Mediana	68.99
3º Quartil	86.30
Máximo	95.25
Limite Inferior (LI)	-13.98
Limite Superior (LS)	146.46
Menor valor dentro (LI)	31.04
Maior valor dentro (LS)	95.25
Desvio Padrão	23.42
Média	66.47

Boxplot - Demanda Terrap.	
n	20.00
Mínimo	0.00
1º Quartil	0.92
Mediana	5.51
3º Quartil	30.89
Máximo	102.83
Limite Inferior (LI)	-44.03
Limite Superior (LS)	75.84
Menor valor dentro (LI)	0.00
Maior valor dentro (LS)	67.05
Desvio Padrão	27.38
Média	18.87

Fonte: Autor.

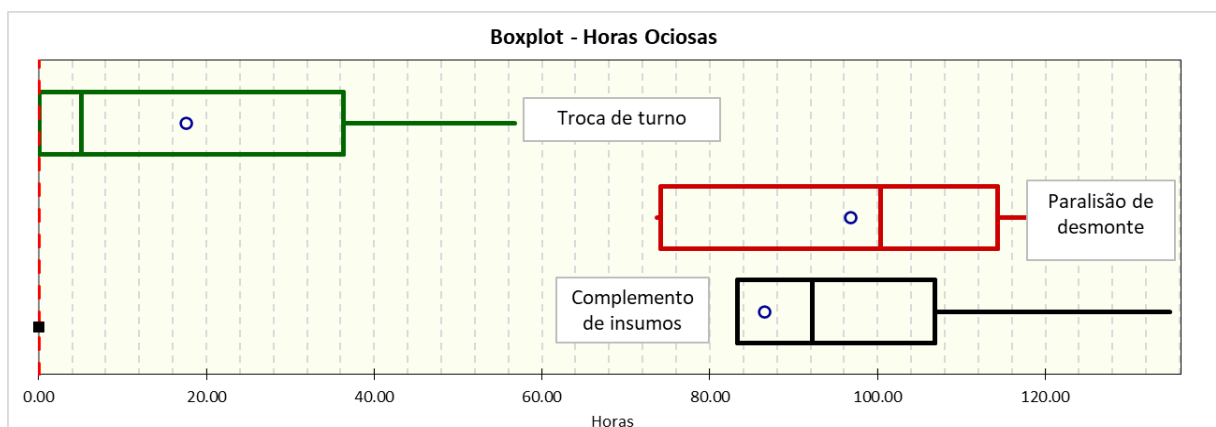
Frota convencional:



Boxplot - Transp. Prancha	
n	12.00
Mínimo	30.80
1º Quartil	32.79
Mediana	43.42
3º Quartil	145.17
Máximo	193.56
Limite Inferior (LI)	-135.77
Limite Superior (LS)	313.74
Menor valor dentro (LI)	30.80
Maior valor dentro (LS)	193.56
Desvio Padrão	62.37
Média	80.57

Boxplot - Aus. Operador	
n	31.00
Mínimo	0.01
1º Quartil	4.43
Mediana	12.02
3º Quartil	31.83
Máximo	236.21
Limite Inferior (LI)	-36.67
Limite Superior (LS)	72.93
Menor valor dentro (LI)	0.01
Maior valor dentro (LS)	71.33
Desvio Padrão	47.58
Média	27.39

Boxplot - Improd. Interna	
n	29.00
Mínimo	0.00
1º Quartil	0.02
Mediana	14.64
3º Quartil	52.47
Máximo	87.04
Limite Inferior (LI)	-78.65
Limite Superior (LS)	131.15
Menor valor dentro (LI)	0.00
Maior valor dentro (LS)	87.04
Desvio Padrão	30.57
Média	28.20



Boxplot - Troca Turno		Boxplot - Paralisação Desm.		Boxplot - Compl. Insumos	
n	7.00	n	6.00	n	33.00
Mínimo	0.01	Mínimo	73.66	Mínimo	0.00
1º Quartil	83.34	1º Quartil	74.18	1º Quartil	0.13
Mediana	92.24	Mediana	100.33	Mediana	5.11
3º Quartil	106.85	3º Quartil	114.35	3º Quartil	36.37
Máximo	134.83	Máximo	119.74	Máximo	56.72
Limite Inferior (LI)	48.06	Limite Inferior (LI)	13.92	Limite Inferior (LI)	-54.23
Limite Superior (LS)	142.13	Limite Superior (LS)	174.61	Limite Superior (LS)	90.73
Menor valor dentro (LI)	83.34	Menor valor dentro (LI)	73.66	Menor valor dentro (LI)	0.00
Maior valor dentro (LS)	134.83	Maior valor dentro (LS)	119.74	Maior valor dentro (LS)	56.72
Desvio Padrão	41.65	Desvio Padrão	20.04	Desvio Padrão	19.51
Média	86.55	Média	96.83	Média	17.62

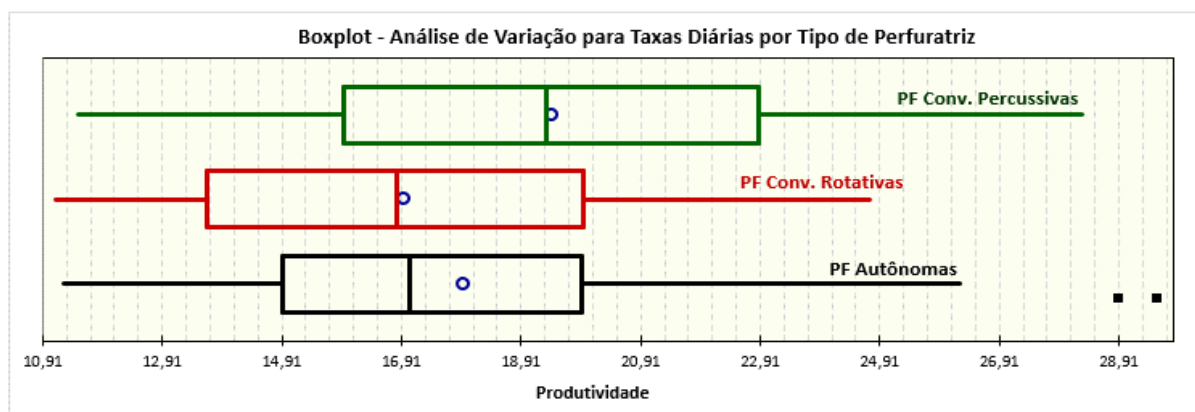
Obs.: Valores Outliers não identificados por falta de informações armazenadas nas apropriações, detalhamento via diário de bordo manual por operador. Nesta etapa foram priorizados os impactos mais relevantes em horas ociosas por apropriação que fragilizam a utilização física.

Análise de variação de foco da taxa de perfuração

Variável	Número de dados	Média	Desvio Padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo	Amplitude
Taxa - PF Autônomas	51	17,9	4,2	11,3	14,9	17,0	19,9	29,5	18,3
Taxa - PF Convencionais Rotativas	51	17,0	3,6	11,1	13,6	16,8	19,9	24,7	13,6
Taxa - PF Convencionais Percussivas	44	19,4	4,2	11,5	16,0	19,3	22,9	28,3	16,8

Fonte: Autor.

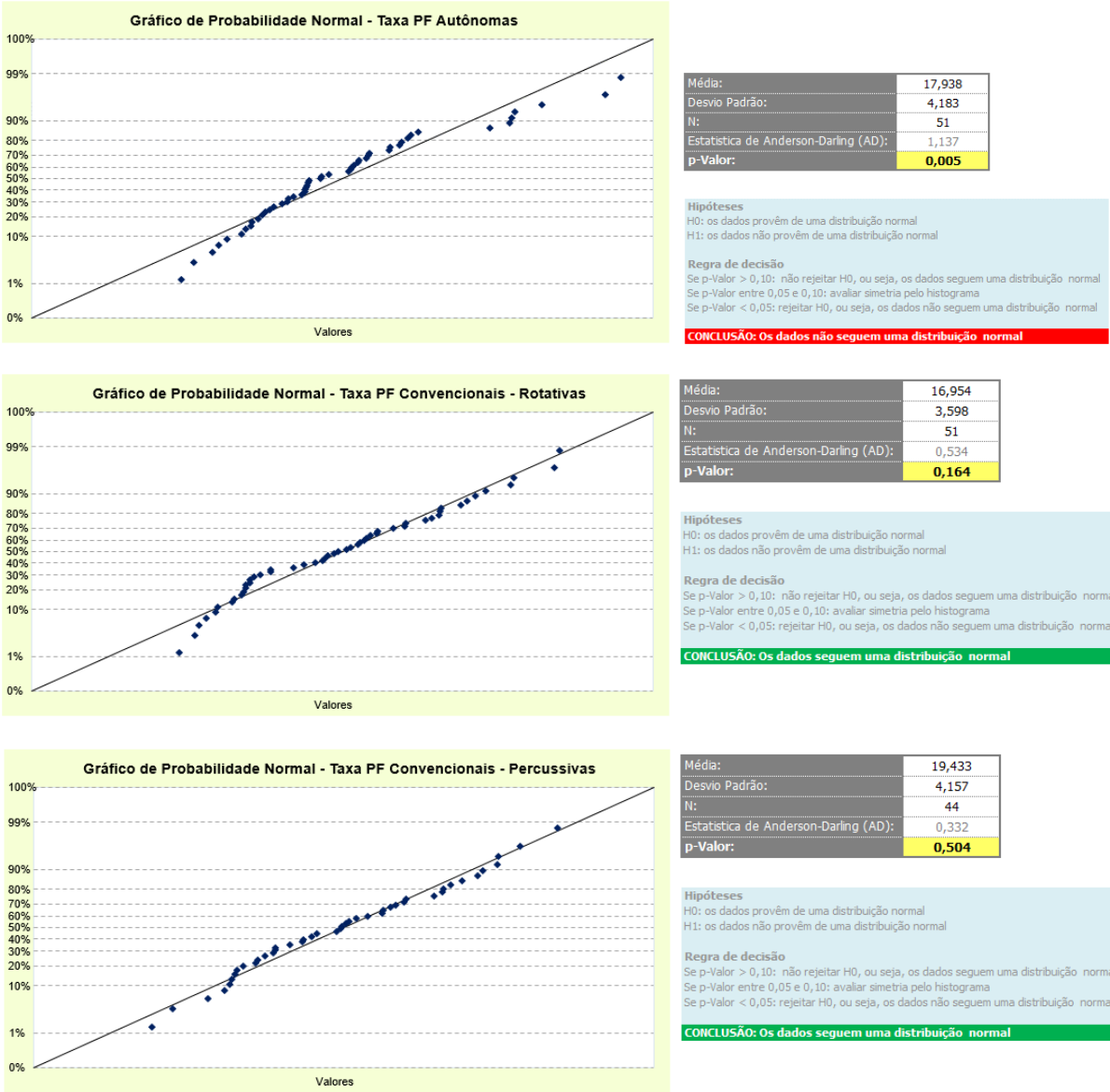
Foram analisados a base de dados dentro da frota de perfuratrizes de grande porte do site, para que se possa entender quais os impactos separados por características nas frotas secundárias autônomas, convencionais rotativas e percussivas.



Fonte: Autor.

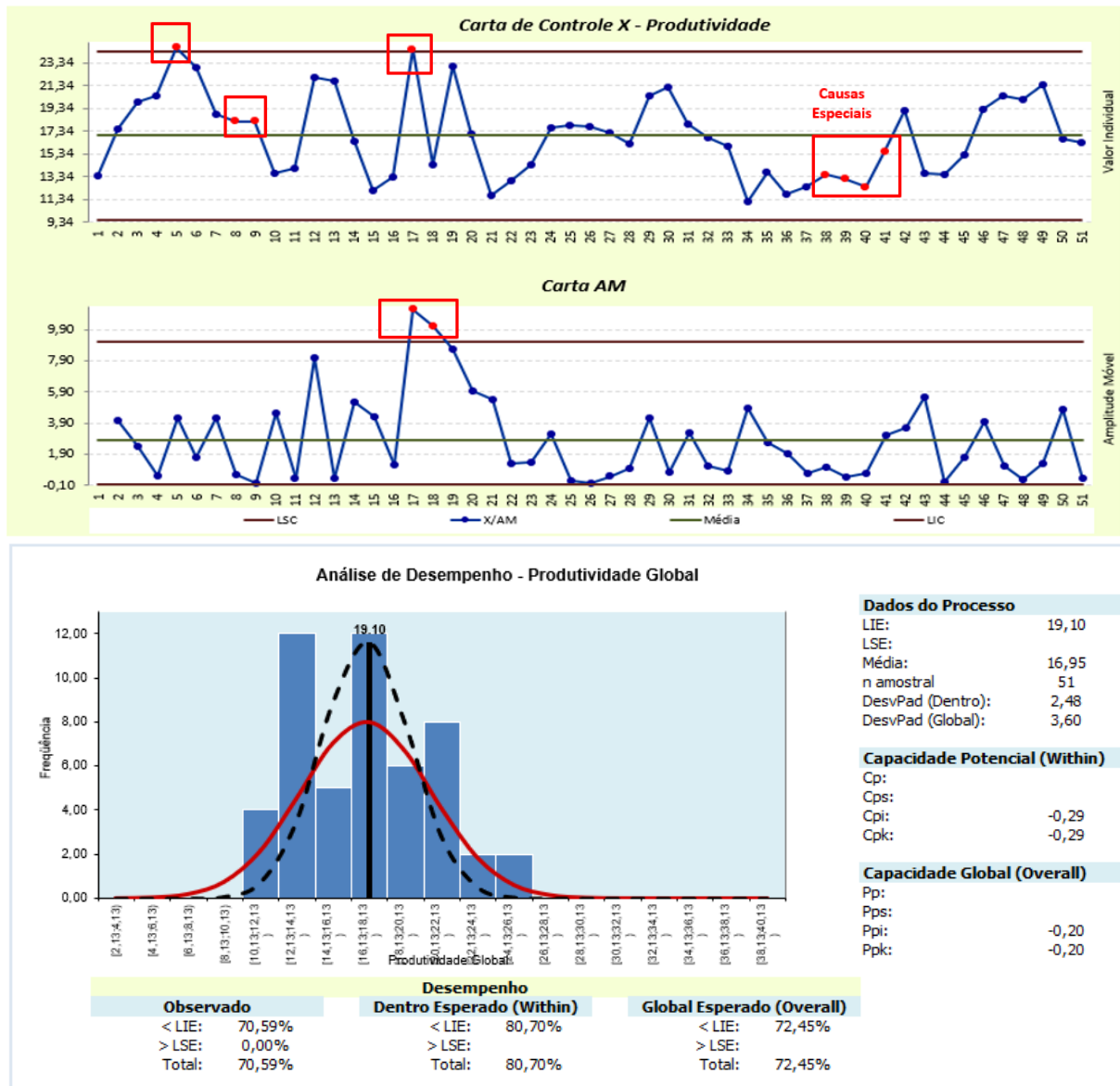
Tomando como base os dados diários de taxas entre mai./20 e jun./20, observa-se via gráficos boxplot que a maior produtividade média foi vista nas PF Convencionais Percussivas, já as perfuratrizes convencionais rotativas foram as frotas que apresentaram menores taxa média e variação (desvio padrão), por último, notou-se que há dois valores outliers nas PF Autônomas, com taxa diárias de 28,9 (ocorrida em 25/05) e 29,5 (ocorrida em 30/06).

Na sequência foram analisados se os dados por frota seguem uma distribuição normal, os dados das da frota de perfuratrizes autônomas são as únicas que não seguiram normalidade não sendo possível realizar uma análise de desempenho para verificação de causas especiais ou comuns para atuação de forma a elevar o desempenho do indicador.



Fonte: Autor.

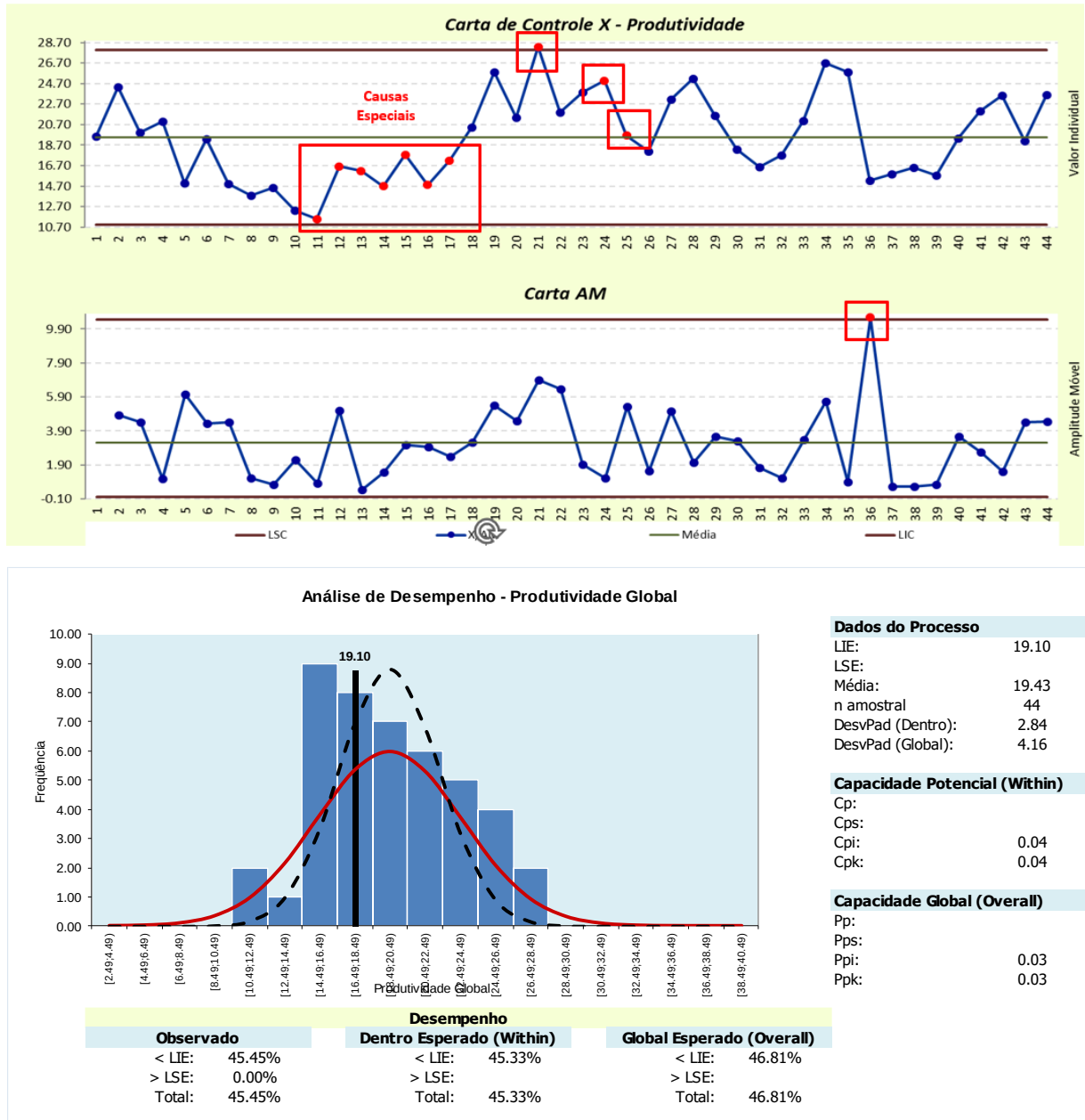
Análise de desempenho das perfuratrizes convencionais rotativas.



Fonte: Autor.

Elaborada a Análise de Desempenho e assumindo como LIE = 19,1 (meta para produtividade), observa-se que cerca de 72,5% das produtividades observadas no referido período, não atendem à especificação. Há oportunidade de se trabalhar em causas especiais (via Cartas de Controle X-AM), deslocamento de média e atuar também em causas comuns.

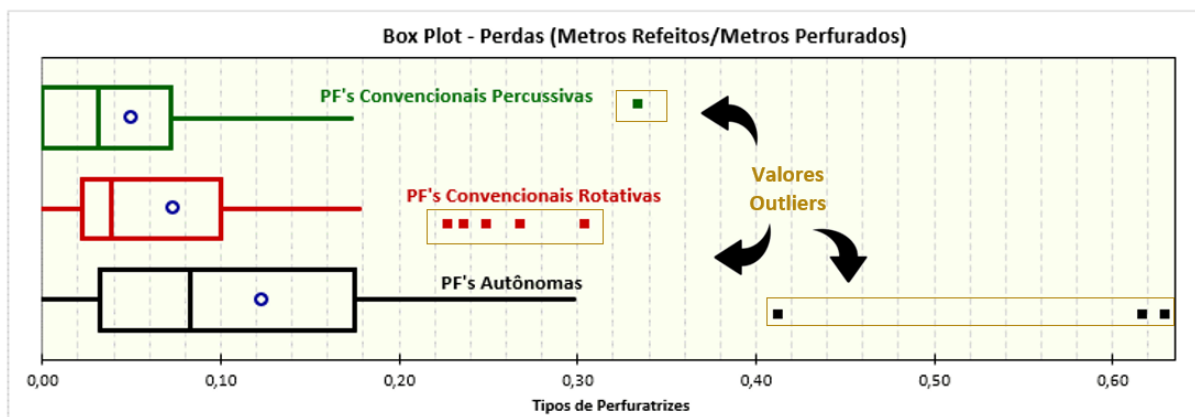
Análise de desempenho perfuratrizes convencionais percussivas.



Fonte: Autor.

Elaborada a Análise de Desempenho e assumindo como LIE = 19,1 (meta para produtividade), observa-se que cerca de 46,81% das produtividades observadas no referido período, não atendem à especificação, o que caracteriza maiores impactos na frota de perfuratrizes rotativas que também representam mais de 90% da frota do complexo. Há oportunidade de se trabalhar em causas especiais (via Cartas de Controle X-AM), deslocamento de média e atuar também em causas comuns.

Análise de variação de foco perda de furos



Fonte: Autor.

Obs.: Valores Outliers não identificados por falta de informações armazenadas nos bancos de dados justificando valores diários.

Variável	Nº Dados	Média	Desvio Padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo	Amplitude
PF Autônomas	51	0,12	0,14	0,00	0,03	0,08	0,17	0,63	0,63
PF Conv. Rotativas	51	0,07	0,07	0,00	0,02	0,04	0,10	0,30	0,30
PF Conv. Percussivas	44	0,05	0,08	0,00	0,00	0,03	0,07	0,33	0,33

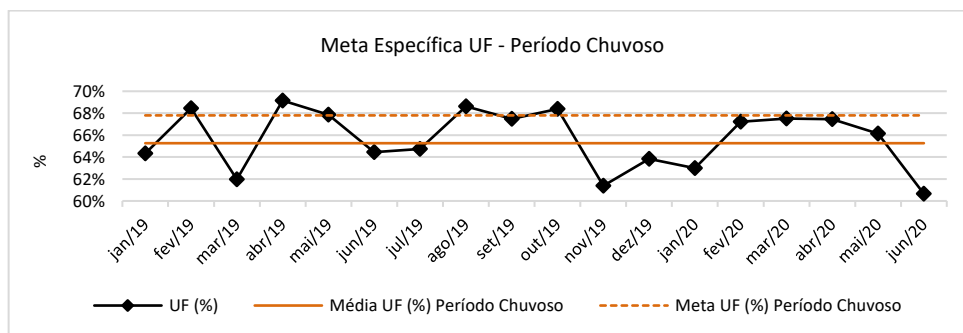
Fonte: Autor.

Observa-se que as perfuratrizes convencionais possuem maior média de horas ociosas e variabilidade quando se comparado às perfuratrizes autônomas. Para ambos os tipos de perfuratrizes, notou-se a presença de outliers. Ou seja, valores bem superiores de horas ociosas do que os demais.

6.3.1 Definição de metas específicas:

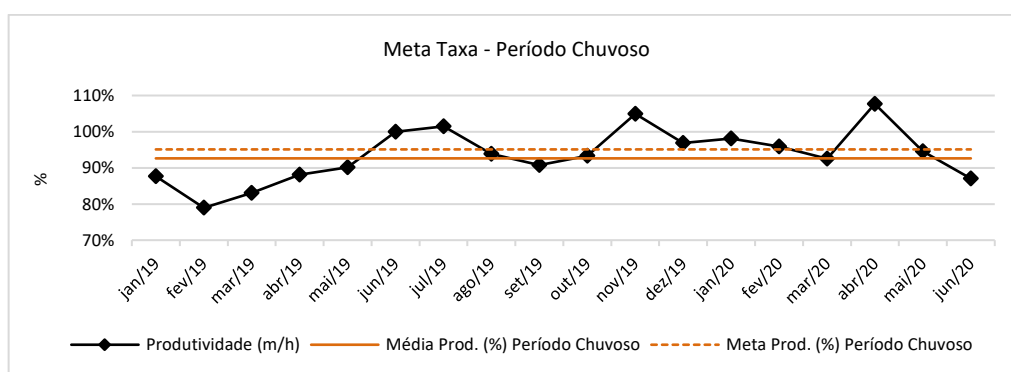
Após a identificação de cada subindicador, a meta foi reestimada para determinar o peso que cada subindicador possui na OEE. Ressaltando que o único subindicador não considerado foi a DF (disponibilidade física) em função de se tratar de um indicador de manutenção, parcela sem controle direto pela equipe do projeto, figura abaixo apresenta os gráficos com as metas específicas estabelecidas e a variação de ambos no período base do projeto.

Metas específicas



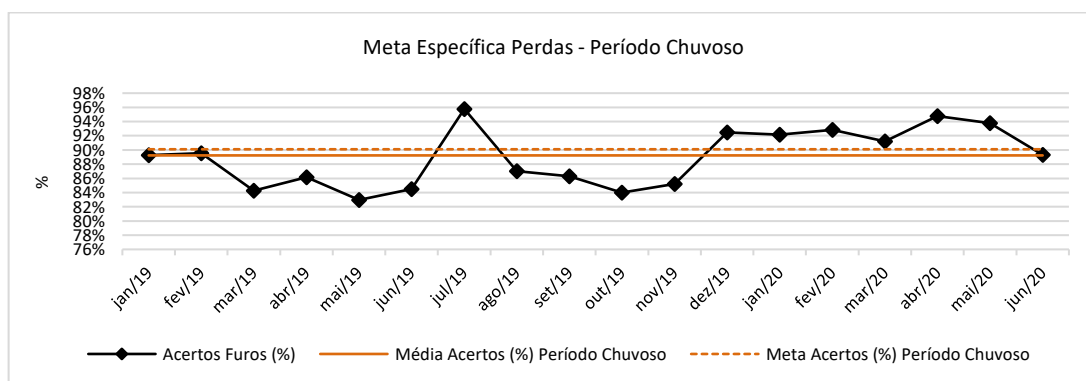
Fonte: Autor.

Aumentar a UF de Perfuratrizes de Grande Porte - Itabira em 3,9%, saindo de 65,3% para 67,8% até mar/21 (período de verificação: mar/21 a maio/21).



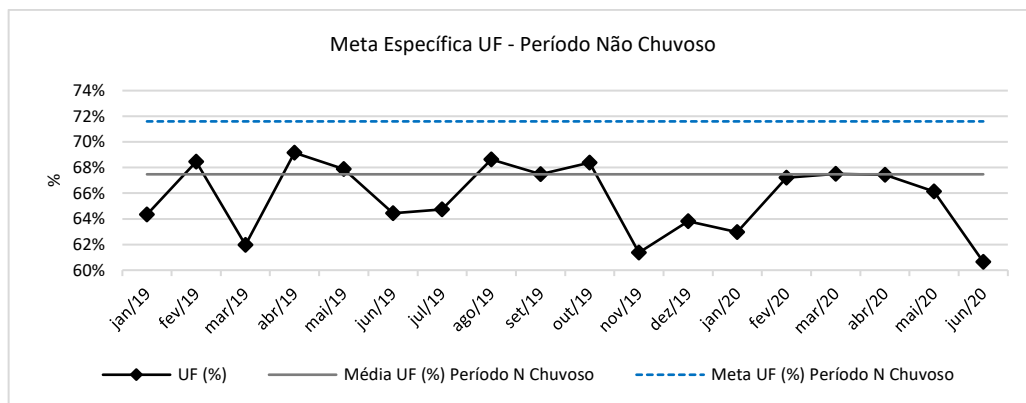
Fonte: Autor.

Aumentar a Taxa de Perfuratrizes de Grande Porte - Itabira em 2,7%, saindo de 92,6% para 95,1% até mar/21 (período de verificação: mar/21 a maio/21).



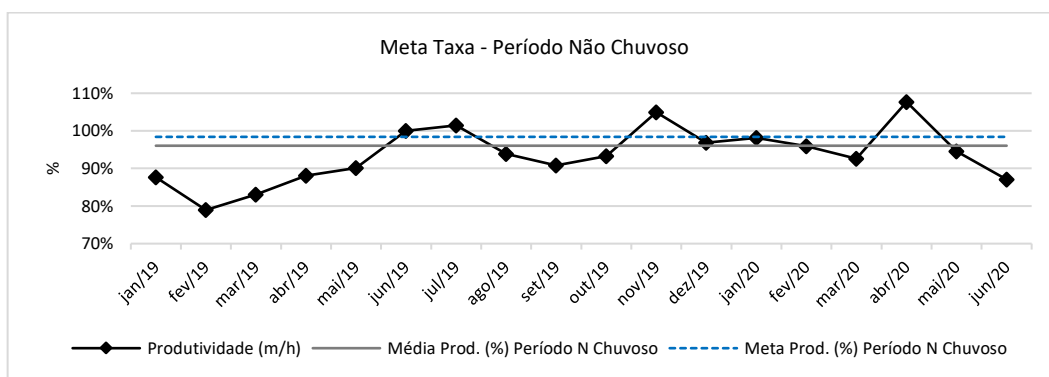
Fonte: Autor.

Aumentar o % de acertos de Perfuratrizes de Grande Porte - Itabira em 1,8%, saindo de 89,2% para 90,1% até mar/21 (período de verificação: mar/21 a maio/21).



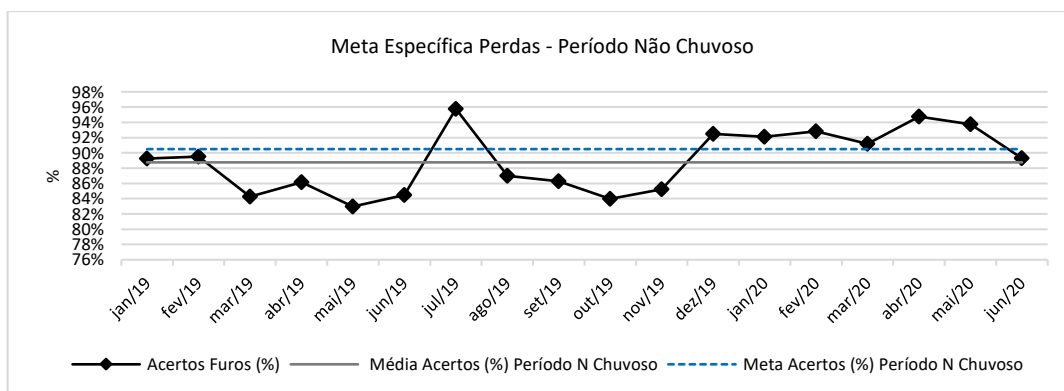
Fonte: Autor.

Aumentar a UF de Perfuratrizes de Grande Porte - Itabira em 6,1%, saindo de 67,5% para 71,6% até mar/21 (período de verificação: mar/21 a maio/21).



Fonte: Autor.

Aumentar a Taxa de Perfuratrizes de Grande Porte - Itabira em 2,4%, saindo de 96,0% para 98,4% até mar/21 (período de verificação: mar/21 a maio/21).



Fonte: Autor.

Aumentar o % de acertos de Perfuratrizes de Grande Porte - Itabira em 3,5%, saindo de 88,8% para 90,5% até mar/21 (período de verificação: mar/21 a maio/21).

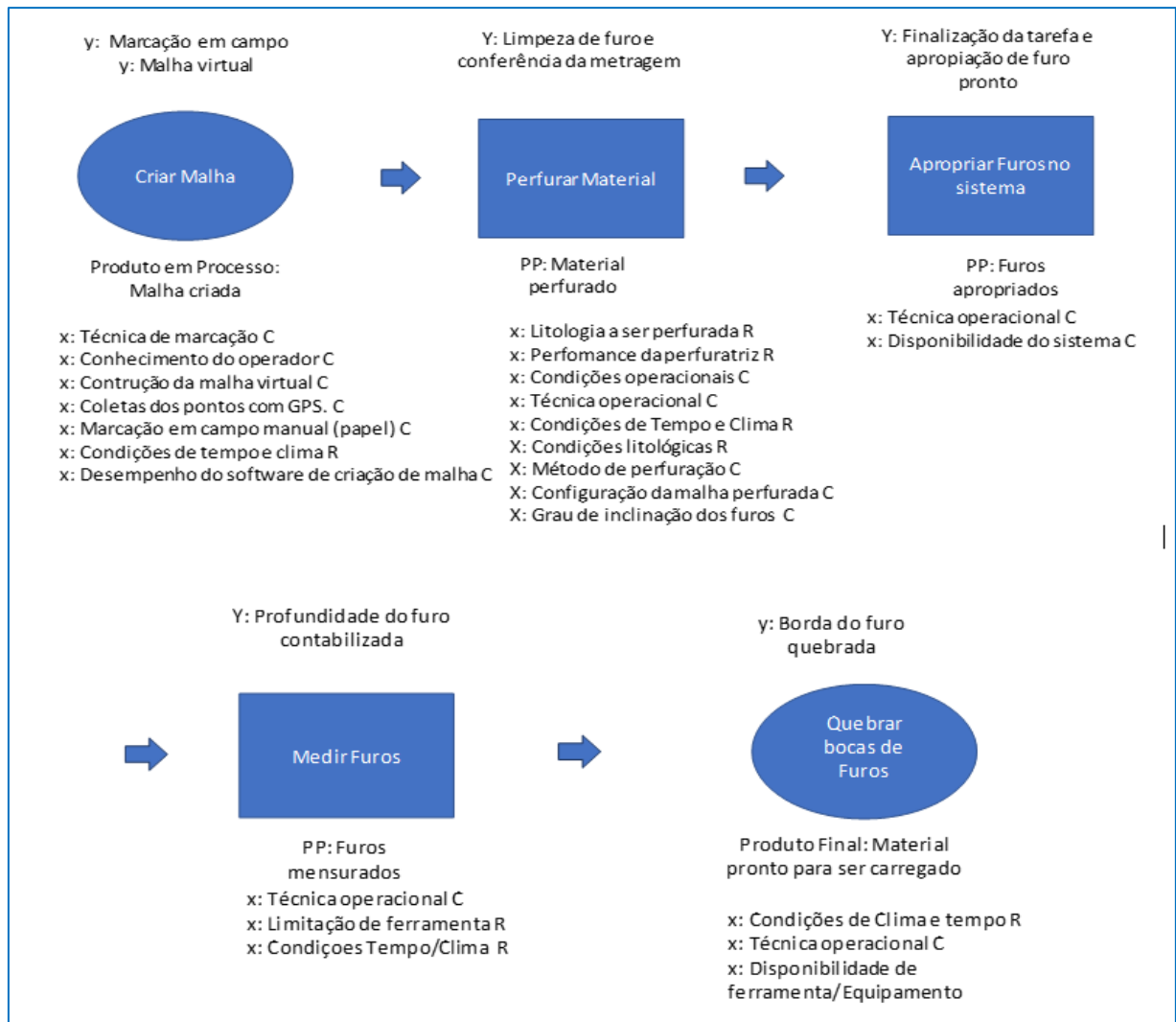
6.4 Análise do processo

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

6.5 Levantamento, priorização e comprovação das causas:

A fim de se analisar o processo, estabeleceu-se o seu fluxo identificando as variáveis que influenciam na performance do indicador da OEE em cada subindicador. Para a sua execução, realizou-se um brainstorming com a participação da equipe do projeto, especialistas técnicos e envolvidos no processo da mina. Leia-se no mapeamento da Figura 1: C (variáveis controladas), *C (variáveis críticas) e R (variáveis ruído, onde a equipe não possui autonomia para atuar), conforme demonstrado na figura abaixo:

Mapeamento de processo



Fonte: Autor.

Através da identificação das possíveis causas por meio do mapeamento de processo e Ishikawa, foram levantados 101 parâmetros críticos. A fim de iniciar uma investigação mais crítica das 101 causas identificadas, elaborou-se a matriz de priorização, onde as causas foram classificadas como **complexas/prioritárias/ver** e **agir/descarte**, tal classificação foi realizada pela equipe técnica através de pontuação (0 - Não há correlação; 3: Baixa Correlação; 5: Forte Correlação).

A matriz de priorização com o filtro das causas classificadas como prioritárias pode ser visualizada no Anexo 1 – Matriz de priorização. No total foram priorizadas dezoito causas,

classificadas desta forma por possuírem um alto impacto nos KPI's e um baixo esforço de eliminação da variável de entrada. Essas causas foram separadas por correlação com o os sub KPI's que compõem a OEE como demonstra a Tabela 4.

Tabela 4: Causas de maior impacto em função de cada subindicador.

UF	Taxa de penetração	Perda de furos
Logística de desmonte	Litologia a ser perfurada	Técnica operacional
Apropriação	Performance perfuratriz	Limitação de ferramenta
DF da carreta	Técnica operacional	condições climáticas
Restrições de segurança	Condições climáticas	Aplicação de fluido estabilizante/água
Operacionalidade	Insumos operacionais (aplicação de FOAM/água)	-
Condições climáticas	Limpeza do furo e conferência de metragem	-
Condições de acesso	Disponibilidade dos sistemas	-
Operacionalidade	-	-

Fonte: Autor.

Para comprovação das causas, foram realizadas coletas de dados dos indicadores que compõem a OEE de perfuração durante um período de três meses a após a implementação das ações mitigatórias para a causas fundamentais levantadas durante a aplicação da metodologia do Six sigma

A comprovação de cada causa pode ser observada em conforme no exemplo abaixo e demais no campo Anexo 2 – Comprovação das principais causas.

Causa avaliada: Técnica de Marcação de furos



Fonte: Vale Complexo Itabira (2020).

Imagem demonstrando a baixa simetria da malha de perfuração realizada com técnicas de marcação manual, impactando nos indicadores de taxa, utilização física e perdas de furos.

6.6 Ações de correção/melhoria aplicadas

Para que as metas fossem atingidas foram implementadas diversas ações que pudessem mitigar os impactos gerados pelas causas levantadas pelo método, essas ações foram correlacionadas as causas comprovadas, importante ressaltar que algumas ações mitigatórias têm impactos correlacionados a mais de uma causa na maior parte dos casos, deste modo não foram geradas uma ação por causa comprovada, na tabela abaixo temos as evidências que compõem a mitigação linkados as suas causas fundamentais.

Tabela 5: Ações de mitigação por causa fundamentais

Utilização Física (UF)	Produtividade (Taxa)	Perdas de Furo	Causas a Serem Tratadas	What? (O que?)	Status	Resultados obtidos
x			Falha no alinhamento de metas com nível operacional.	Implementar controle e gestão dos indicadores operacionais através de FMDS a nível operacional, inserção de gestão a vista e acompanhamento do indicador na cabine do operador de perfuratriz e pontos de troca de turno.	Concluído	Rotina de FMDS a nível operacional implementada e validada pela excelência operacional, painéis de metas distribuídos nos locais de troca de turno e reunião de início de jornada.
	x	x	Condições operacionais	Implementar site assessoria operacional com controle de ações e implementações de melhorias gerenciadas pela equipe de engenharia.	Concluído	
x	x	x	Técnica de marcação	Implementar software de modelagem de malhas e treinamento da equipe operacional para aperfeiçoamento da técnica de marcação no campo, aplicação alta precisão.	Concluído	
x			Tempo ocioso elevado por espera para desmontes	Alterar modo operacional junto ao planejamento de curto prazo, redução no número de desmontes por semana e consequente aumento de massa desmontada por cada desmonte.	concluído	
x			Alto índice de locomoções para saída do raio de desmonte;	Mudar rotina operacional junto ao planejamento de curto prazo, redução no número de desmontes por semana e consequente aumento de massa desmontada por cada desmonte.	Concluído	
		x	Disponibilidade de ferramenta/Equipamento	Implementar de sistema de alta precisão em perfuratrizes convencionais e expansão da frota autônoma, aplicando tecnologias no equipamento para medição da profundidade do furo, perfil litológico e alta precisão. Teste piloto sistema para evitar perdas de furos por chuva e queda de material na boca do furo.	Concluído	Implementação do kit de alta precisão em duas perfuratrizes inicialmente mapeadas (PF1117/PF1118), defino expansão da melhoria para toda frota.

x			Baixa eficiência na troca de material de desgaste	Contratar mão de obra terceira para manutenção e troca de material de desgaste, aumento da capacidade logística através da implementação de mais um	Concluído	
x			Desconhecimento para criação da malha virtual em parte da equipe de técnicos	Capacitar equipe de técnicos de marcação para gerenciamento e manipulação do software de modelagem de malhas e marcação em campo.	Concluído	
	x	x	Método de perfuração	Testar método rotopercurssivo DTH em frentes de perfuração mais compactas mensurando ganhos de produtividade e qualidade na perfuração.	Concluído	
	x	x	Método de perfuração	Implementação de dispositivo para troca de ferramentas entre métodos percussivo/rotativo	Concluído	
	x	x	Técnica operacional	Contratar treinamento pelo dealer CAT/sotreq para reciclagem operacional através dos pontos abordados pelo site assesment como falhos, treinamento terá abrangência para todos operadores excluindo os recém contratados.	Concluído	
	x	x	Marcação em campo manual (papel)	Implementar software de modelagem de malhas e treinamento da equipe operacional para aperfeiçoamento da técnica de marcação no campo, aplicação alta precisão.	Concluído	
	x	x	Grau de inclinação dos furos	Delimitar furos em angulo somente nas áreas de maior complexidade litológica, dureza da rocha e primeira linha de perfuração.	Concluído	Premissa adotada na construção dos planos de desmonte, definição interna da gerência de Infraestrutura Itabira
x			Queda da vida útil média das ferramentas de desgaste;	Contratar de treinamento pelo dealer CAT/sotreq para reciclagem operacional através dos pontos abordados pelo site assesment como falhos, treinamento terá abrangência para todos operadores excluindo os recém contratados.	Concluído	
x			Falta de pessoas temporariamente devido à pandemia	Contrar treinamento para capacitação operacional .	concluído	

Fonte: Autor.

A comprovação de mitigação de causa pode ser observada na imagem abaixo sendo possível observar a alta simetria gerada na malha melhorando a eficiência de todo o processo de perfuração as demais ações podem ser visualizadas no campo **Anexo 2 – Comprovação das principais causas de mitigação.**

Mitigação de causa avaliada: Técnica de Marcação de furos



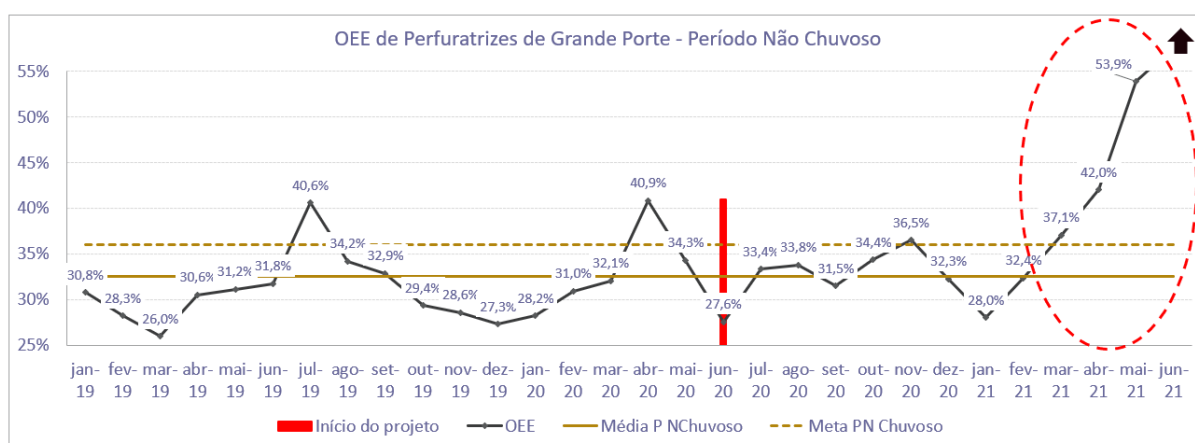
Fonte: Vale Complexo Itabira (2021).

Imagem de malhas construídas através de software implementado na rotina operacional com alta precisão, qualidade elevada com simetria entre os furos e melhor desempenho operacional das perfuratrizes, ação mitigatória relacionada a taxa de perfuração (menor atraso operacional e sobre perfuração otimizando o indicador) e perdas de furos por minimização de perfuração muito próximas gerando perdas por vibração e maior linearidade dos furos, impacto de mitigação em horas ociosas (apropriação - marcação de campo) elevando a UF- utilização física, eliminação da tarefa de marcação em campo.

6.7 Resultados obtidos

Através das ações aplicadas no presente projeto a meta geral foi alcançada. Importante ressaltar que como já citado a base para delimitação das metas foi definida em dois períodos sazonais, chuvoso e não chuvoso, de acordo com nível de precipitação pluviométrica no complexo minerador. O período de verificação determinado como não chuvoso - Média de precipitação abaixo de 80mm - Fixadas metas específicas para este período. Durante o período de verificação (mar/21 a maio/21) o indicador OEE alcançou, em média, 44,3% para uma meta geral de 36% (Figura 17).

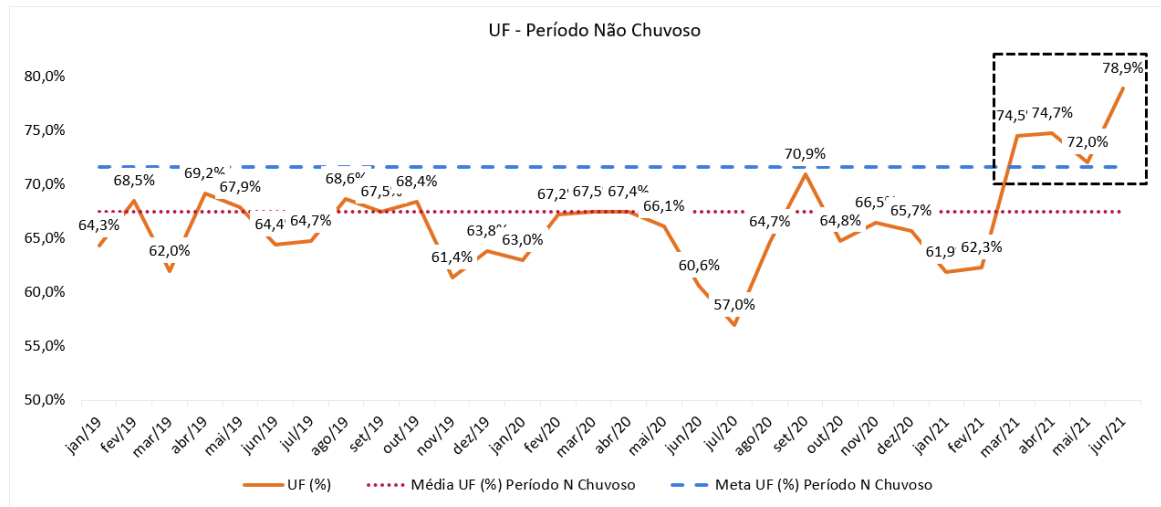
Figura 17: Gráfico evolução da meta geral de OEE



Fonte: Autor.

Para meta de UF - Período Não Chuvoso observou-se que em média o indicador foi igual a 73,8% durante o período de verificação, para uma meta de 71,6% (Figura 18).

Figura 18: Gráfico evolução da meta de UF

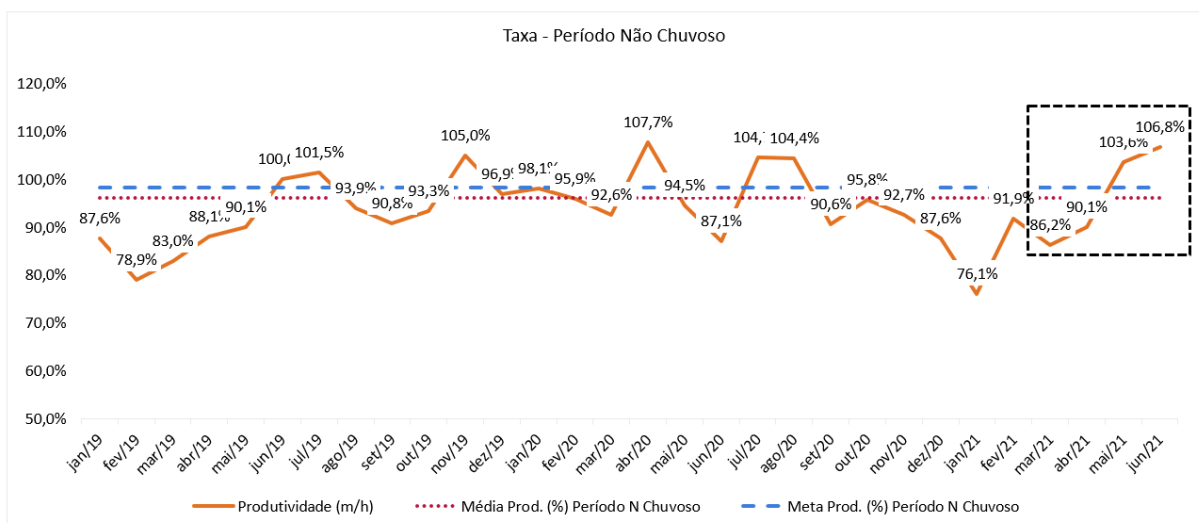


Fonte: Autor.

Aumentar a UF de Perfuratrizes de Grande Porte - Itabira em 6,1%, saindo de 67,5% para 71,6% até mar/21 (período de verificação: mar/21 a mai/21).

Para meta de Produtividade (Taxa) - Período Não Chuvoso observou-se que em média o indicador foi igual a 93,3% durante o período de verificação, para uma meta de 98,4%, sendo assim não atingimos a meta específica. Porém nos últimos meses esse indicador vem atingindo patamares superiores a meta (Figura 19).

Figura 19: Gráfico evolução da meta de Taxa

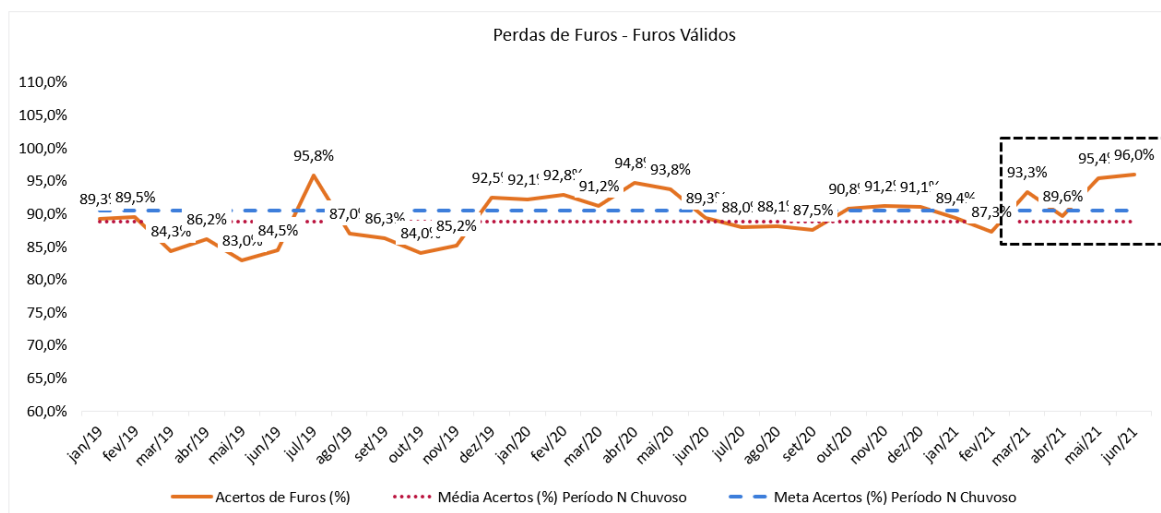


Fonte: Autor.

Aumentar a Taxa de Perfuratrizes de Grande Porte - Itabira em 2,4%, saindo de 96,0% para 98,4% até mar/21 (período de verificação: mar/21 a maio/21).

Para meta de Furos Validos - Período Não Chuvoso observou-se que em média o indicador foi igual a 92.8% durante o período de verificação, para uma meta de 90.5% (Figura 20).

Figura 20: Gráfico evolução da meta de Furos válidos



Fonte: Autor.

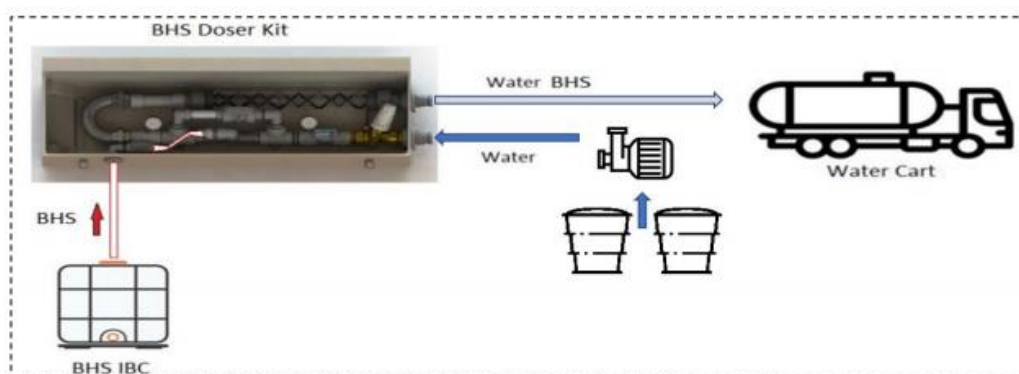
Aumentar o % de acertos de Perfuratrizes de Grande Porte - Itabira em 3,5%, saindo de 88,8% para 90,5% até mar/21 (período de verificação: mar/21 a maio/21).

6.7.1 Padronizações e treinamentos:

Foram padronizados os pontos em que o projeto alterou no processo de perfuração citando a aplicação de polímero na injeção de perfuração e controle dos indicadores operacionais, também foram treinados (as) todos os operadores (as) na aplicação do polímero e equipe operacional nas ferramentas de gestão dos indicadores.

Serão monitorados todos os indicadores que compõem a OEE de perfuração voltados a operação. Caso haja falhas de processo será implementado MCS (motivo, causa, solução) fazendo uso de ferramentas de análise como A3, PDCA, 6Sigma, ambos alinhados ao FMDS. Implementação de medidas de engenharia para mitigar anomalias e manter controle dos KPI's trabalhados. Desenvolvimento da equipe operacional, técnicas e áreas de interface direta (Figura 21 e Figura 22).

Figura 21: sistema de mistura para abastecimento de comboios exclusivos para o abastecimento das caixas d'água das perfuratrizes, 100% da frota usando fluido na injeção de água.



Fonte: Autor.

Figura 22: Implementação de controle dos indicadores operacionais nas trocas de turno e via CCO, equipe técnica operacional e supervisores.



Fonte: Autor.

Como destaque foi implementado um fluxo denominado OCAP. O OCAP “Out of Control Action Plan” é uma ferramenta da metodologia Six-Sigma utilizada para facilitar a identificação das anomalias crônicas que devem ser atacadas para a melhoria do processo. Trata-se de um fluxograma ou descrição textual da sequência de atividades que devem ser realizadas após a ocorrência de um evento ativador. É um documento vivo (será modificado ao longo do tempo na medida em que se adquire mais conhecimento e compreensão do processo).

7 CONCLUSÕES

Ao desenvolver o projeto foram adquiridos diversos conhecimentos através de uma metodologia estruturada (PDCA) e detalhamento dos indicadores, o trabalho abrangeu todos os KPI's de operação. Através da otimização deles, foi possível detalhar os gaps e aplicar medidas de contenção como, treinamentos, práticas operacionais e desenvolvimento de dispositivos e ferramentas.

- Ganhos Qualitativos:

Nos ganhos qualitativos apurados com o projeto podemos citar maior organização do processo de perfuração, através de pesquisas podemos apurar que os empregados envolvidos retratam maior satisfação em desempenhar suas atividades com os desdobramentos realizados e os alcances de metas estabelecidas pela gerência.

- Ganhos Quantitativos:

Apurou-se um ganho de mais de 12% na OEE de perfuração, essa otimização de processo representa uma perda evitada esperada de R\$ 19,221,61 ano para a gerência de infraestrutura de mina Itabira.

Através da aplicação da metodologia Seis Sigma, foi possível visualizar um incremento no indicador global da OEE de perfuração. Considerando que a meta estimada para essa variável foi de 36%, a aplicação da metodologia proporcionou superar este parâmetro. Como visto no trabalho, a performance média do ano (baseline) foi de 32,5% e o praticado no período de verificação do projeto foi uma média de 44,3%, o que representa um aumento de 12%. Essa melhora na performance do indicador, demonstra a eficiência dos resultados propostos pela metodologia quando aplicada de maneira adequada, seguindo os passos pré-definidos e executando as atividades e o plano de ação conforme planejado.

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

Para futuros trabalhos, propõem-se um estudo mais aprofundado em cada parcela da “OEE de perfuração” verificando-se a sustentabilidade dos resultados. Também é proposto a replicação desta pesquisa em outros complexos da empresa. Ressalta-se que para que fosse possível a aplicação do método PDCA na pesquisa, uma das premissas respeitadas foi a base histórica de dados.

REFERÊNCIAS

- ABGE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5462: Confiabilidade e Maneabilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. 37 p.
- AHRENS, R. B. **Coletânea Nacional sobre Engenharia de Produção 3: Gestão da Produção**. Curitiba: Editora Atena, 2017. 645 p.
- ALDAY. **O Planejamento Estratégico dentro do Conceito de Administração Estratégica**. Rev. FAE, Curitiba, v.3, n.2, p.9-16, maio/ago. 2000.
- AMORIM, D. C. **Redução dos custos operacionais na lavra de Mica Xisto ao mudar os parâmetros do Plano de Fogo**. Orientador: Prof. Carlos Enrique Arroyo Ortiz. 2019. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2019.
- ANDRADE, V. L. de L.; CARVALHO, M. A. **Curso de Mineração - Básico: Módulo III Beneficiamento Mineral**. Rio de Janeiro: Valer, 2007.
- ARIENTE et al. **Processo de mudança organizacional: estudo de caso do Seis Sigma**. Rev. FAE, Curitiba, v.8, n.1, p.81-92, jan/jun. 2005.
- CARPINETTI, L. C. R. Proposta de um Modelo Conceitual para o Desdobramento de Melhorias Estratégicas. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 7, n. 1, p.29-42, abr. 2000.
- ATLAS COPCO. **Blasthole Drilling in Open Pit Mining**. Atlas Copco, 2012. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/357138992/Blasthole-Drilling-Third-Edition-LR-tcm795-3516064-pdf>. Acesso em: 06/07/2021.
- BORGES, T. C. **Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração**. 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2013.
- CATERPILLAR. **MD6240 Rotary Drill**. Caterpillar, 2015. Disponível em: <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C762757>. Acesso em: 11/07/2021.
- CATERPILLAR. **Apresentação de treinamento**. S.d. Apresentação de Power Point.
- CAVADAS, P. M. M. **Optimização do desmonte numa mina a céu aberto com aplicação de air decks**. Orientador: Alexandre Júlio Machado Leite. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas e geo-ambiente) - Faculdade de engenharia universidade do porto, [S. l.], 2012. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/63377/1/000151848.pdf>. Acesso em: 06/07/2021.

CASTRO, R. S.; PARRAS, M. M. **Manual de Ferramentas de Perfuração**. Rio de Janeiro: Fagersta secoroc, 1986, 225 p.

DICIONÁRIO FINANCEIRO. **Lucros cessantes**: o que significa e diferença com dano emergente. Disponível em: <https://www.dicionariofinanceiro.com/lucros-cessantes/>. Acesso em: 06/07/2021.

FRANCISCHINI, P. G.; FRANCISCHINI, A. S. N. **Indicadores de desempenho**: dos objetivos à ação – métodos para elaborar KPIs e obter resultados. Rio de Janeiro: Alta Books, 2017. 448 p.

GAMA, C. D. Mecânica de rochas - prática. VII Simpósio Brasileiro de Mineração [S. l.], p. 1-41, 1 ago. 1977. Disponível em: 70

GERALDI, J.L. P. **O ABC das Escavações de Rocha**. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. P 40-72.

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

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

GOOGLE EARTH. PRO. 2021. Disponível em: <https://earth.google.com>. Acesso em 27/11/2021.

GUAZZELI, S. R. **Análise de custos de perfuração e desmonte em mina de ferro**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2013.

<http://sites.poli.usp.br/geologiaemetalurgia/Revistas/Edi%C3%A7%C3%A3o%2041/artigo41.7.pdf>. Acesso em: 06/07/2021.

JARDIM, T. F. **Análise de desempenho de brocas triconicas 9 7/8"**. 2017. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2017.

JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L.; URBINA, F. P. O. **Manual de Perforación y Voladura de Rocas**. Instituto Geologico y Minero de España. 2003. 778p.

JUNIOR, N. A. P. **Aumento da vida útil de bit's de perfuração**: um estudo de caso de seu reaproveitamento em rocha friável. Orientadora: Dardânia Maciel Carvalho. 2020. 57 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Minas, Faculdade Adjetivo - CETEP, Mariana, 2020.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção**: função estratégica. 2 ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. São Paulo: Atlas, 2011.

MARIANO, R. M. **Determinação de parâmetros geométricos no desmonte de rochas para itabiritos compactos.** Orientador: Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz. 2018. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2018.

MIRANDA, B. N.; VIEIRA, T. A.; DELGADO, S. S.; CABRAL, A. G.; ANDRADE, F. O. **Comparação do consumo de energia e a produtividade de uma perfuratriz elétrica e uma perfuratriz a diesel de grande porte em uma mineradora em Itabira, Minas Gerais.** ENEGEP, XXXVI encontro nacional de engenharia de produção. João Pessoa/PB, Brasil, de 03 a 06 de outubro de 2016.

MORAIS, D. F. P. **Estudos dos principais tipos de brocas de perfuração de poços de petróleo e suas demandas tribológicas.** 2014. Monografia (Iniciação Científica em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [S. l.], 2014. 71

MORAIS, J. L. Procedimentos e avanços tecnológicos da perfuração que contribuem para a melhoria da qualidade dos desmontes de rochas. UFOP, 2001, p.155. Dissertação de Mestrado - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2001.

PEREIRA, K. P. **Análise comparativa entre caminhões fora de estrada na mineração - através de indicadores de desempenho.** Orientador: David Nunez. 2019. 80 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2019.

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

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

QUEVEDO, J. M. G. **Modelo de simulação para o sistema de carregamento e transporte em mina a céu aberto.** Orientador: Madiagne Diallo. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, [S. l.], 2009.

RODOVALHO, E. C. **Aplicações de ferramentas de simulação em operações mineiras para determinação de índices operacionais utilizados em planos de lavra adaptados ao estudo de caso da Mineração Casa de Pedra – CSN (Congonhas/MG).** 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2013.

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

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

SANDVIK. **The new Sandvik RR441 provides superior performance, reliability and longevity.** 2018. Disponível em: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/news-and->

media/news-archive/2018/06/the-new-sandvik-rr441-provides-superior-performance-reliability-and-longevity/. Acesso em: 11/08/2021.

SANDVIK. **Sandvik RT300-series for drifting and tunneling**. S.d. Disponível em: https://d3pcsg2wj9izr.cloudfront.net/files/1573/download/215965/2.small_RT300_13168.pdf. Acesso em: 11/08/2021.

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

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

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

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

SILVA, V. C. E. **Curso de min 210 - operações mineiras**. [S. l.: s. n.], 2009.

SIMINERAL. **Mineração no Pará, Brasil e Mundo**. S.d. Disponível em: simineral.org.br/mineracao/mineracao-para. Acesso em: 08/06/2021.

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

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

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

TELES, J. **Como calcular disponibilidade de equipamentos industriais?** ENGETELES, 2018. Disponível em: <https://engeteles.com.br/como-calcular-disponibilidade/>. Acesso em: 06/07/2021.

TELES, J. **O que é MTBF?** ENGETELES, 2018. Disponível em: <https://engeteles.com.br/o-que-e-mtbf/>. Acesso em: 29/06/2021.

TURRER, H. D. G. **Utilização De Poliacrilamidas De Alto Peso Molecular Na Flotação Catiônica Reversa De Minério De Ferro**. 2004. 1 v. Tese (Doutorado) - Curso de

Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção: estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas**. 1. ed. Itajubá: UNIFEI, 2012. 61

XAVIER, J. N. **Indicadores de Manutenção**. 2013. Disponível em: <http://www.dee.ufrn.br/~joao/manut/15%20-%20Cap%EDtulo%2013.pdf>. Acesso em: 22/07/2021.

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

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

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

ANEXOS

Anexo 1 – Matriz de priorização

Figura 23: Matriz de priorização para todas as causas identificadas para o estudo da OEE de perfuração.

Utilização Física (UF)	Produtividade (Taxa)	Perdas de Furo	Causas Levantadas	Critérios de Priorização			Total
				Contribui para uma baixa OEE	Facilidade para atuar sobre a causa	Poder de atuação sobre a causa	
			Peso do Critério	10	6	8	Ponto de Corte: 80
x			Falho no alinhamento de metas com nível operacional.	5	3	5	108
x	x	x	Condições operacionais	5	3	5	108
	x		Técnica de marcação	5	3	5	108
x			Apropriação inadequada;	5	5	3	104
x			Tempo ocioso elevado por espera para desmontes	5	3	3	92
x			Alto índice de locomoções para saída do raio de desmonte;	5	3	3	92
x			Impacto no sistema de despacho apropriação	5	3	3	92
x	x		Performance perfuratriz	5	3	3	92
x	x		Disponibilidade do sistema	5	3	3	92
	x		Disponibilidade de ferramenta/Equipamento	5	3	3	92
x			Baixa eficiência na troca de material de desgaste	3	3	5	88
x			Desconhecimento para criação da malha virtual em parte da equipe de técnicos	3	3	5	88
	x		Método de perfuração	3	3	5	88
	x	x	Técnica operacional	3	3	5	88
		x	Marcação em campo manual (papel)	3	3	5	88
		x	Método de perfuração	3	3	5	88
		x	Configuração da malha perfurada	3	3	5	88
		x	Grau de inclinação dos furos	3	3	5	88
x			Queda da vida útil média das ferramentas de desgaste;	3	5	3	84
x			Quebra prematura do material de desgaste em relação a frota convencional	3	5	3	84
x			Falta de pessoas temporariamente devido à pandemia	5	1	3	80
x			Planejamento atual inadequado	5	3	1	76
x			Grande número de operadores recém contatados em fase de treinamento e aperfeiçoamento técnico operacional	3	3	3	72
x			Lógica de desmonte inadequada	3	3	3	72
x			Baixa eficiência do estabilizante de parede e material perfurado;	3	3	3	72
	x		Insumos operacionais Aplicação de FOAM/ÁGUA	3	3	3	72
	x		Limpeza do furo e conferência de metroagem	3	3	3	72
		x	Coletas dos pontos com GPS.	3	3	3	72
		x	Limitação de ferramenta	3	3	3	72
	x	x	Litologia a ser perfurada	5	1	1	64
	x	x	Condições climáticas	5	0	0	50
		x	Desempenho do software de criação de malha	3	1	1	44

Critério 1: Contribuição/Impacto de determinada causa no problema foco em questão.
Impacto baixo: 1
Impacto médio: 3
Impacto alto: 5
Não se aplica: 0

Critério 2: Facilidade em se atuar sobre a causa
Facilidade baixa: 1
Facilidade média: 3
Facilidade alta: 5
Não se aplica: 0

Critério 3: Autonomia para atuar sobre a causa.
Se não tiver nenhuma autonomia: 0
Se tiver autonomia baixa: 1 (você tem pouca autonomia e precisa interagir com muitas áreas)
Se tiver autonomia média: 3 (você tem autonomia, mas com interagir com poucas áreas)

« Ponto de Corte considerado: 80

Fonte: VALE, 2021.

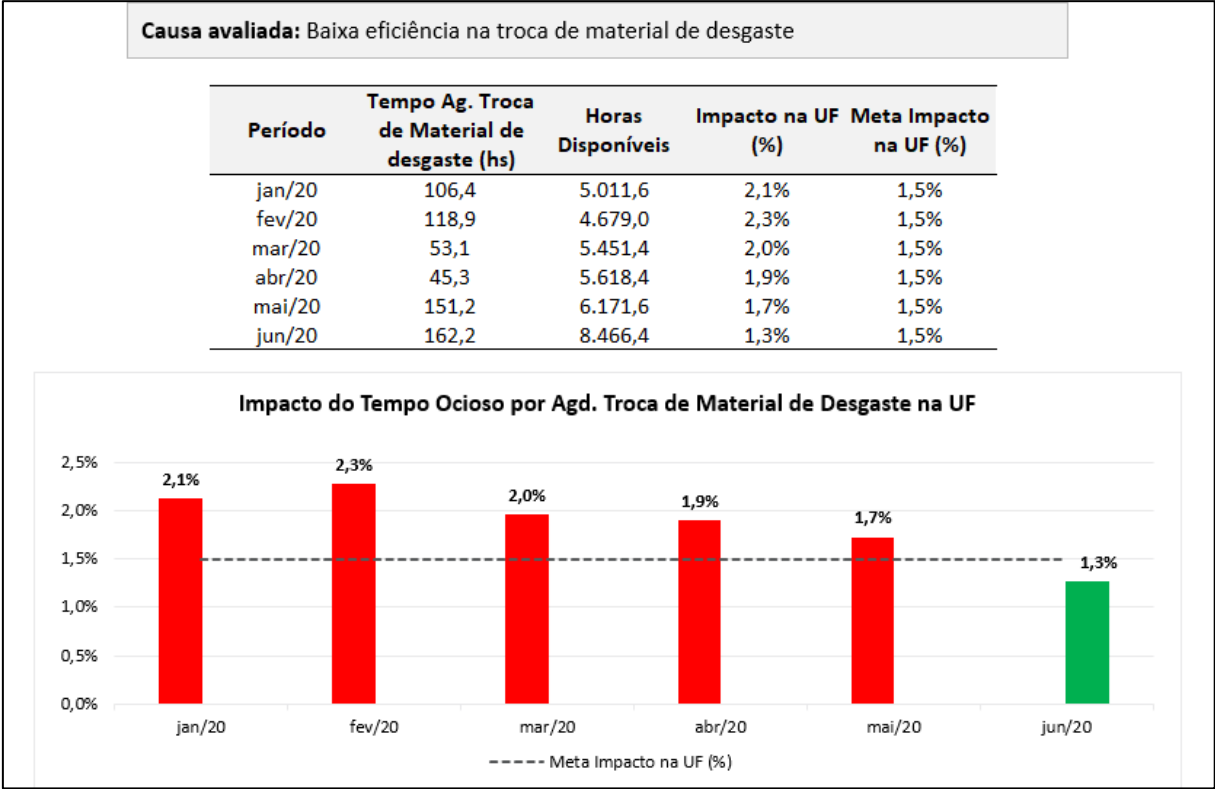
Anexo 2 – Comprovação das principais causas

Figura 24: Análise da técnica de marcação de furos.



Fonte: VALE, 2021.

Figura 28: Impacto em horas ociosas troca de material de desgaste.



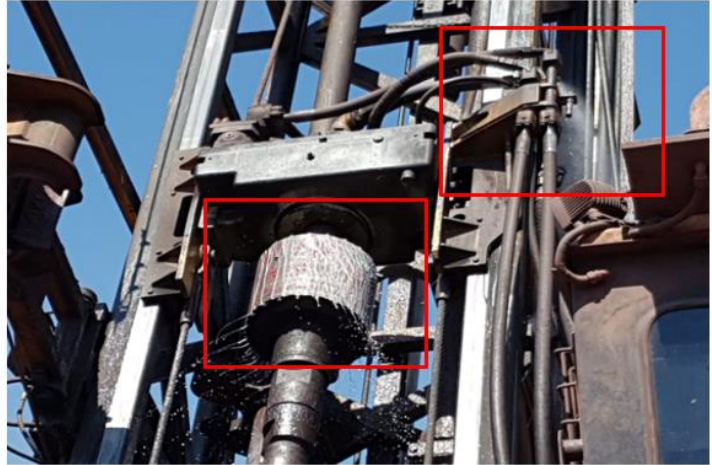
Fonte: VALE, 2021.

Figura 29: Perdas operacionais.

Causa avaliada: Condições Operacionais



Folga excessiva no bucha centralizadora, gerando desalinhamento da perfuração.

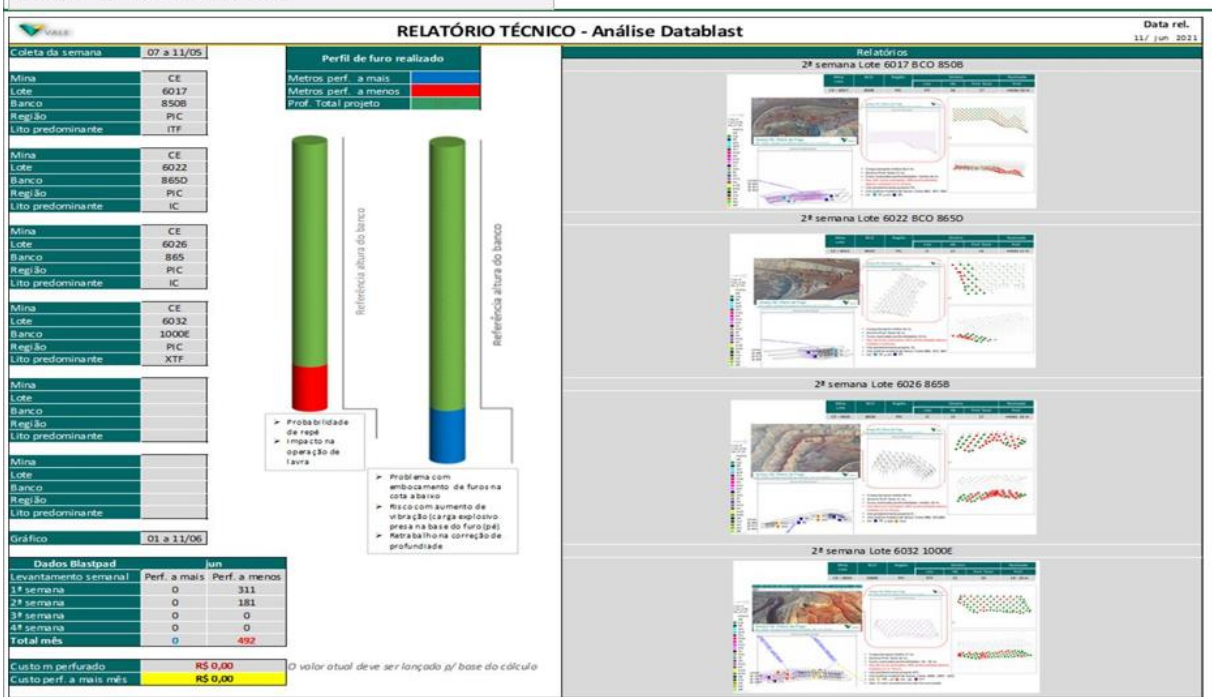


Vazamento de ar e água no sistema de injeção e limpeza da perfuração, causando baixa produtividade.

Fonte: VALE, 2021.

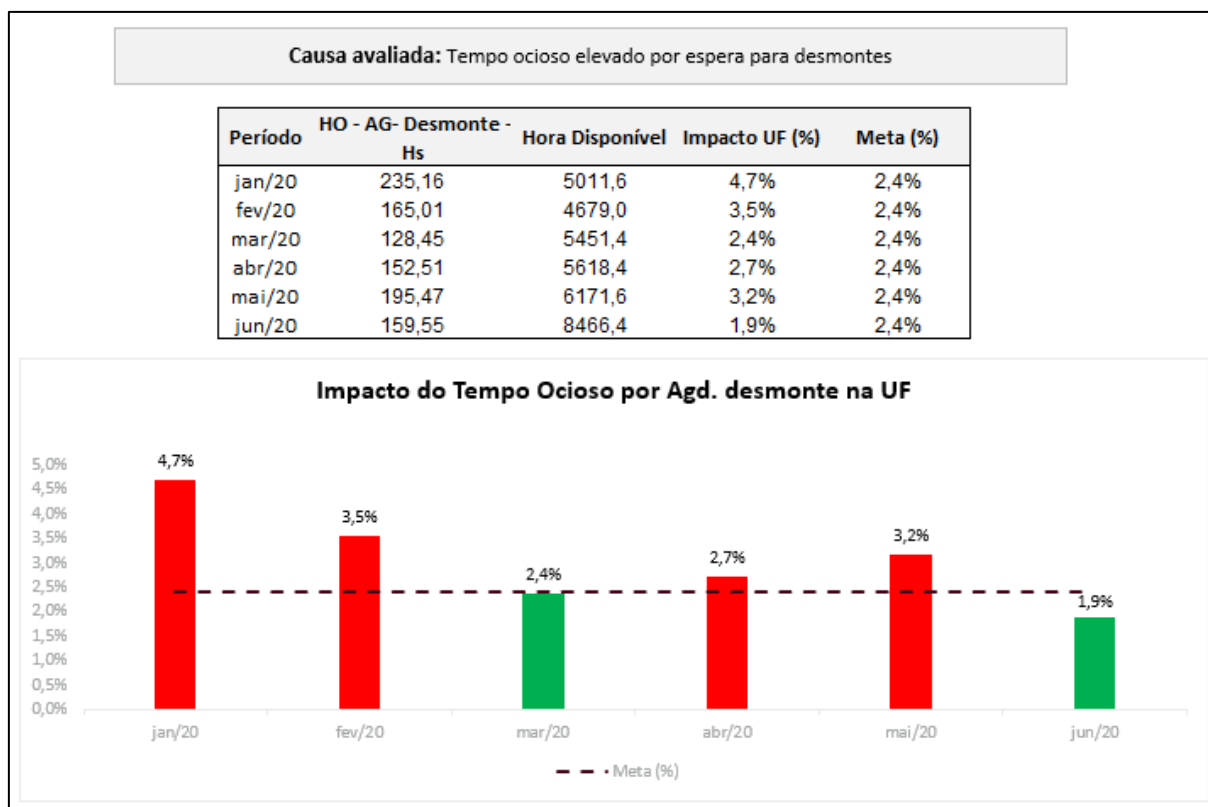
Figura 30: Relatório de técnica de marcação de furos no campo.

Causa avaliada: Técnica de Marcação de furos



Fonte: VALE, 2021.

Figura 31: Impacto em horas ociosas aguardando desmonte.

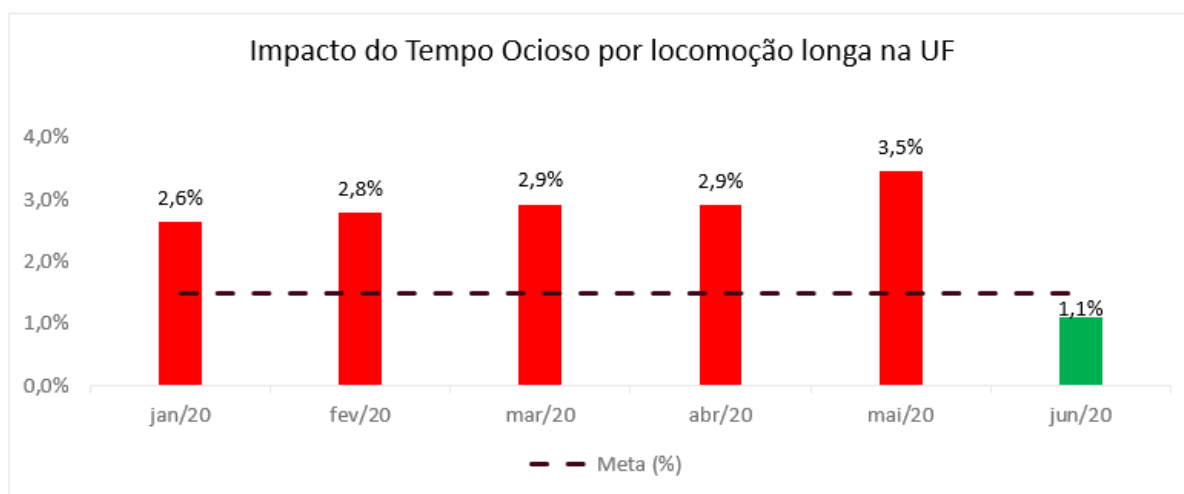


Fonte: VALE, 2021.

Figura 32: Impacto em horas ociosas locomoção longa.

Causa avaliada: Alto índice de locomoções para saída do raio de desmonte;

Período	HO - Locomoção longa -Hs	Hora Disponível	Impacto UF (%)	Meta (%)
jan/20	132,02	5011,6	2,6%	1,5%
fev/20	130,10	4679,0	2,8%	1,5%
mar/20	159,51	5451,4	2,9%	1,5%
abr/20	163,12	5618,4	2,9%	1,5%
mai/20	213,48	6171,6	3,5%	1,5%
jun/20	93,92	8466,4	1,1%	1,5%

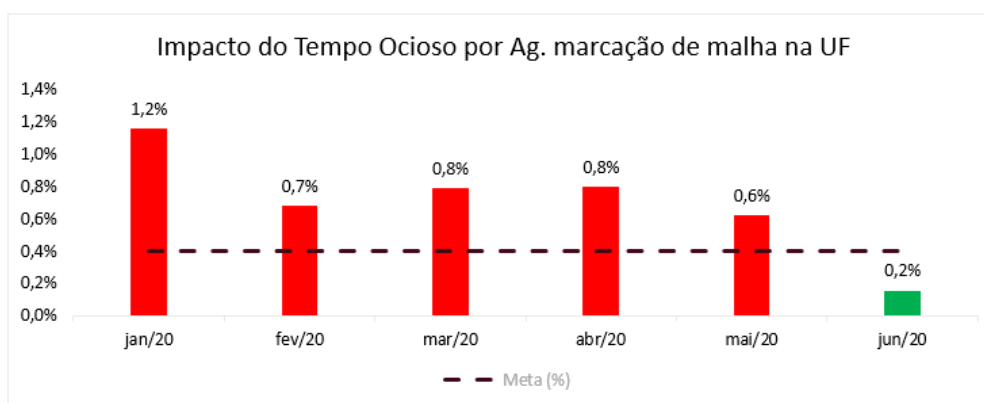


Fonte: VALE, 2021.

Figura 33: Impacto em horas ociosas aguardando marcação de malha.

Causa avaliada: Desconhecimento para criação da malha virtual em parte da equipe de técnicos

Período	HO - Ag - marcação de malha - Hrs	Hora Disponível	Impacto UF (%)	Meta (%)
jan/20	57,93	5011,6	1,2%	0,4%
fev/20	31,68	4679,0	0,7%	0,4%
mar/20	42,79	5451,4	0,8%	0,4%
abr/20	44,82	5618,4	0,8%	0,4%
mai/20	38,34	6171,6	0,6%	0,4%
jun/20	13,28	8466,4	0,2%	0,4%



Fonte: VALE, 2021.

Figura 34: Queda na vida útil de brocas tricônicas

Causa avaliada: Queda na vida útil da ferramenta (Broas Tricônicas)							
 DADOS DE PERFORMANCE DE FERRAMENTAS OPERAÇÃO: Itabira RESPONSÁVEL: arlem.sena@vale.com DATA DE ATUALIZAÇÃO: 10/03/2021				Vida Útil Média 2019 1385,14 Vida Útil Média 2020 818,33			
Fornecedor	Operação	Diâmetro da Broca	Part Number	Série Modelo	IADC	Serial	Metros Perfurados
EPIROC	ITABIRA	9.7/8" POL	91003240	EP640HW	642	3154001	587,00
EPIROC	ITABIRA	9.7/8" POL	91003240	EP640HW	642	3154012	1918,00
EPIROC	ITABIRA	9.7/8" POL	91003240	EP640HW	642	3154103	376,00
EPIROC	ITABIRA	9.7/8" POL	91003240	EP640HW	642	3154111	1126,00
EPIROC	ITABIRA	9.7/8" POL	91003240	EP640HW	642	3154113	1432,00
EPIROC	ITABIRA	9.7/8" POL	91003240	EP640HW	642	3154007	335,00
EPIROC	ITABIRA	9.7/8" POL	91003240	EP640HW	642	3154008	334,00
EPIROC	ITABIRA	9.7/8" POL	91003240	EP640HW	642	3154003	745,00
EPIROC	ITABIRA	9.7/8" POL	91003240	EP640HW	642	3154102	255,00
EPIROC	ITABIRA	9.7/8" POL	91003240	EP640HW	642	3154104	1151,00
EPIROC	ITABIRA	9.7/8" POL	91003240	EP640HW	642	3154101	874,00
EPIROC	ITABIRA	9.7/8" POL	91003240	EP640HW	642	3154009	1085,00

Fonte: VALE, 2021.

Figura 34: Queda na vida útil de hastes de perfuração

Causa avaliada: Queda na vida Útil da ferramenta (Hastes) .



DADOS DE PERFORMANCE DE FERRAMENTAS
OPERAÇÃO: **Itabira**
RESPONSÁVEL: **arlem.sena@vale.com**
DATA DE ATUALIZAÇÃO: **10/03/2021**

Vida Útil Média 2019

10328,0

Vida Útil Média 2020

9808,82

Operação

Part Number	Serial	Data Recebimento	Data de Entrada	Data de Saída	Metros Perfurados	Horas totais perfurada
PA00080405	DTB1207009		02/01/2020	25/02/2020	5378	337,21
DP0758251AS-597	S4030905		03/01/2020	16/01/2020	1642	86,44
92003170C	A685894		03/01/2020	16/01/2020	1642	86,44
PA00080405	DTB1207010		05/01/2020	14/03/2020	9122	584,73
PA00080404	DTB1300001		05/01/2020	14/03/2020	9122	584,73
PA00080405	DTB1207008		07/01/2020	11/02/2020	6638	334,62
DP0758251AS-597	S3025501		18/01/2020	06/02/2020	3193	164,08
92003170C	3126605		18/01/2020	06/02/2020	3193	164,08
92003165	515263		24/01/2020	11/04/2020	12409	563,86
DP0758351AS-597	S4298002		29/01/2020	17/05/2020	20180	1156,48

Fonte: VALE, 2021.