



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



VÍTOR MAIA COUTO

O USO DE SIMULADOR PARA TREINAMENTO DE OPERADORES NA  
MINERAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO

OURO PRETO

2019

VÍTOR MAIA COUTO

O USO DE SIMULADOR PARA TREINAMENTO DE  
OPERADORES NA MINERAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO

Monografia apresentada ao Curso de  
Graduação em Engenharia de Minas da  
Universidade Federal de Ouro Preto como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Engenheiro de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo  
Ortiz

OURO PRETO

2019

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C871u Couto, Vitor Maia .

O uso de simulador para treinamento de operadores na mineração [manuscrito]: um estudo de caso. / Vitor Maia Couto. - 2019.

58 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.

2. Minas e recursos minerais - Planejamento. 3. Lavra de minas. 4. Redução de Custo. 5. Segurança nas minas. I. Couto, Vitor Maia . II. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.68



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

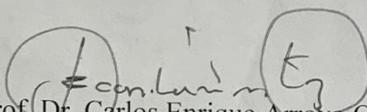
Aos 21 dias do mês de novembro de 2019, às 13h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas DEMIN/EM, no Campus Universitário Morro do Cruzeiro, foi realizada a defesa da Monografia de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“O USO DE SIMULADOR PARA TREINAMENTO DE OPERADORES NA MINERAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO”**, pelo aluno **Vitor Maia Couto**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz (orientador)**, **Prof. Dr. Hernani Mota de Lima** e **M.Sc. Walter Schmidt Felsch Júnior**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou pela Aprovado do candidato, com a nota 10 concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

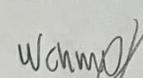
O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após o depósito, no site do Repositório UFOP, da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

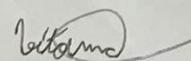
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

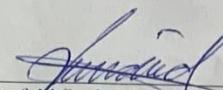
Ouro Preto, 21 de novembro de 2019.

  
Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz  
Presidente da Comissão Avaliadora e Orientador

  
Prof. Dr. Hernani Mota de Lima  
Membro da Comissão Avaliadora

  
M.Sc. Walter Schmidt Felsch Junior  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Vitor Maia Couto

  
Prof. M.Sc. José Fernando Miranda  
Professor responsável pela Disciplina Min 492 – Trabalho de Conclusão de Curso

Aos meus pais, minha irmã e a todos  
que me apoiaram nessa caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora pelas inúmeras bênçãos em minha vida, em especial por esta etapa que concluo agora.

Aos meus pais, Jésus e Isabel, e à minha irmã, Jéssica, pelo carinho, exemplo e apoio de sempre.

A todos os professores da Universidade Federal de Ouro Preto, pela dedicação, paciência e ensinamentos.

Aos amigos e colegas de estudo que sempre me apoiaram e contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

À equipe da Gerência de Operação de Mina pelo trabalho em conjunto. Em especial, ao Valdecy Caldeira, Francis Baêta, Clayton Brito e Alessandra Tavares pela oportunidade e orientação.

Ao professor Carlos Enrique Arroyo Ortiz pela orientação e apoio.

Ao Hernani Mota de Lima e ao Walter Schmidt Felsch Junior por toda inspiração e incentivo.

## RESUMO

Este trabalho avaliou alguns dos benefícios do uso de um simulador de realidade virtual para o treinamento de operadores de caminhões fora de estrada. Para chegar aos resultados, realizou-se um estudo de caso em uma mineração de ferro de grande porte localizada na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Selecionou-se um grupo de 30 operadores com desempenhos operacionais semelhantes, sendo que metade deles foi treinado com o auxílio de um simulador. Posteriormente, os operadores treinados foram alocados em um caminhão exclusivo, enquanto os não treinados operavam um outro caminhão com características semelhantes. Como os dois caminhões tiveram as rotas fixadas no sistema de despacho e os programas de manutenção atrelados, foi possível verificar a diferença de desempenho dos operadores treinados através da comparação da performance dos caminhões participantes do teste, que teve duração de dois meses. Os resultados indicaram uma redução de 3,2% de consumo de combustível, que representaria no ano de 2018, 644.544,24 litros de diesel economizados e 1,8 toneladas de CO<sub>2</sub> a menos na atmosfera. Além disso, houve ganhos na produtividade, tempo de manobra e velocidade média dos operadores treinados. Registrou-se também, uma redução acima de 23% na ocorrência de diversos eventos operacionais, relacionados a situações de risco e diminuição da vida útil de componentes mecânicos. Após o período de teste, os operadores que já haviam sido treinados voltaram para uma nova etapa de treinamento no simulador. Esses operadores apresentaram uma evolução de desempenho, quantificada pelo simulador na redução de 90% dos erros operacionais cometidos durante avaliações realizadas com o auxílio da ferramenta.

Palavras-chave: Simulador. Operação de Mina. Treinamento. Redução de Custo. Segurança.

## **ABSTRACT**

The following work evaluated the benefits of using a Virtual Reality Simulator for the training of haul trucks operators. In order to get the results, a case study was conducted in a world class iron ore open pit mine, located in the Quadrilátero Ferrífero, MG - Brasil. A group of 30 operators with similar performance was selected and half of them had training in a simulator. Later, the trained workers operated one specific haul truck, while the workers without training operated a different truck with similar characteristics. As the two trucks had fixed routes in the dispatch system and similar maintenance programs, the performance gap between the two groups was determined through a comparison between the performance of each truck in the experiment, which took two months. There was a reduction of 3.2% of fuel consumption, that would represent a total of 644544.24 liters of saved diesel for 2018 and 1.8 tons less CO<sub>2</sub> emitted in the atmosphere. In addition, there were improvements on productivity, maneuvering times and average speed for the trained workers. The great reduction of operational events related to hazards and component lifespan reduction were also registered. After the experiment period, the workers that had already been trained were submitted to a new training program in the simulator. These workers showed further performance increase, measured by the simulator as a reduction of 90% of operational mistakes made during the tests made with the help of the tool.

Keywords: Simulator. Mine Operations. Training. Cost Reduction. Safety.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição dos custos da lavra convencional por caminhões .....	15
Figura 2 - Ciclo de transporte por caminhões em mina a céu aberto .....	16
Figura 3 - Divisão dos custos de operação em uma mina de ferro de grande porte .	18
Figura 4 - Peso de fatores chave na produtividade de equipamentos.....	20
Figura 5 - Treinamento em um simulador de avião primitivo.....	22
Figura 6 - Número de simuladores de mineração por país.....	26
Figura 7 - Metodologia simplificada do trabalho .....	28
Figura 8 - Representatividade do custo com combustível nos custos totais da operação de transporte .....	30
Figura 9 - Acompanhamento dos pontos de ocorrências de eventos de superaquecimento dos freios .....	36
Figura 10 - Visão geral do simulador utilizado no treinamento dos operadores .....	38
Figura 11 - Simulação de incêndio no motor .....	39
Figura 12 - Indicação na tela do simulador de erro de operação cometido .....	40
Figura 13 - Instrutor acompanhando o desempenho do operador durante o treinamento .....	41
Figura 14 - Fases da etapa de treinamento no simulador .....	42
Figura 15 - Instrutor orientando o operador durante o treinamento .....	43
Figura 16 - Estimativa do consumo de combustível na tela do simulador .....	44
Figura 17 - Distribuição dos erros operacionais em cada avaliação .....	47
Figura 18 - Tempos médios de manobras durante as avaliações .....	48
Figura 19 - Consumo estimado pelo simulador durante as avaliações .....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estudo estatístico dos dados dos operadores selecionados .....	33
Tabela 2 - Dados para a seleção dos caminhões .....	34
Tabela 3 - Consumo de combustível no período de teste .....	50
Tabela 4 - Indicadores importantes de produção no período de teste .....	51
Tabela 5 - Ocorrências de eventos operacionais durante o período de teste .....	52

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1. CONTEXTO E MOTIVAÇÕES .....	12
1.2. JUSTIFICATIVA .....	12
1.3. OBJETIVOS .....	14
1.3.1. Objetivo Geral.....	14
1.3.2. Objetivos Específicos .....	14
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	14
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1. CUSTOS DE LAVRA.....	15
2.2. TRANSPORTE EM MINA A CÉU ABERTO .....	16
2.2.1. Custos de transporte .....	17
2.2.1.1. Óleo Diesel.....	18
2.3. TREINAMENTO .....	19
2.3.1. Treinamento na Mineração.....	21
2.4. SIMULADORES E REALIDADE VIRTUAL.....	22
2.4.1. Simuladores na mineração .....	25
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>28</b>
3.1. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	28
3.2. SISTEMA DE DESPACHO ELETRÔNICO.....	30
3.2.1. Consumo de combustível.....	30
3.2.2. Outros indicadores relevantes .....	31
3.2.3. Seleção dos operadores.....	31
3.2.4. Seleção dos caminhões .....	34
3.3. VIMS CATERPILLAR .....	35
3.3.1. Principais eventos operacionais registrados.....	35
3.4. SIMULADOR .....	38
3.4.1. Período de treinamento.....	41
3.5. PERÍODO DE TESTE.....	45
3.6. NOVA ETAPA DE TREINAMENTO NO SIMULADOR .....	46
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>47</b>
4.1. RESULTADOS DOS TREINAMENTOS NO SIMULADOR.....	47
4.2. RESULTADOS DO TESTE .....	49

4.2.1. Resultados relativos a produção .....	50
4.2.2. Resultados relativos a manutenção e a segurança .....	51
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>53</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONTEXTO E MOTIVAÇÕES

Segundo CURI (2017), a mineração é conceitualmente dividida em quatro fases: prospecção, exploração, desenvolvimento e lavra (ou exploração). Essa última é definida pela aplicação dos trabalhos necessários ao aproveitamento econômico da jazida.

Ainda de acordo com CURI (2017), o sucesso das operações de lavra a céu aberto, é dependente da eficiência das operações unitárias de lavra, sendo elas, perfuração, desmonte, carregamento e transporte. Para isso, é necessário ter equipamentos adequados e mão de obra qualificada.

Segundo CALAES (2006), dentre as especificidades do setor mineral, destaca-se a Rigidez Locacional, pois ao contrário das demais atividades industriais, a mineração não se localiza em função dos fatores de atração convencionalmente avaliados, como por exemplo disponibilidade de mão de obra qualificada.

Este trabalho é voltado para um estudo de caso, que teve como motivação, o aumento da frota de transporte de uma mina de minério de ferro de grande porte em 2019 atrelado a falta de operadores experientes disponíveis no mercado, além da alta representatividade do diesel nos custos da operação de transporte. A ferramenta estudada, para melhorar o treinamento e reduzir possíveis impactos na produção durante esse período, foi um simulador de realidade virtual.

Definida a ferramenta a ser testada, o estudo de caso desenvolveu-se para demonstrar os benefícios da utilização do simulador para o treinamento de operadores de caminhões fora de estrada, recomendando assim a aquisição deste. Como foco do trabalho, esteve em análise o consumo de diesel e eventos de problemas operacionais registrados por sensores já instalados nos equipamentos.

### 1.2. JUSTIFICATIVA

CALAES (2009) prevê nas principais tendências percebidas até 2030, que terá continuidade o atual processo de reestruturação e expansão de mercados, segundo um modelo de globalização previamente ajustado, porém marcado pela competição cada vez mais intensa, seja ela entre empresas ou entre países.

No ramo da mineração, a realidade não será diferente. RIBEIRO (2013) destaca que a competitividade no mercado global de minério de ferro tem despertado

nas empresas a necessidade da realização de estudos visando a redução dos seus custos operacionais.

Segundo COUTINHO (2017), o processo de transporte de material realizado por caminhões é o método mais utilizado em minas a céu aberto e representa a maior parte do custo operacional de lavra. O autor destaca a importância de aumentar a eficiência operacional nesse processo para se ter um custo operacional competitivo, citando o diesel, que tem um alto custo, além de um alto consumo. Portanto, a relação de consumo desse insumo se caracteriza como alvo potencial para alcançar os objetivos de um custo operacional competitivo.

CAMPOS JUNIOR *et al.* (2013) destacam que uma redução no consumo de diesel, que é um combustível fóssil, sem estar acompanhada de uma queda na produção, gera não apenas ganhos financeiros para empresa, mas também ambientais, no sentido da redução na emissão de gases poluentes provenientes da queima do combustível.

Ainda de acordo com CAMPOS JUNIOR *et al.* (2013), é importante ter na operação de mina, operadores de fora de estrada bem treinados, afim de auxiliar na preservação dos equipamentos, tornando-os menos susceptíveis a falhas prematuras ou danos a componentes, além de evitarem desvios no consumo de diesel.

Segundo FELSCH JÚNIOR (2014), é comum encontrar cidades em Minas Gerais alvos de grandes empreendimentos industriais, devido a sua riqueza natural. Entretanto, essas não possuem mão de obra qualificada disponível, fazendo com que empresas de mineração invistam cada vez mais em programas de capacitação profissional para suprir essa demanda.

PAGNUSSAT *et al.* (2014), corroboram sobre a importância de uma capacitação eficiente, necessitada pelas mudanças tecnológicas e constante necessidade de aumento de produtividade. Além disso, destacam os simuladores de realidade virtual como ferramentas de apoio importantes para os programas de treinamento, sendo eficiente ao proporcionar a aquisição de habilidades para a operação de máquinas em condições semelhantes aquelas encontradas em campo.

Portanto, justifica-se a necessidade desse estudo no sentido de buscar novas alternativas para melhorar a eficiência da capacitação de operadores de caminhões fora de estrada. O conceito de eficiência está relacionado a otimização, na aplicação de recursos financeiros e materiais em relação aos resultados alcançados, ou seja,

significa fazer mais com menos recursos (FRASSON, 2001; SANO e MONTENEGRO FILHO, 2013).

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar alguns dos benefícios do treinamento de operadores de caminhões fora de estrada com o uso de um simulador de realidade virtual.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar o desempenho e avaliar a evolução, com base em provas no simulador, de operadores de caminhões fora de estrada após um período de treinamento;
- Avaliar o efeito da capacitação de operadores via simulador, no consumo de diesel;
- Verificar o comportamento de indicadores importantes de produção após período de treinamento no simulador;
- Observar a influência do treinamento com simulador nos índices de ocorrências de eventos operacionais que diminuem a vida útil do equipamento e aumentam os riscos relacionados a atividade.

### 1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) constitui-se de cinco capítulos, sendo este, parte do primeiro. A introdução foi elaborada diante do contexto e motivações, justificativa e objetivos do projeto. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica acerca dos temas abordados no trabalho, sendo estes, custos de lavra, transporte de mina, treinamento e simuladores de realidade virtual. O terceiro capítulo abrange a metodologia adotada no estudo de caso apresentado no trabalho. Já os resultados e discussão são apresentados no quarto capítulo. O quinto capítulo compõe as conclusões do trabalho. As referências bibliográficas utilizadas encontram-se ao final do documento.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. CUSTOS DE LAVRA

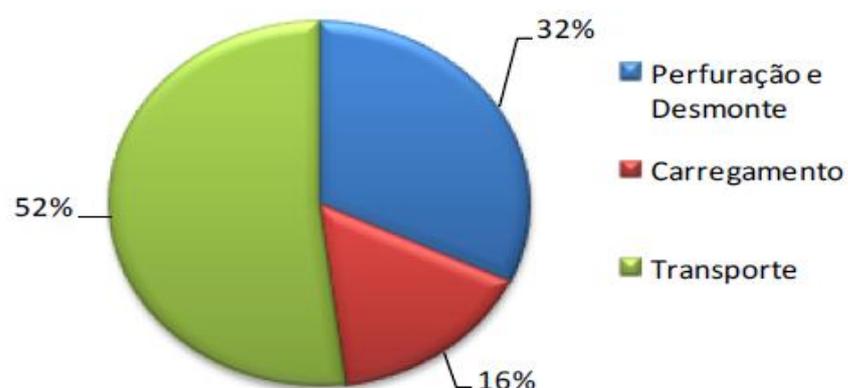
Segundo CURI (2017), o valor do produto é fator condicionante na viabilização de um empreendimento mineiro, mas é de previsão difícil, sendo função direta do mercado consumidor, oscilando conforme as tendências mercadológicas e a conjuntura econômica. Já o custo de produção é dado pelo somatório dos custos das operações de lavra e tratamento do minério. Portanto, esses custos independem do valor do minério. Essa relação interna do custo de produção, faz com que este seja o principal alvo para o aumento dos lucros.

De acordo com CALAES (2006), para determinação e comparação da capacidade de geração de valor de duas ou mais empresas de mineração é indispensável analisar pontualmente diferentes fatores intrínsecos e extrínsecos da competitividade. Dentre os fatores intrínsecos, o autor cita os custos, dentre eles os custos de produção, sendo mais específico ao destacar os custos de lavra.

O custo de lavra é calculado com base no custo de uma tonelada de minério que entra no processo de beneficiamento, estando já incluso nesse, o custo de remoção de estéril (CURI, 2014).

Grande parte das minas que operam pelo método convencional de lavra por caminhões tem a composição de seus custos de lavra divididos conforme a Figura 1, sendo que a maior parte, representada por 52% dos custos, é ocupada pelo custo com o transporte por caminhões (TRUEMAN, 2001, *apud* LOPES, 2010).

Figura 1 - Distribuição dos custos da lavra convencional por caminhões



Fonte: TRUEMAN (2001) *apud* LOPES (2010)

CURI (2014), aborda sobre o aumento no custo de lavra com o aprofundamento da mina, por consequência do aumento do custo de transporte, gerado pelo aumento da distância média de transporte (DMT). RIBEIRO (2013), pondera que dentre os motivos do aumento dos custos operacionais de lavra está o aumento dos preços do óleo diesel.

## 2.2. TRANSPORTE EM MINA A CÉU ABERTO

Nas minas são produzidos basicamente dois tipos de materiais: minério, normalmente transportado para a usina de beneficiamento e estéril, material não aproveitável economicamente, transportado e empilhado em locais apropriados. Para fazer o transporte dos materiais geralmente se utilizam caminhões ou correias transportadoras. O método de lavra por caminhões é o mais utilizado no mundo (LOPES,2010; BORGES,2013; COUTINHO,2017).

Segundo QUEVEDO (2009), na operação de transporte por caminhões de uma mina, os equipamentos são direcionados pelo sistema de despacho para uma frente de lavra, onde estará alocado um equipamento de carga (pás carregadeiras ou escavadeiras) que irão retirar o material e carregar os caminhões. Então, os caminhões carregados transportam o material até o ponto de descarga (britadores, pilha de estéril ou pilha pulmão) e em seguida voltam para uma frente de lavra disponível, repetindo as mesmas operações. Na Figura 2, é apresentado um esquema que exemplifica como é o ciclo de transporte dos caminhões em uma mina a céu aberto.

Figura 2 - Ciclo de transporte por caminhões em mina a céu aberto



Fonte: COUTINHO (2017)

Dentre os tempos que mais influenciam na duração de um ciclo estão os tempos de manobra e basculamento. O tempo de manobra se refere ao tempo gasto pelo caminhão para o correto posicionamento frente ao equipamento de carga, medido a partir da chegada do caminhão na praça de carregamento até o momento do início do carregamento. Já o tempo de basculamento é compreendido entre a chegada do caminhão ao ponto de descarga, passando pelo processo de descarga do material, até o momento que o operador solicita um novo destino ao sistema de despacho (FELSCH JUNIOR, 2014).

Segundo COUTINHO (2017), deve-se buscar manobras seguras e com o menor tempo possível. O autor destaca ainda a importância de se fazer treinamentos intensivos para melhorar a habilidade dos operadores em manobras.

Os sistemas e indicadores de transporte em minas a céu aberto permitem que as empresas possam buscar uma atividade cada vez mais produtiva, segura e correta, no sentido de preservação dos equipamentos. Segundo FELSCH JUNIOR (2014), com o auxílio da telemetria embarcada é possível acompanhar de forma detalhada e individual, o processo de operação dos caminhões, analisando fatores chave, como velocidade dos equipamentos, marcha adequada para operação, utilização incorreta de freios ou qualquer outro componente que possua sensores eletrônicos de monitoramento.

### 2.2.1. Custos de transporte

Para CURI (2017), a principal desvantagem da lavra a céu aberto em comparação com a lavra subterrânea está ligada aos altos custos despendidos para remoção, transporte e disposição de materiais estéreis.

De acordo com LOPES (2010), no final da década de 1940 começaram os estudos com o objetivo de reduzir os custos com o transporte nas minas. Dentre esses destacam as alternativas de uso de correias transportadoras e britagens moveis. Entretanto, a lavra com caminhões destaca-se das outras principalmente pela flexibilidade, tanto de frentes de lavra quanto de variações dos locais de despejo.

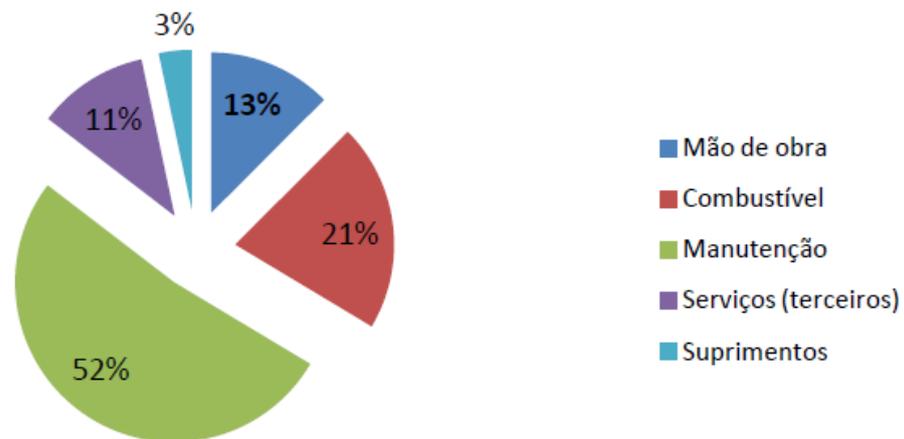
Segundo BORGES (2013), os custos de carregamento e transporte representam em torno de 66% dos custos totais de uma operação de lavra. Alguns autores estimam que o custo da operação de transporte em minas a céu aberto representa cerca de 60% do custo operacional de mineração, podendo ultrapassar essa marca em algumas minas (ALARIE e GAMACHE, 2002; HARTMAN, 1992, *apud*

RIBEIRO, 2013). Portanto, qualquer redução de custo nesse setor, resultará em economias significativas.

#### 2.2.1.1. Óleo Diesel

LOPES (2010) destaca que os altos custos com o transporte estão diretamente ligados aos custos com energia, geralmente de origem fóssil, o diesel. Na Figura 3, é mostrado a participação do custo com combustível nos custos de operação de uma mina de ferro de grande porte. OLIVEIRA (2016) salienta que em uma mina de minério de ferro, os custos referentes a óleo diesel referem-se em sua maior parte ao consumo pelos caminhões fora de estrada.

Figura 3 - Divisão dos custos de operação em uma mina de ferro de grande porte



Fonte: FELSCH JUNIOR (2014)

Alguns autores apresentam números ainda maiores, quando tratam da participação do custo de diesel nos custos operacionais de uma mina. RIBEIRO (2013) apresenta que o custo de óleo diesel representa 37% dos custos totais de lavra em um método de lavra convencional por caminhões. Segundo LOPES (2010), em uma lavra convencional por caminhões, quanto se avalia o custo total de lavra, representado pelos custos de manutenção e operacionais somados, os custos com diesel e lubrificantes representam 38% dos custos totais deste tipo de lavra. É importante citar, que nesses dois últimos casos analisados, os equipamentos de carregamento e de infraestrutura também eram movidos a diesel.

RIBEIRO (2013) destaca que o compromisso com a preservação do meio ambiente é fundamental na estratégia de sustentabilidade das mineradoras. LOPES

(2010) comenta sobre a pressão social existente para a redução das emissões de carbono, que estão associadas ao consumo de diesel. Segundo BARTHOLOMEU (2006), um litro de diesel consumido gera 2,7458 kg de dióxido de carbono. A gravidade da questão existe, pois, o dióxido de carbono é o gás que mais contribui para o aquecimento global, permanecendo na atmosfera por cerca de 100 anos após emitido (RIBEIRO, 2013).

Segundo PEREIRA (2019), o consumo de diesel é afetado por diversas variáveis, como velocidade de transporte, carga utilizada, condições específicas de cada mina, condições climáticas, distâncias percorridas, número de manobras realizadas, dentre outras. Entretanto, destaca que um dos fatores que mais interfere no consumo é a forma com que o operador realiza a operação do fora de estrada, citando que segundo os fabricantes desses equipamentos, a forma mais adequada é uma operação mais suave e constante possível.

Nesse mesmo sentido, RODOVALHO *et al.* (2016) salientam a importância de se avaliar a influência do fator humano para entender o comportamento do consumo de combustível. Influência exercida pelos diferentes estilos de condução, que diferem em condições de aceleração, frenagem, curvas, variações de velocidades e manobras.

### 2.3. TREINAMENTO

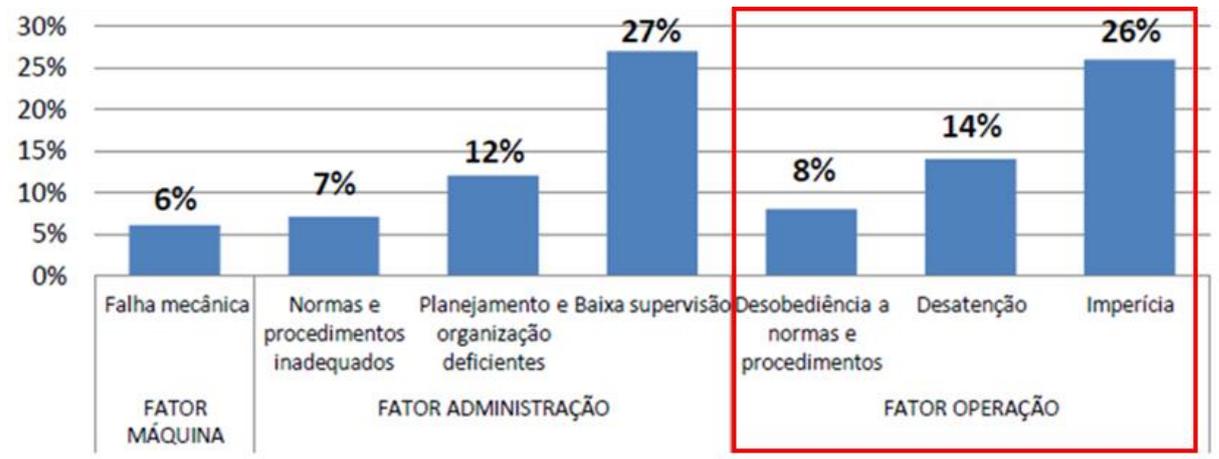
O treinamento é uma ação planejada pela organização que propicia a aquisição de habilidades técnicas e comportamentais, estando diretamente ligado a identificação e superação de deficiências no desempenho de empregados (BORGES-ANDRADE, 2002).

CALAES (2006) cita a capacitação produtiva de recursos humanos como fator interno à empresa determinante na análise de competitividade sistêmica entre organizações. Segundo MENDES *et al.* (2013), as práticas de treinamento voltadas para a força de trabalho tornaram-se uma necessidade crescente nas empresas para atender as demandas de um mercado cada vez mais competitivo, uma vez que o profissional bem treinado desenvolve melhor seu trabalho.

A metodologia de treinamento mais utilizada em empresas, para a formação de operadores, tem sido a combinação de treinamentos teóricos e práticos diretamente nas máquinas e equipamentos (PARISE e MALINOVSKI, 2002, *apud* LOPES *et. al.*, 2010).

A Figura 4 apresenta o resultado de uma pesquisa realizada nos Estados Unidos e Canadá, entre os anos de 1989 e 2004, que mostra a representatividade de fatores chave na produtividade de equipamentos.

Figura 4 - Peso de fatores chave na produtividade de equipamentos



Fonte: Revista M&T (2004) *apud* FELSCH JUNIOR (2014)

Dentre os fatores citados na pesquisa, pode-se destacar o fator operação, que tem uma representatividade de 48%, sendo, portanto, o mais representativo dentre os três apresentados. Todas as três subdivisões que compõe o fator operação poderiam ter os impactos gerados minimizados através da realização de treinamentos. A ação do treinamento seria mais direta ainda no subgrupo denominado imperícia, que é a falta de conhecimento ou habilidade específica para o desenvolvimento de uma atividade.

Mesmo diante dessa situação, segundo CANNELL e GOLD (2001), no Brasil, algumas empresas de transporte ignoram os benefícios que o treinamento pode oferecer em termos de eficiência e eficácia organizacional, não considerando essa área como prioridade, sendo a primeira a sofrer interrupções esporádicas e muitas vezes permanentes em época de redução de custos.

ROSA *et al.* (2017) e SERGIO *et al.* (2018) destacam que o treinamento de motoristas para a forma mais correta de condução de veículos é imprescindível para a redução do consumo de combustível. Além desse, existem outros benefícios como a diminuição do desgaste de componentes mecânicos e o aumento da segurança (ROSA *et al.*, 2017).

### 2.3.1. Treinamento na Mineração

De acordo com CURI (2014), considerando, em termos sociais, que um dos objetivos de um empreendimento mineiro é levar desenvolvimento à região que está implantado, deve-se buscar o máximo aproveitamento da mão de obra local, elevando o padrão de vida dos habitantes da área de influência. Desse modo, evidencia-se a necessidade de criação de cursos para treinamentos específicos das pessoas que irão trabalhar no empreendimento.

De acordo com a NR 22 (BRASIL, 2019), que trata sobre segurança e saúde ocupacional na mineração, a empresa deve proporcionar aos trabalhadores treinamento, informações e reciclagem necessárias para preservação da sua segurança e saúde, levando-se em consideração o grau de risco e natureza das operações.

Ainda de acordo com a NR 22 (BRASIL, 2019), o treinamento específico na função consistirá de estudo e práticas relacionadas às atividades com carga horária mínima de 40 horas para trabalho em minas a céu aberto.

De acordo com FELSCH JUNIOR (2014), atualmente, não basta apenas ao operador a operação manual de máquinas, mas é necessário a percepção de sinais e a interpretação de dados fornecidos pelos equipamentos. O autor destaca ainda, a importância da participação dos operadores para cumprir as exigências por aumento de competitividade na mineração, como o aumento da produtividade e a redução de custos.

Segundo FELSCH JUNIOR (2014) e RODOVALHO *et al.* (2016), as equipes de operação de mina correspondem a um grupo heterogêneo, existindo diversos perfis de operadores, de acordo com experiência e treinamento. Esses perfis influenciam diretamente na capacidade de executar cada etapa do processo da maneira mais segura, econômica e produtiva possível. Entretanto, o treinamento é a única forma eficaz de diminuir essa disparidade existente, já que a experiência é algo que se adquire com o tempo.

COUTINHO (2017) apresenta como uma das condições essenciais para um bom desempenho na operação dos caminhões, os treinamentos e capacitação dos motoristas. De acordo com FELSCH JUNIOR (2014), o desenvolvimento de cada operador de um equipamento de mina está ligado a prática de operação e habilidades desenvolvidas através dos treinamentos.

COUTINHO (2017) conclui que a intensa capacitação de operadores e a aplicação diária das boas práticas possibilitam a redução de custo operacional da mina, consequência de uma redução do tempo de ciclo e danos causados aos equipamentos, além da redução do risco de acidentes.

#### 2.4. SIMULADORES E REALIDADE VIRTUAL

Provavelmente devido ao risco associado a atividade, o setor aéreo foi o pioneiro no uso de simuladores. Segundo a Força Aérea Brasileira (FAB, 2019), alguns inventores, preocupados com os riscos da aviação, criaram alguns aparelhos chamados inicialmente de treinadores de voo, que devido a criação da realidade aumentada agora, são mais conhecidos como simuladores.

A história desses simuladores teve início em 1910, com dois exemplos semelhantes, o “Sanders Teacher” e o invento de Eardley Billing, de um aeroplano sobre uma articulação universal fixa ao solo (FAB, 2019). Ambos bem semelhantes ao mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Treinamento em um simulador de avião primitivo



Fonte: FAB (2019)

LATTA e OBERG (1994), definem realidade virtual como a simulação de ambientes realistas, permitindo a iteração humana com estes. Destacam ainda a

possibilidade de o participante realizar operações que normalmente não seriam possíveis na situação real, citando o caso do treinamento de pilotos de avião em simuladores de voo. RIBEIRO e MACHADO (2016) destacam a obrigatoriedade, nos dias atuais, do treinamento de pilotos em simuladores no setor da aviação.

RIBEIRO E ZORZAL (2011), dizem que embora a realidade virtual tenha se consolidado na década de 1990, a tecnologia tem suas origens na década de 1950. Em 1956, Morton Heilig iniciou a construção de uma máquina que permitia ao usuário um passeio virtual de motocicleta por Manhattan, através da projeção de um filme com sensações sincronizadas de sons, aromas, vibrações e vento.

Apesar disso, segundo RIBEIRO E ZORZAL (2011), o marco da criação do conceito de realidade virtual ocorreu em janeiro de 1963, quando Ivan Sutherland apresentou sua tese de doutorado no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), usando pela primeira vez a computação gráfica interativa. No Brasil, os primeiros estudos relacionados a área tiveram início em 1992.

Como um dos primeiros registros de realidade aumentada usada para o treinamento, RIBEIRO E ZORZAL (2011) destacam o simulador “Super Cockpit” desenvolvido em 1981 pela Força Aérea Americana contando com um capacete de visão óptica.

Segundo BARBOSA *et al.* (2016), não se pretende substituir os métodos tradicionais de treinamento, mas tão somente complementá-los com recursos visuais e interativos, proporcionando agilidade, flexibilidade e atratividade aos usuários.

LOPES *et al.* (2010) afirmam que uma das formas de melhorar a eficiência das operações é a capacitação dos operadores por meio da oferta de treinamentos. Em seu estudo, avaliou o desempenho de operadores iniciantes de máquinas de colheita de madeira no treinamento com um simulador de realidade virtual. LOPES *et al.* (2010) e PAGNUSSAT *et al.* (2014), concluíram seus estudos afirmando que o simulador de realidade virtual é uma ferramenta eficiente, permitindo a formação de futuros operadores em menor tempo e baixo custo.

BARBOSA *et al.* (2016) argumentam que uma das formas de aumentar a eficiência do processo de produção, movimentação e transporte de materiais, é através da utilização de sistemas de realidade virtual para simulação e treinamento. RIBEIRO e MACHADO (2016) citam a diminuição de custos e riscos ao utilizar o treinamento através de um simulador, contribuindo para o aumento de desempenho e da qualidade da operação daquele que está sendo treinado.

NETTO *et al.* (1998) destacam exemplos e perspectivas de ganhos com o uso da realidade virtual para treinamento de funcionários em linhas de produção. OLIVEIRA *et al.* (2018) abordam sobre os benefícios alcançados com o uso de simulador para treinamentos de motoristas de uma empresa de transporte rodoviário de passageiros.

MENDES *et al.* (2013), em um extenso estudo, realizado entre 2006 e 2010, com o uso de simulador de condução de trens, concluíram que o mesmo se tornou uma ferramenta crucial para o treinamento de maquinistas. Os autores citam que o simulador contribuiu e aprimorou o processo de aprendizagem, criando conceitos e padrões operacionais permanentes nos maquinistas ferroviários. Em relação ao processo de aprendizagem do maquinista novo e do maquinista veterano, concluíram no estudo que a idade e/ou a escolaridade não criaram parâmetros para diferenciá-los, pois em ambos os casos essa diferença proporcionou a mesma percepção sobre o processo de aprendizagem realizado no treinamento com o simulador de condução de trens.

LOPES *et al.* (2010) destacam os empecilhos da utilização dos próprios equipamentos no processo de treinamento, tais como, os elevados custos de mobilização desses para o treinamento, os riscos de acidentes, a maior possibilidade de quebra e as expectativas imediatas dos resultados de produção, sendo que este último pode atrapalhar fortemente o desenvolvimento da pessoa que está sendo treinada, justamente por não dar o tempo necessário para que aquele indivíduo possa realmente se familiarizar e executar da melhor maneira possível a operação. Além disso, MENDES *et al.* (2013) reforça que na forma de treinamento tradicional, constando de aulas teóricas e, posteriormente, aulas práticas com um instrutor, o treinando convivia somente com conhecimento tácito desse, aprendendo uma maneira específica de operar, não tendo uma visão sistêmica da situação e dos parâmetros para realizar uma operação mais eficiente.

ROCHA (2012) aborda sobre a importância da simulação em ambientes virtuais para treinar ações e comportamentos humanos em situações de emergência, como em incêndios e explosões, reduzindo os riscos reais de perdas de vida e patrimônio. Essas situações de perigo não estão acessíveis ao treinamento convencional (BRAGA, 2001; BARBOSA *et al.*, 2016).

RIBEIRO e MACHADO (2016) destacam a possibilidade única que um simulador de voo proporciona aos analistas comportamentais de fazer uma

observação laboratorial com o intuito de prever comportamentos que pilotos de avião teriam ao se depararem com situações adversas na prática, tudo isso pela possibilidade que o ambiente de simulação fornece de antecipar essas situações nos treinos. Destacam ainda, o importante papel do simulador em enxergar o erro como uma oportunidade única de aprendizagem e melhoria, se tornando assim essenciais para a redução desses erros.

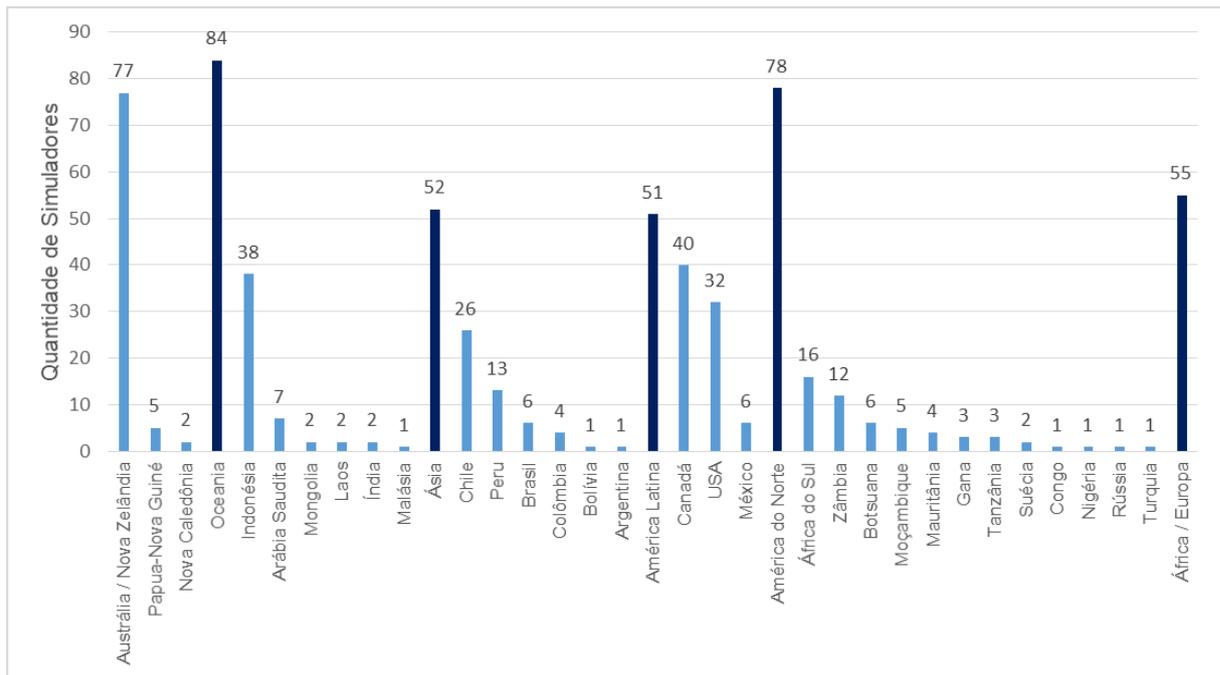
#### 2.4.1. Simuladores na mineração

O objetivo do desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias por mineradoras é buscar continuamente a redução de custos das operações. GANDRA (2004) destaca que dentre os principais problemas relacionados a treinamentos em mineradoras estão as poucas simulações práticas sobre os comportamentos necessários nas emergências.

O primeiro simulador de caminhão basculante de mineração foi lançado em 1998 (IMMERSIVE TECHNOLOGIES, 2019). Dentre os principais fabricantes mundiais de simuladores para mineração destacam-se a Immersive Technologies, a Fifth Dimension Technologies (5DT) e a Thoroughtec Simulation. Dentre essas, somente a Immersive Technologies possui um escritório no Brasil, localizado em Belo Horizonte-MG. Entretanto, todas as três empresas prestam serviço ao mercado brasileiro.

A Immersive Technologies é responsável por 70% do mercado de simuladores em mineração no mundo (IMMERSIVE TECHNOLOGIES, 2018). Na Figura 6, é apresentado um levantamento feito pela empresa em 2014 sobre os países onde estavam instalados seus simuladores.

Figura 6 - Número de simuladores de mineração por país



Fonte: Adaptado de IMMERSIVE TECHNOLOGIES (2018)

Analisando os dados, pode-se perceber o atraso do Brasil no uso dessa tecnologia, apesar de ser um dos principais produtores do mercado de mineração mundial (IBRAM, 2012). Destacam-se o uso por países desenvolvidos como Estados Unidos, Canadá, Austrália e Nova Zelândia. Aos analisarmos países em desenvolvimento, como o Brasil, destacam-se Indonésia, Chile, Peru, África do Sul e Zâmbia, ambos com números bem mais expressivos que os brasileiros.

Os simuladores de caminhão fora de estrada são capazes de simular situações de emergência, tais como falha no freio, incêndio nos pneus, pneu furado, incêndio no motor e falhas hidráulicas (5DT, 2017). Esses simuladores, ainda fornecem outros benefícios, dentre eles, redução dos custos de operação e propriedade, treinamento a qualquer hora e independente de condições climáticas, possibilidade de praticar manobras difíceis repetidamente, além do monitoramento do desempenho do operador no treinamento por meio de testes incorporados (CATERPILLAR, 2019).

A IMMERSIVE TECHNOLOGIES (2018), apresenta em seu catálogo, resultados reais da aplicação de seus simuladores de caminhão fora de estrada, com dados provenientes das empresas que adquiriram o equipamento. São apresentados diversos estudos com benefícios de ganhos em segurança, economia de custos, aumento de produtividade, diminuição de manutenção não programada, redução de

tempo de treinamento para operadores iniciantes e utilização do simulador como ferramenta de avaliação para a contratação de operadores que já possuíam experiência.

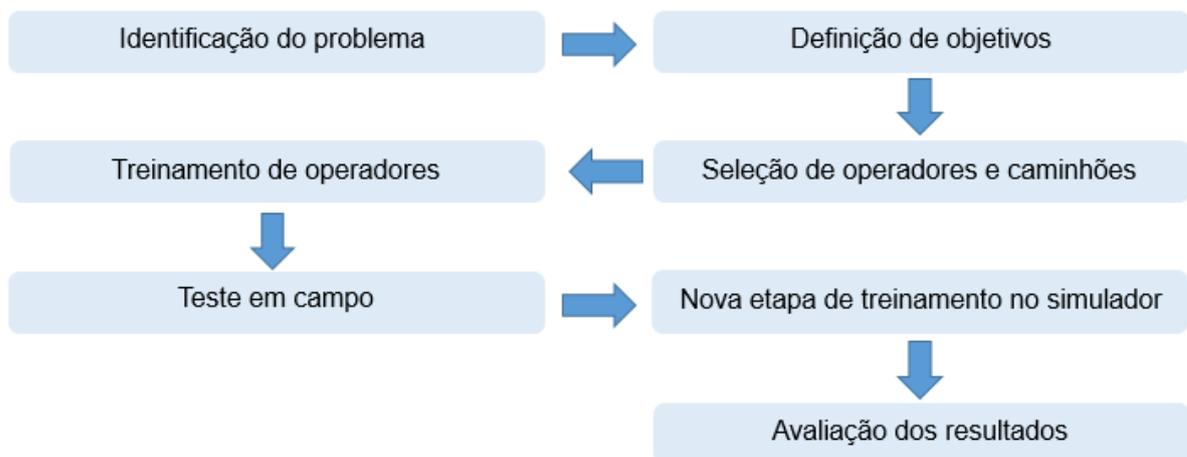
Como valores médios de melhorias gerais, destacam-se reduções de 7% no consumo de diesel, 4% nos tempos de ciclo e 40% nos tempos de treinamento para operadores iniciantes (IMMERSIVE TECHNOLOGIES, 2018).

### 3. METODOLOGIA

Em uma mina de ferro de grande porte, localizada na região do Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, foi realizado um estudo de caso, nos quais os dados foram utilizados para a elaboração deste trabalho. Para a coleta de dados utilizou-se as ferramentas disponíveis na empresa, seguindo todos os padrões de confiabilidade dos dados.

Na Figura 7 é apresentado um fluxograma que traz a metodologia utilizada no trabalho de forma simplificada. Com base na identificação do problema, foram propostos os objetivos a serem alcançados no projeto. Esse constituiu-se basicamente de uma avaliação de desempenho de operadores treinados, após um período de treinamento com o uso de um simulador de realidade virtual, comparada ao desempenho de operadores que não foram treinados. Além disso, os operadores que passaram pelas etapas de treinamento tiveram a evolução do desempenho acompanhada através de ferramentas presentes no simulador.

Figura 7 - Metodologia simplificada do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 3.1. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

O setor de transporte de mina, iniciou o ano de 2019 com duas situações que ameaçavam o cumprimento do plano de produção. O aumento da frota de transporte de mina de grande porte e a falta de operadores experientes disponíveis no mercado,

tornando um grande desafio a contratação e qualificação de operadores sem experiência.

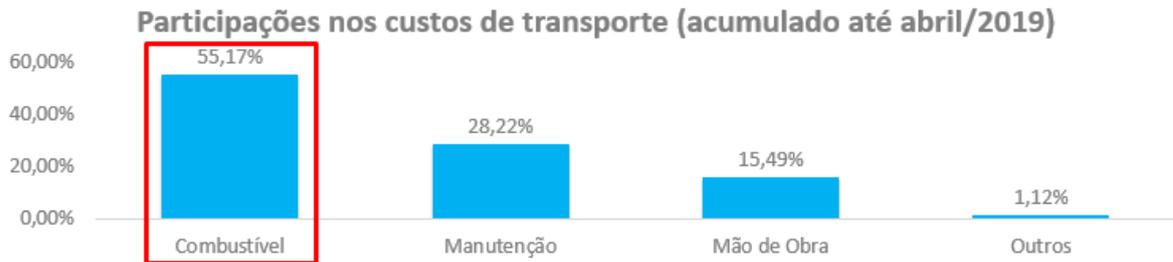
Com a metodologia de treinamento tradicional, que contempla uma parte teórica e outra prática em campo, o tempo gasto por cada instrutor para tornar apto a operar um colaborador inexperiente é grande, pois a operação de um caminhão fora de estrada exige diversos cuidados por causa das grandes dimensões e quantidade de sensores presentes no equipamento. Além disso, o treinamento tradicional, impõe certo impacto na produção, pois demanda que equipamentos disponíveis para operação sejam cedidos a equipe de treinamento, para que o treinando possa concluir a parte prática de seu treinamento.

Diante dessa situação, realizou-se uma pesquisa de mercado, através de buscas na internet e troca de experiências com outras mineradoras, sobre tecnologias para auxiliar a equipe de instrutores internos em busca da maximização dos treinamentos e redução de possíveis impactos na produção. Concluiu-se que o simulador de realidade virtual era a melhor ferramenta para alcançar os objetivos, além de possibilitar o trabalho com indicadores específicos, como por exemplo consumo de diesel e produtividade.

Uma vez que a equipe de operação de mina necessitava justificar a compra dessa ferramenta, foi proposto a realização de um estudo para demonstrar os benefícios da utilização do simulador para o treinamento de operadores de caminhões fora de estrada, podendo recomendar, assim, sua aquisição. Com isso, foi estabelecido com uma fabricante de simuladores, um contrato de aluguel do equipamento por cinco meses, iniciando em março de 2019.

Devido a considerada representatividade do custo do óleo diesel na operação de mina (Figura 8) e com base em estudos já realizados por outras mineradoras, foi estabelecido, em conjunto com a equipe da fabricante do simulador, um treinamento específico com foco na redução do consumo de combustível dos caminhões, além de questões de segurança. Neste momento não foi definido uma meta de redução. Ficou definido somente que seria analisado possíveis impactos em outros indicadores chave de produção, como produtividade, velocidade média, além de eventos de problemas operacionais registrados por sensores já instalados nos equipamentos.

Figura 8 - Representatividade do custo com combustível nos custos totais da operação de transporte



Fonte: Base de dados da empresa

### 3.2. SISTEMA DE DESPACHO ELETRÔNICO

O controle da operação de transporte, é realizado através do sistema de despacho eletrônico. De acordo com QUEVEDO (2009), esse sistema tem como objetivo otimizar a eficiência dos equipamentos de mina, através da alocação dinâmica dos caminhões nas frentes de lavra, reduzindo perdas com filas nas operações de carregamento e descarga.

Segundo FELSCH JUNIOR (2014), os dados enviados pelos equipamentos ao sistema de despacho são armazenados em um servidor exclusivo, sendo possível realizar consultas frequentes e gerar informações confiáveis. Por isso, os dados gerados por esse sistema foram utilizados tanto para a obtenção dos critérios de seleção de operadores e equipamentos, quanto para a obtenção de resultados do estudo.

#### 3.2.1. Consumo de combustível

O consumo de diesel é calculado através da quantidade de litros consumida a cada abastecimento registrada no posto de combustíveis da própria empresa e enviada automaticamente para o sistema de despacho.

A fim de poder utilizar essa informação como forma de comparação de desempenho, existem dois indicadores, que podem ser chamados de rendimento do combustível (CATERPILLAR, 2012), calculados pela divisão do consumo em litros do caminhão, um pela tonelada transportada naquele período e outro pelas horas em operação daquele caminhão no período analisado.

A informação da tonelada transportada foi obtida através de consulta ao sistema de despacho. Já a informação das horas operadas foi obtida pela verificação diária do horímetro do equipamento feita pela equipe de manutenção. A informação de horas em operação fornecida pelo sistema de despacho não foi utilizada, pois o

horímetro registra todo o período que o equipamento permaneceu ligado, e portanto, consumindo combustível, independente do código em que o equipamento estava apropriado no sistema de despacho eletrônico.

### 3.2.2. Outros indicadores relevantes

Além do objetivo principal do estudo, que é analisar uma possível economia de combustível, proporcionada pelo treinamento de operadores através de um simulador. Foi proposto uma análise do impacto desse treinamento em indicadores importantes de produção, sendo eles:

- Produtividade (toneladas movimentadas por hora de operação);
- Tempo de manobra;
- Tempo de basculamento;
- Velocidade Média.

FELSCH JUNIOR (2014) destaca que em um processo de lavra, pode-se elencar a produtividade como o indicador mais importante para mensurar o processo produtivo. Por isso, a importância de se analisar esse indicador. Além disso, os outros três indicadores acompanhados, afetam diretamente o indicador produtividade.

Isso é facilmente observado, visto que menores tempos de manobra e basculamento resultarão em menor tempo gasto para realizar a mesma movimentação, e conseqüentemente, maior produtividade. A mesma lógica se aplica para uma maior velocidade média daquele equipamento de transporte.

O sistema de despacho possibilita a inserção de “filtros” que permitem especificar o mínimo e o máximo para os tempos de manobra e basculamento. Quando o banco de dados registra um tempo de carga fora dessa margem, ele configura esse dado como inválido (FELSCH JUNIOR, 2014).

### 3.2.3. Seleção dos operadores

Para a seleção dos operadores que participariam do estudo, foram analisados indicadores considerados chave na produção. Buscou-se que os operadores selecionados possuíssem desempenho semelhantes nesses indicadores, afim de garantir que um grupo homogêneo de colaboradores participasse do teste.

Para isso, foram selecionados 30 operadores (6 por turma de trabalho), com base no desempenho nos indicadores produtividade (toneladas transportadas por hora), tempo de manobra, tempo de basculamento e velocidade média.

No sistema de despacho existente na empresa, não se tem a indicação do consumo de combustível por operador, uma vez que esse indicador é analisado somente por caminhão. Por isso, não foi possível adotar este indicador como critério para a seleção de operadores.

Os dados analisados para critério de seleção foram referentes ao período compreendido entre o dia 01 de janeiro de 2019 e 31 de março de 2019. Além disso, após a seleção prévia de cada operador, foi verificado junto ao supervisor responsável por cada um, sobre a programação das férias, sendo que o operador que tinha férias programadas para o período entre os meses de abril e julho (período de treinamento e teste), foi substituído por outro que cumprissem os mesmos critérios estabelecidos através da análise dos indicadores.

Afim de verificar a homogeneidade de performance nos operadores selecionados, realizou-se um estudo estatístico dos dados. Calculou-se então a média aritmética para os valores de cada indicador. Para quantificar a dispersão dos dados com relação a média aritmética, utilizou-se da Equação 1 para calcular o desvio padrão (GOMES, 1990). O subscrito “i” representa cada um dos 30 operadores selecionados.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}} \quad (1)$$

Em que:

S é o desvio padrão amostral;

$X_i$  é o i-ésimo valor do indicador analisado;

$\bar{X}$  é a média aritmética do indicador analisado;

N é o número total de valores do indicador analisado, ou seja, 30.

Entretanto, o desvio padrão é dependente da magnitude da variável que está sendo analisada. Por esse motivo, em alguns casos ao se analisar somente o desvio padrão, pode-se ter uma falsa ideia sobre o comportamento dos dados. Portanto, utilizou-se o chamado coeficiente de variação, obtido através da Equação 2. Através

deste índice que é expresso em porcentagem, é possível verificar a variabilidade relativa dos dados (GOMES, 1990).

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \quad (2)$$

Em que:

CV é o coeficiente de variação;

S é o desvio padrão amostral;

$\bar{X}$  é a média aritmética.

A Tabela 1 contém os resultados do estudo estatístico para cada indicador considerado na seleção de operadores.

Tabela 1 - Estudo estatístico dos dados dos operadores selecionados

<b>Indicador</b>	<b>Média Aritmética</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coeficiente de Variação</b>
<b>Produtividade</b>	633,19 t/h	19,49 t/h	3,08%
<b>Tempo de Manobra</b>	0,88 s	0,08 s	9,47%
<b>Tempo de Basculamento</b>	0,93 s	0,09 s	9,89%
<b>Velocidade Média</b>	23,68 m/s	0,69 m/s	2,91%

Fonte: Base de dados da empresa

De acordo com GOMES (1990), ao analisar valores de coeficientes de variação pode-se considerá-los baixos, quando inferiores a 10%, médios, quando de 10 a 20%, altos, quando de 20 a 30%, e muito altos, quando superiores a 30%. Portanto, ao se utilizar como critério os quatro índices analisados, pode-se concluir que os operadores selecionados possuem baixa variabilidade de performance operacional, uma vez que o coeficiente de variação dos dados é inferior a 10% para todos os casos. Essa constatação garante maior credibilidade aos resultados que foram gerados pelo estudo.

Entretanto, os valores de média aritmética apresentados na Tabela 1, não devem ser utilizados como critério de comparação com os resultados do estudo, pois são dados gerados em épocas diferentes e, portanto, condições diferentes de operação. Dentre essas condições que afetam diretamente esses valores, pode-se

destacar: frequência de chuvas, DMT, perfil de elevação do transporte, condições de praças de carga e descarga, dentre outros fatores dinâmicos em uma mina.

#### 3.2.4. Seleção dos caminhões

Para a seleção dos caminhões a participarem do teste de avaliação dos benefícios do treinamento no simulador, usou-se como critério alguns indicadores relacionados ao setor de manutenção. A razão disso, é que algum eventual problema mecânico poderia atrapalhar os resultados do teste, tornando-os não confiáveis.

Primeiramente, selecionou-se equipamentos adquiridos em um mesmo lote, e portanto, com os mesmos modelo, ano de fabricação e tempo de uso. Posteriormente, analisou-se dois indicadores importantes de manutenção, sendo eles:

- Tempo médio entre falhas (MTBF);
- Tempo médio para reparo (MTTR).

Para a seleção dos caminhões, assim como feito para os operadores, foram utilizados dados referentes ao período compreendido entre o dia 01 de janeiro de 2019 e 31 de março de 2019. Na Tabela 2, pode-se observar os valores da média aritmética da frota analisada para esses dois indicadores. Além disso, utilizando as Equações 1 e 2, respectivamente, calculou-se o desvio padrão e o coeficiente de variação dos dados referentes a toda a frota.

Tabela 2 - Dados para a seleção dos caminhões

	<b>MTBF</b>	<b>MTTR</b>
<b>Média Aritmética</b>	31,75 h	5,28 h
<b>Desvio Padrão</b>	15,88 h	5,04 h
<b>Coeficiente de Variação</b>	50,02%	95,05%
<b>CM7949</b>	34,06 h	6,61 h
<b>CM7950</b>	33,09 h	4,61 h

Fonte: Base de dados da empresa

Analisando os coeficientes de variação calculados, pode-se perceber que ambos os indicadores variam muito seus valores de equipamento para equipamento. Com isso, foi possível selecionar para a realização do teste, os equipamentos com identificações CM7949 e CM7950, pois possuíam valores próximos entre si de MTBF

e MTTR, além desses valores serem próximos também aos valores da média global da frota (Tabela 2).

### 3.3. VIMS CATERPILLAR

O VIMS é o sistema da fabricante de caminhões Caterpillar que monitora todas as funções essenciais da máquina, através da coleta de informações provenientes de sensores instalados nos equipamentos. O sistema permite que o equipamento forneça dados detalhados, minuto a minuto, sobre seu próprio estado e as condições de trabalho monitorando as principais temperaturas e pressões.

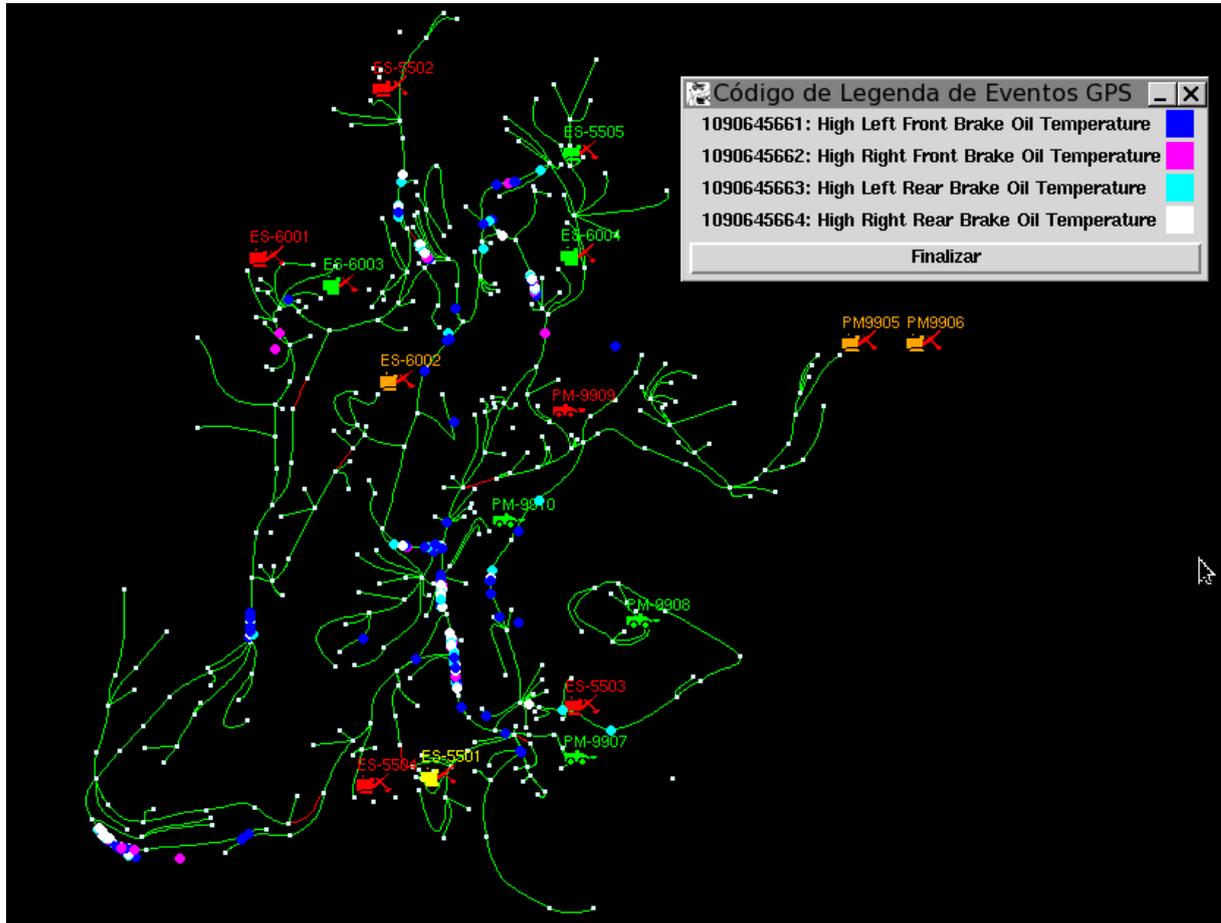
Para o pessoal de engenharia de manutenção, o VIMS fornece uma visão aprofundada sobre o desempenho do operador e do equipamento. Isto permite que os responsáveis maximizem a vida útil dos componentes, reduzam as falhas de grandes proporções, minimizem o tempo de manutenções corretivas (não programadas) e melhorem o gerenciamento dos bens. Em caminhões de grande porte para mineração, o VIMS é um item padrão na produção do 785C até o 797F (CATERPILLAR, 2012).

#### 3.3.1. Principais eventos operacionais registrados

Com a utilização do sistema VIMS, diversos tipos de eventos operacionais registrados pelos caminhões, podem ser acompanhados pelas equipes de operação e manutenção. Entretanto, por experiência dessas mesmas equipes e por orientação da própria Caterpillar, existem eventos registrados pelos sensores que possuem maior potencial de risco que outros, tanto por questões de segurança, quanto por possíveis danos aos equipamentos. Por isso, esses eventos são acompanhados de forma mais frequente e tratados com maior rigor pelas equipes.

O acompanhamento se dá através do monitoramento diário dos pontos de ocorrência (Figura 9), bem como algumas análises semanais, que servem como base para elaboração de planos de ação para minimizar ao máximo a ocorrência desses.

Figura 9 - Acompanhamento dos pontos de ocorrências de eventos de superaquecimento dos freios



Fonte: Base de dados da empresa

Além disso, alguns eventos registrados pelo sistema possuem a ocorrência relacionada a problemas mecânicos do equipamento, enquanto outros estão mais relacionados a erros operacionais, especialmente por falha do operador. Portanto, como foco de sua atuação, a equipe de engenheiros da operação de mina, acompanha de perto as ocorrências desses principais eventos relacionados a falhas operacionais, sendo eles:

- Superaquecimento dos freios: ocorre quando o sensor de temperatura do óleo dos freios identifica valor superior a 124°C;
- Abuso da transmissão de marchas: ocorre quando é realizada uma troca de marchas (avançar ou recuar) com o motor em alta velocidade de rotação;
- Sobrevelocidade de rotação do motor diesel: ocorre quando a rotação do motor diesel ultrapassa 2200 RPM;

- Superaquecimento do conversor de torque: ocorre quando o sensor de temperatura do conversor de torque identifica temperatura superior a 115°C;
- Transmissão engatada com escada abaixada: ocorre quando o sensor de posição da escada identifica que o operador engatou marcha a frente ou ré com a escada de acesso a cabine abaixada;
- Máquina em movimento com bscula erguida: ocorre quando os sensores de velocidade de saída da transmissão juntamente com o sensor de posio da bscula, identificam que a máquina está em movimento com a bscula erguida.

O superaquecimento dos freios ocorre devido  realizao de frenagens bruscas, na maioria das vezes relacionadas ao trafego em velocidade acima daquela recomendada para a via, seja por acionamento do acelerador ou por operar em declives com marchas inadequadas, proporcionando o ganho de velocidade do equipamento. Essas ocorrências causam, ao longo do tempo, a reduo da capacidade de frenagem do sistema de freios, podendo levar a uma necessidade de troca prematura dos componentes.

As mudanças abusivas de marchas reduzem consideravelmente a vida útil da transmissão, gerando efeitos severos de torço no cardam que podem originar quebras prematuras de componentes como cruzetas, caixa de transferência, dentre outros. Já os eventos de sobrevelocidade de rotao do motor diesel, ocorrem principalmente devido ao uso de marchas inadequadas em declives, fazendo o motor operar em rotaes acima do planejado, ocasionando uma diminuio na vida útil dele, podendo até mesmo culminar em uma falha catastrófica, de quebra de válvulas.

Assim como os outros eventos citados até aqui, o superaquecimento do conversor de torque também ocorre por causa de desvios operacionais. As situaes mais frequentes são as tentativas de movimento (acelerao com o caminhão em primeira marcha) com os freios acionados ou em caso de patinagem excessiva das rodas, em subidas escorregadias ou atolamentos.  importante destacar, que em caso de patinagem das rodas, a ao a ser tomada pelo operador, conforme procedimento interno da empresa,  parar imediatamente o equipamento e comunicar ao seu supervisor, para que esse possa tomar as devidas providências.

Já os eventos de transmissão engatada com escada abaixada e máquina em movimento com bscula erguida estão diretamente ligados a questões de segurança. Qualquer uma dessas duas ocorrências significa um risco iminente de colisão dessas

partes do equipamento, causando danos materiais e possíveis danos as pessoas envolvidas. A escada do equipamento, quando abaixada, tem sua base localizada muito próxima ao solo, aumentando as chances de colisão em caso de acíves ou presença de blocos na via de transporte. Já a caçamba, quando está erguida, faz com que a altura do caminhão aumente, criando um risco potencial de colisão com redes elétricas existentes na mina para levar energia às escavadeiras, que são elétricas. Além disso, a condição de báscula erguida, altera a posição do centro de massa do equipamento, aumentando consideravelmente o risco de tombamento.

Portanto, visto que todos os eventos citados acima estão diretamente ligados a situações de operação incorreta. Além do grau de relevância, em termos financeiros e de segurança, que as ocorrências têm potencial de causar. É de extrema importância avaliar os resultados que os treinamentos com o simulador de realidade virtual terão nessas ocorrências.

### 3.4. SIMULADOR

Para a realização do estudo, utilizou-se como ferramenta de capacitação um simulador de realidade virtual de caminhão fora de estrada (Figura 10). O ambiente de simulação proporciona que o operador possa vivenciar situações do dia a dia da operação, em uma cabine que conta com todos os itens existentes em uma cabine real. Até o áudio do sistema de rádio de uma mina é reproduzido na cabine, para que o operador se sinta o mais presente possível em um ambiente real.

Figura 10 - Visão geral do simulador utilizado no treinamento dos operadores



Fonte: Registrado pelo autor

No mês de instalação do equipamento na empresa (março/2019), a equipe da fabricante do simulador promoveu um treinamento aos instrutores internos da empresa para que esses pudessem utilizar da ferramenta da melhor maneira possível. A capacitação ocorreu durante 6 dias, totalizando uma carga horária de 48 horas, contando com 50% de parte teórica e 50% de parte prática no próprio simulador.

Além disso, após esse período, houveram algumas reuniões, em que participaram especialistas da fabricante, engenheiros e instrutores da operação, para quantificar pesos a cada evento de erro registrado pelo simulador. Quanto maior o peso dado, mais crítico aquele erro operacional se caracterizava.

Os erros de operação registrados pela ferramenta, são classificados em quatro classes, de acordo com o indicador que sofrerá maior impacto negativo por consequência daquele erro, sendo eficiência de combustível, manutenção, produtividade e segurança. São exemplos de erros, a falta do uso da buzina ao iniciar a operação, uso abusivo dos freios, acionamento agressivo do pedal do acelerador, desrespeito a sinalização de mina, dentre outros.

Além de mensurar os erros operacionais cometidos, o simulador é uma excelente ferramenta de segurança, no sentido que permite preparar o operador para situações de emergências, como falha na direção, incêndio no motor (Figura 11) e falhas nos freios.

Figura 11 - Simulação de incêndio no motor



Fonte: Registrado pelo autor

GANDRA (2004) e ROCHA (2012) destacam que em um processo de treinamento, a avaliação deve ser contínua, para mensurar as evoluções a as dificuldades do treinado. Ações essas essenciais para um treinamento eficaz e efetivo. Nesse sentido, o simulador facilita o bom desempenho do trabalho do instrutor. O próprio programa de simulação, indica na tela de forma instantânea, quando o operador comete um erro, descrevendo qual foi o erro cometido (Figura 12).

Figura 12 - Indicação na tela do simulador de erro de operação cometido



Fonte: Registrado pelo autor

Além disso, outra ferramenta que auxilia o trabalho do instrutor, é que toda a prática no simulador é gravada por câmeras de diversos ângulos, com uma visão de quem está fora do caminhão. Esse recurso permite, que o operador assista como foi seu desempenho enquanto estava operando, abrindo a possibilidade para o instrutor fazer comentários pontuais a respeito. Na Figura 13 é apresentado a tela disponível para o instrutor acompanhar a operação e para que o desempenho seja mostrado ao operador após a prática.

Figura 13 - Instrutor acompanhando o desempenho do operador durante o treinamento



Fonte: Registrado pelo autor

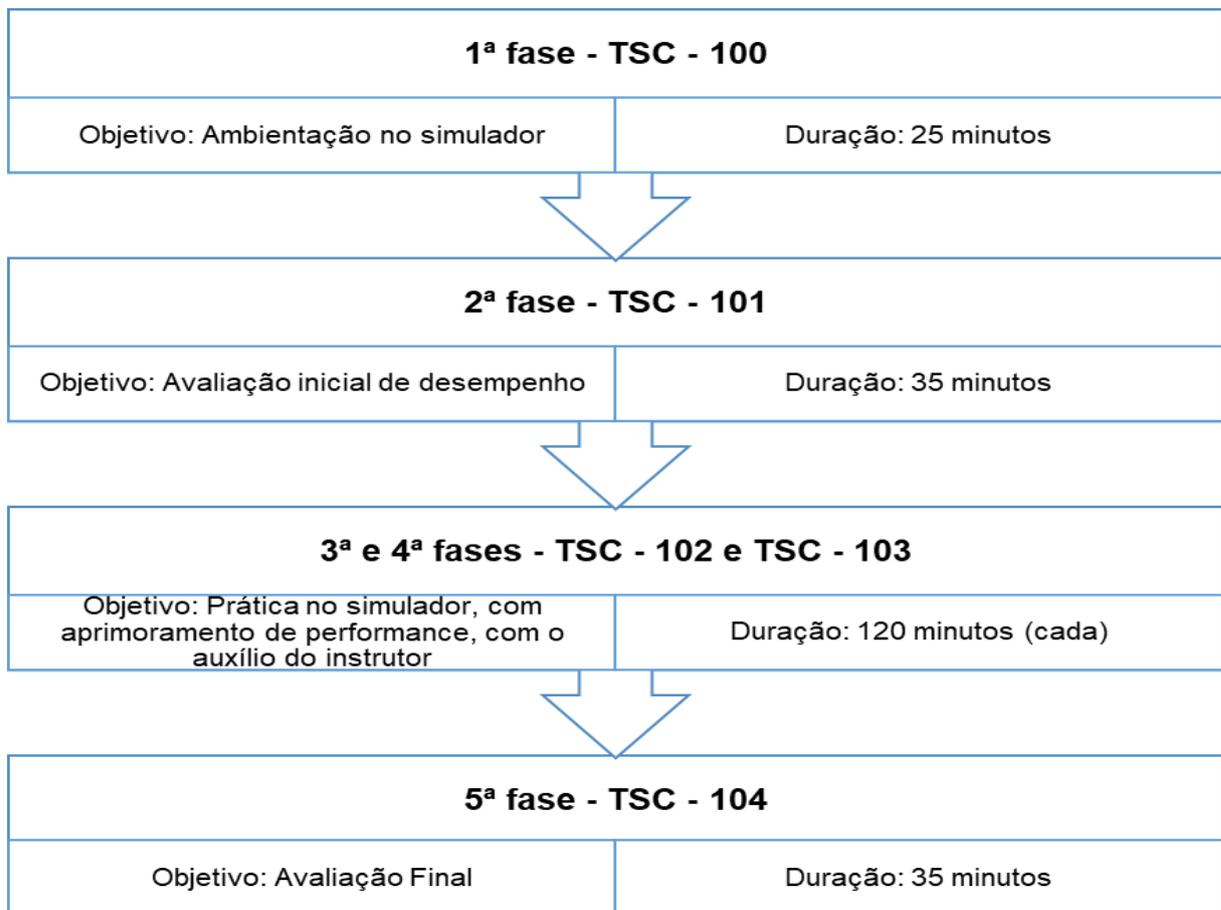
#### 3.4.1. Período de treinamento

Do grupo de operadores selecionados para participar do estudo, 15 operadores, sendo 3 de cada turma, foram selecionados aleatoriamente, através de sorteio, garantindo assim que não houvesse nenhuma tendência de manipulação de resultados. Esses operadores selecionados, foram conduzidos a um período de treinamentos, composto basicamente por duas etapas.

Todo o treinamento foi realizado no período de trabalho de cada turno, durante o mês de abril de 2019, e acompanhado por um membro da equipe de instrutores da empresa. É importante lembrar que os instrutores passaram anteriormente por um treinamento com carga horária de 48 horas, ministrado por especialistas enviados pela fabricante do simulador.

A primeira etapa foi composta de uma sequência de fases de treinamento realizadas no simulador de realidade virtual. O cronograma e conteúdo dessa etapa, foi elaborado pelos engenheiros responsáveis pela operação, em parceria com os representantes da fabricante do simulador. A Figura 14, apresenta as fases que compuseram essa primeira etapa de treinamento, bem como o objetivo e duração aproximada por operador de cada uma.

Figura 14 - Fases da etapa de treinamento no simulador



Fonte: Elaborado pelo autor

A 1ª fase teve como objetivo a ambientação e a familiarização do operador com o ambiente de simulação. Nessa fase, era dada uma explicação básica do funcionamento da ferramenta, não sendo necessário gastar um tempo maior sobre a forma de utilização, pelo fato de que a cabine do simulador era uma reprodução fiel do caminhão em que os operadores já trabalhavam. Os operadores em treinamento praticaram por cerca de 25 minutos em um cenário que simulava situações do dia a

dia da operação, como manobras, carregamentos, basculamentos, tráfego em acesso escorregadio, dentre outras.

Na 2ª e 5ª fases dessa primeira etapa, os operadores foram submetidos a uma etapa de avaliação, já programada na memória do simulador. Cada uma, tinha um circuito padronizado, com as mesmas condições operacionais, afim de não favorecer nenhum dos operadores que estavam sendo avaliados. Durante a avaliação, cada erro identificado pelo simulador contava um ponto que era acumulado naquela avaliação. Quanto menos pontos um operador acumulasse, melhor seria seu desempenho, pois isso significaria que o operador cometeu menos erros. Como meta estabelecida com base em orientação da fabricante do simulador, estabeleceu-se o número máximo de 50 pontos por avaliação.

A 2ª fase teve como principal objetivo conhecer o perfil operacional dos colaboradores em treinamento, além de medir e avaliar os principais erros operacionais por classe. Já a 5ª fase, teve como principal objetivo avaliar a eficácia do simulador, através da possibilidade de utilizar seus resultados para comparar a evolução de cada operador durante o treinamento.

O período de fato de treinamento, ocorreu na 3ª e 4ª fases, quando os operadores foram submetidos a prática no simulador. Cada etapa dessa, teve duração aproximada de 120 minutos por operador, sendo constituída de uma parte prática, com simulação da operação cotidiana e eventuais ocorrências, como incêndio no motor, falhas na direção e sistema de freios, cenário com chuva e pista escorregadia, além de interrupções feitas pelo instrutor para orientar os operadores a respeito de correções de erros e otimização da forma de operar (Figura 15).

Figura 15 - Instrutor orientando o operador durante o treinamento



Fonte: Registrado pelo autor

É importante ressaltar, que a capacitação teve como foco maior o consumo de combustível. Esse foco se deu nas orientações do instrutor, especialmente baseadas no recurso que permite colocar na tela de simulação o consumo de combustível em tempo real (Figura 16). Nesse sentido, Barbosa *et al.* (2016) destacam como uma das vantagens do uso do simulador a disponibilidade de ferramentas de análise que permitem ao instrutor avaliar o desempenho do aluno e atuar diretamente na correção da inabilidade na operação para garantir o domínio adequado do equipamento, na busca da eficiência da produtividade da operação.

Figura 16 - Estimativa do consumo de combustível na tela do simulador



Fonte: Registrado pelo autor

As situações mais comuns do uso ineficiente de combustível são caracterizadas pelo acionamento excessivo do pedal de acelerador em situações específicas, como por exemplo durante o basculamento.

Concluída a primeira etapa de treinamento, realizada no simulador, os operadores foram conduzidos a segunda etapa, que aconteceu em campo. Essa etapa teve carga horária de 2 horas por operador, constituída da operação cotidiana na produção, porém acompanhada de um instrutor. O principal objetivo dessa foi o acompanhamento da evolução dos operadores após a primeira etapa de treinamento e a correção de possíveis desvios ou falhas pontuais.

### 3.5. PERÍODO DE TESTE

Após execução de toda a metodologia de treinamento e escolha dos caminhões para realização do teste. Esse foi realizado durante os meses de maio e junho de 2019. O objetivo era de mensurar e avaliar os benefícios do programa de treinamento realizado com o auxílio do simulador de caminhão fora de estrada.

Os dois caminhões selecionados a participarem do teste tiveram suas rotas atreladas com o auxílio do sistema de despacho, ou seja, ambos os caminhões deveriam sempre seguir as mesmas rotas, sendo alocados sempre nos mesmos destinos. Isso garantiu que os caminhões percorressem praticamente as mesmas distâncias, tanto carregados como vazios, com os mesmos perfis de estrada, material transportado e condições de carregamento e basculamento.

As manutenções preventivas dos caminhões foram ajustadas para que acontecessem no mesmo período. O abastecimento de ambos, também eram realizados de forma simultânea, mesmo quando um dos caminhões não tinha atingido o mínimo de combustível para ir ao posto, conforme estabelecido no procedimento interno da empresa.

Caso algum dos caminhões necessitasse parar a operação por motivos de manutenção corretiva, refeição do operador, impedimentos operacionais, dentre outros, o outro caminhão deveria parar imediatamente também, nas mesmas condições do outro, garantido o mínimo possível de interferências de fatores externos no teste, que não a forma de condução dos operadores. Caso alguma manutenção corretiva tivesse como estimativa de duração, de acordo com a análise do técnico de manutenção, mais de uma hora, o outro caminhão era liberado para rodar, porém os dados referentes àquele período eram retirados da análise.

Além disso, é importante lembrar que apenas operadores treinados no simulador estavam autorizados a operar o caminhão CM7950 e somente os que estavam na lista dos 15 operadores que foram selecionados, mas não treinados, estavam autorizados a operar o CM7949. Como existia mais de um operador que se encaixava em cada condição por turma, esses estavam autorizados a operar livremente os outros caminhões da frota.

Apesar das condições citadas acima terem sido passadas e revisadas constantemente aos supervisores de operação e manutenção, um ponto de atenção dos engenheiros de operação e técnicos de despacho durante o período de testes, foi garantir que essas condições estavam sendo respeitadas. Para isso, o

acompanhamento especial dos dois caminhões foi realizado 24 horas por dia, através da sala de controle do despacho eletrônico.

### 3.6. NOVA ETAPA DE TREINAMENTO NO SIMULADOR

Após todas as etapas de capacitações e teste, o grupo de operadores já treinados anteriormente, foram reconduzidos, em julho de 2019, para um novo treinamento no simulador. A metodologia desse novo treinamento foi exatamente a mesma do primeiro treinamento realizado no simulador, descrita na Figura 14.

O objetivo era reavaliar esses operadores e verificar qual o impacto do tempo no desempenho desses. Ou seja, passados pouco mais de dois meses do primeiro treinamento no simulador, desejava-se observar se os operadores teriam o mesmo rendimento em uma nova avaliação. Além disso, o outro objetivo era avaliar qual seria a evolução desses operadores após um novo período de treinamento.

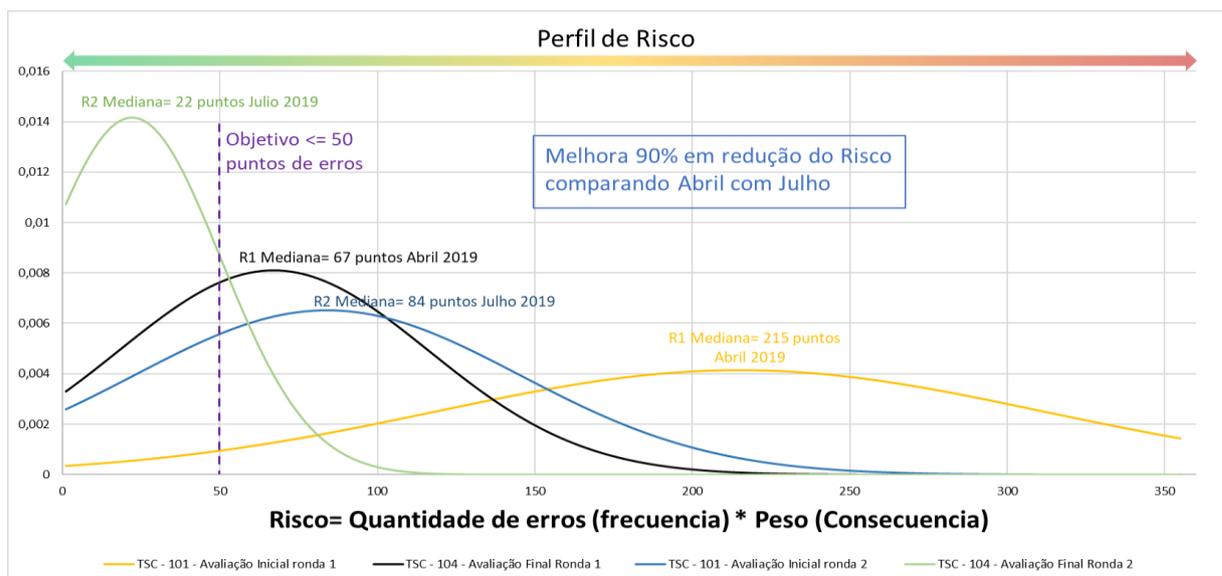
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O capítulo apresenta os resultados referentes ao estudo sobre alguns dos benefícios de um treinamento de operadores de caminhões fora de estrada com o auxílio de um simulador de realidade virtual. Primeiramente, serão apresentados os resultados dos treinamentos realizados no simulador, utilizando para isso dados gerados pela própria ferramenta, durante as fases de avaliações realizadas nas etapas de treinamento. Posteriormente, serão apresentados os dados referentes ao teste prático realizado ao se utilizar dois caminhões para comparar o desempenho de operadores treinados e não treinados.

### 4.1. RESULTADOS DOS TREINAMENTOS NO SIMULADOR

Durante os treinamentos no simulador, nas fases de avaliação inicial e final, chamadas de TSC-101 e TSC-104, respectivamente, a ferramenta gerou gráficos possibilitando analisar a evolução do desempenho dos operadores. Na Figura 17 são apresentados os resultados da acumulação de pontos no simulador. É importante lembrar que os pontos são acumulados a medida que os operadores cometem erros durante a avaliação.

Figura 17 - Distribuição de erros cometidos em cada avaliação no simulador



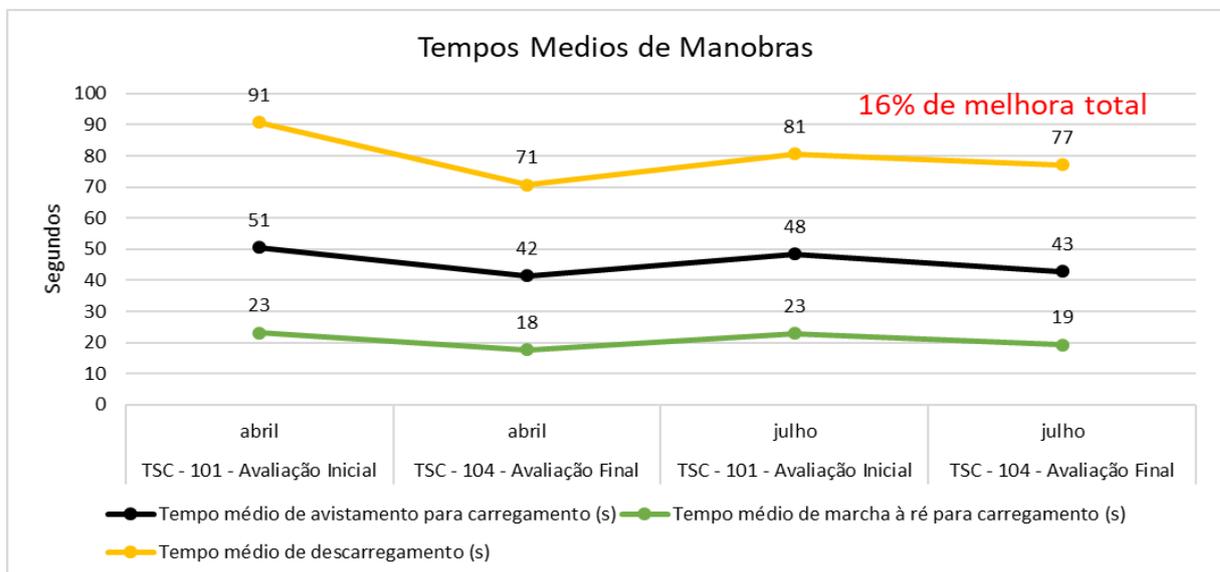
Fonte: Base de dados do simulador

Ao analisar a Figura 17, pode-se perceber uma grande evolução ao comparar a avaliação final com a inicial em cada etapa de treinamento. Entretanto, na avaliação inicial do treinamento de julho o número médio de pontos acumulados foi maior que o da avaliação final de abril. Isso comprova que algum tempo após o treinamento, o desempenho dos operadores tende a cair um pouco.

Porém, o resultado final da avaliação final de julho comprova que com mais uma etapa de treinamento, consegue-se chegar a números de erros menores ainda. Essa fase, foi a única na qual os operadores conseguiram atingir a meta estabelecida de obter no máximo 50 pontos. Comparando com os números da avaliação inicial do treinamento de maio, a redução nos erros e consequentemente nos riscos associados a atividade foi de 90%.

Além disso, acompanhou-se também, durante as avaliações realizadas com o auxílio do simulador, a evolução dos tempos de manobras dos operadores. Esses resultados são apresentados na Figura 18, onde pode-se perceber uma redução de 16% nos tempos médios de manobras após todas as etapas de treinamento.

Figura 18 - Tempos médios de manobras durante as avaliações



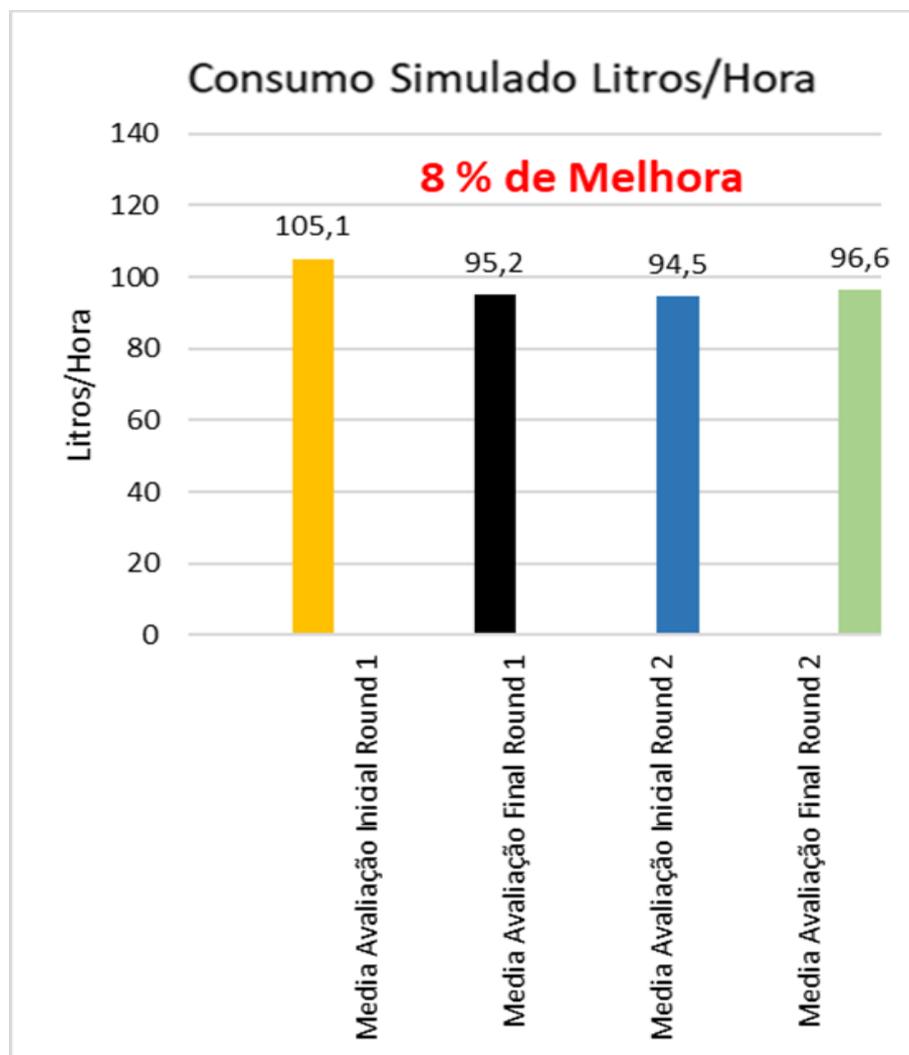
Fonte: Base de dados do simulador

Assim como na ocorrência de erros, percebe-se que na primeira avaliação de julho os operadores tiveram performance inferior à da última avaliação de abril. O que demonstra que, por mais que se espera que os operadores atinjam na prática aquilo

que mostraram de melhor no treinamento, isso não irá acontecer, pois há um relaxamento natural após um período de treinamentos intensos.

A Figura 19 apresenta o consumo de combustível estimado pelo simulador. Ao comparar a avaliação inicial de abril com a final de julho, a redução foi de 8%. Entretanto, houve um aumento no consumo entre as etapas de avaliação de julho. Isso pode ser explicado pelo foco mais geral dado a esse treinamento, diferentemente do primeiro que focou muito em redução do consumo de combustível.

Figura 19 - Consumo estimado pelo simulador durante as avaliações



Fonte: Base de dados do simulador

#### 4.2. RESULTADOS DO TESTE

Durante os testes em campo, foi acompanhado de perto o desempenho dos caminhões participantes, com relação a indicadores ligados a produção, através da

base de dados do sistema de despacho, e com relação a ocorrência de eventos relacionados a manutenção e a segurança, através do sistema VIMS Caterpillar.

#### 4.2.1. Resultados relativos a produção

A Tabela 3 apresenta os resultados do consumo de combustível relativos a comparação do desempenho dos dois caminhões participantes do teste, durante período de realização desse.

Tabela 3 - Consumo de combustível no período de teste

<b>Equipamento</b>	<b>Consumo (L/h)</b>	<b>Consumo (L/t)</b>
<b>CM7949 (Não treinados)</b>	120,93	0,22
<b>CM7950 (Treinados)</b>	117,02	0,21
<b><math>\Delta</math> (Comparação)</b>	<b>-3,2%</b>	<b>-3,2%</b>

Fonte: Base de dados da empresa

Analisando os resultados da Tabela 3, pode-se perceber que um dos objetivos principais do treinamento realizado foi atingido, pois o caminhão em que trabalharam os operadores treinados (CM7950) teve um menor gasto relativo de combustível. Entretanto, o resultado alcançado na prática foi inferior àquele estimado no simulador (Figura 19).

Apenas como estimativa de redução, aplicando a economia registrada no teste a dados de consumo de 2018, a redução de consumo seria de 644.544,24 litros de diesel. Essa redução significaria que, de acordo com estimativa de BARTHOLOMEU (2006), 1,8 toneladas de CO<sub>2</sub> deixariam de ser lançadas na atmosfera.

Portanto, além da redução de custo, o ganho ambiental seria enorme, visto que o CO<sub>2</sub> é o principal gás causador do efeito estufa. Além disso, é importante ressaltar que a empresa está em expansão, logo esses resultados seriam maiores ainda se tomados como base orçamentos para os próximos anos.

Os resultados dos outros indicadores analisados durante o período estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Indicadores importantes de produção no período de teste

Equipamento	Produtividade (t/h)	Tempo de Manobra (s)	Tempo de Basculamento (s)	Velocidade Média (m/s)
<b>CM7949 (Não treinados)</b>	622,31	0,95	0,83	24,08
<b>CM7950 (Treinados)</b>	627,88	0,74	0,89	24,37
<b>Δ (Comparação)</b>	<b>0,9%</b>	<b>-21,6%</b>	<b>6,8%</b>	<b>1,2%</b>

Fonte: Base de dados da empresa

Analisando o comportamento de indicadores importantes de produção durante o período de teste, apresentado na Tabela 4, pode-se perceber que o treinamento não refletiu somente em ganhos com redução de combustível. Pode-se notar que houve ganhos em produtividade e velocidade média, ao comparar os operadores treinados aos não treinados. Além disso, também pode-se notar uma diferença de 21,6% nos tempos de manobra dos dois grupos. Esse resultado expressivo é fruto do intensivo treinamento em manobras que o simulador proporciona.

Entretanto, ao analisar os tempos de basculamento, percebe-se que os operadores não treinados tiveram melhor desempenho, em questão do tempo gasto nessa atividade. Porém esse resultado pode ser explicado pelo foco que foi dado no trabalho à redução do consumo de combustível.

Para entender melhor isso, vale ressaltar que o simulador é programado para determinar que o operador realize o basculamento com uma rotação do motor de 1500 RPM, rotação recomendada pela Caterpillar, que proporciona uma maior eficiência do gasto de combustível nessa atividade. Entretanto, se o basculamento for realizado a uma rotação maior do motor, apesar de ser um pouco mais veloz, proporcionará um consumo ineficiente de combustível. Isso foi verificado em termos práticos, quando realizou-se no simulador três basculamentos com a rotação recomendada, e três com a rotação de 1950 RPM, e percebeu-se que houve uma diminuição de 5% no tempo de basculamento na rotação superior, as custas de um aumento aproximado de 95% no consumo de combustível estimado pelo simulador.

#### 4.2.2. Resultados relativos a manutenção e a segurança

Durante o período de teste, não houveram ocorrências de sobrevelocidade de rotação do motor diesel e de transmissão engatada com escada abaixada. Esse resultado deve ser atribuído ao fato de que mesmo os operadores do grupo que não foi treinado, serem operadores já experientes, que por treinamento anteriores, já

realizavam boas práticas de operação. Entretanto, ao analisar o número de ocorrências de outros eventos operacionais, apresentado na Tabela 5, percebe-se uma grande diferença de performance entre os dois grupos analisados.

Tabela 5 - Ocorrências de eventos operacionais durante o período de teste

<b>Equipamento</b>	<b>Superaquecimento dos Freios</b>	<b>Abuso da Transmissão de Marchas</b>	<b>Superaquecimento do Conversor de Torque</b>	<b>Máquina em Movimento com Bâscula Erguida</b>
<b>CM7949 (Não treinados)</b>	135	14	50	6
<b>CM7950 (Treinados)</b>	103	2	28	0
<b>Δ (Comparação)</b>	<b>-23,7%</b>	<b>-85,7%</b>	<b>-44,0%</b>	-

Fonte: Base de dados da empresa

Analisando as ocorrências de superaquecimento de freios, percebe-se uma menor quantidade de registros associada ao equipamento em que os operadores treinados trabalharam. Além de contribuir para o aumento da vida útil dos componentes desse sistema, que possui um custo total de aproximadamente 280 mil reais, esse resultado está diretamente ligado a questões de segurança, pois as ocorrências contribuem para uma perda de eficiência nos freios, que são dispositivos de segurança dos caminhões.

O mesmo acontece com as ocorrências de abuso da transmissão de marchas e superaquecimento do conversor de torque, proporcionando menores danos e, consequentemente maior vida útil a esses componentes.

Como já mencionado na metodologia deste trabalho, todos esses eventos estão diretamente relacionados a desvios operacionais por parte dos operadores. Portanto, fica evidente os benefícios gerados com a capacitação através do simulador na diminuição desses.

Já com relação especificamente a questões de segurança, as ocorrências de máquina em movimento com balsa erguida mostram claramente a importância do treinamento realizado para despertar nos operadores maior atenção para que não ocorresse esse tipo de situação, que tem um potencial de risco altíssimo associado.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados pelo estudo de caso realizado, conclui-se que o simulador de realidade virtual é uma ferramenta efetiva para a capacitação de operadores de caminhões fora de estrada na mineração.

Dentre os benefícios da utilização da ferramenta, destaca-se a evolução dos operadores treinados na redução em 90% de erros de operação, identificados pelo próprio simulador, que estão diretamente relacionados a riscos de segurança da operação e atitudes improdutivas.

O teste em campo, realizado durante dois meses, proporcionou identificar uma economia de 3,2% no consumo de combustível na comparação dos operadores treinados com os não treinados. Essa economia representaria no ano de 2018, 644.544,24 litros de diesel economizados e 1,8 toneladas de CO<sub>2</sub> a menos na atmosfera.

Além disso, houveram ganhos em indicadores importantes de produção, como produtividade, tempo de manobra e velocidade média. Registrou-se também, reduções acima de 23% nas ocorrências de diversos eventos operacionais registrados por sensores presentes nos caminhões, relacionados a situações de risco e diminuição da vida útil de componentes mecânicos.

## REFERÊNCIAS

ALARIE, Stéphane; GAMACHE, Michel. **Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines**. Londres: Taylor & Francis, 2010.

BARBOSA, R. S.; KASSAB JUNIOR, F.; NISHIMOTO, K.; PADOVESE, L. R.; MARQUES, R. P.; TANIGUCHI, D. **Sistemas de Realidade Virtual para Simulação de Equipamentos de Movimentação e Treinamento de Operadores**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016.

BARTHOLOMEU, D. B. **Quantificação dos impactos econômicos e ambientais decorrentes do estado de conservação das rodovias brasileiras**. 165 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2006.

BORGES-ANDRADE, J. E. Desenvolvimento de medidas em avaliação de treinamento. **Estudos de Psicologia**, Brasília, v. 7, p. 31-43, 2002.

BORGES, T.C. **Análise dos Custos Operacionais de Produção no Dimensionamento de Frotas de Carregamento e Transporte em Mineração**. 116 f. Dissertação (Mestrado em Lavra de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

BRAGA, M. Realidade Virtual e Educação. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Paraíba, v. 1, n. 1, 2001.

BRASIL. **Norma Reguladora 22 (NR22): Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**. Brasília: Secretaria Especial de Previdência e Trabalho do Ministério da Economia, 2019.

CALAES, G. D. **Planejamento estratégico, competitividade e sustentabilidade na indústria mineral: Dois casos de não metálicos no Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: CETEM / MCT / CNPq / CYTED, 2006. 242 p.

CALAES, G. D. **Evolução do Mercado Mineral Mundial a Longo Prazo**. Ministério de Minas e Energia, 2009.

CAMPOS JUNIOR, C. R.; ZENHA, T.M.; RECLA, T. A. R.; SILVA, W. L. V. Desenvolvimento de uma metodologia para redução do consumo específico de diesel em caminhões fora de estrada em uma empresa do setor de mineração. **Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, Resende-RJ, 2013.

CANNEL, A. E. R.; GOLD, P. A. **Reduzindo acidentes: o papel da fiscalização de trânsito e do treinamento de motoristas**. Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desenvolvimento, 2001.

CATERPILLAR. **Manual de Desempenho da Caterpillar**. Edição 42. Peoria, Illinois (EUA): Caterpillar, 2012. 1598 p.

CATERPILLAR, disponível em:

<[https://www.cat.com/pt\\_BR/support/operations/operator-training1/simulators.html](https://www.cat.com/pt_BR/support/operations/operator-training1/simulators.html)>.

Acesso em 30 de setembro de 2019.

COUTINHO, H. L. **Melhoria Contínua Aplicada para Carregamento e Transporte na Operação de Mina a Céu Aberto**. 94 f. Dissertação (Mestrado em Lavra de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CURI, A. **Minas a céu aberto: planejamento de lavra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 232 p.

CURI, A. **Lavra de Minas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 462 p.

FELSCH JUNIOR, W.S. **Análise do Desempenho dos Operadores de Equipamentos de Mina e Simulação de Cenários Futuros de Lavra – Estudo de Caso (Mina Casa de Pedra – Congonhas / Mg)**. 120 f. Dissertação (Mestrado em Lavra de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

Fifth Dimension Technologies (5DT). **Soluções em Treinamento para Mineração, Construção e Transporte**. 2017. Revisão 3.3.

Força Aérea Brasileira (FAB). **Os primórdios dos simuladores de voo**. Disponível em: <<http://www2.fab.mil.br/musal/index.php/projeto-av-hist/62-projeto-av-hist/470-os-primordios-dos-simuladores-de-voo>>. Acesso em 20 de setembro de 2019.

FRASSON, I. **Critérios de Eficiência, Eficácia e Efetividade Adotados pelos Avaliadores de Instituições Não-Governamentais Financiadoras de Projetos Sociais**. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

GANDRA, J. J. **A influência dos fatores organizacionais nos acidentes de trabalho: Estudo de caso de uma mineradora**. 336 f. Dissertação (Mestrado em Organização e Recursos Humanos) – Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

GOMES, F. P. **Curso de Estatística Experimental**. 13ª edição. Piracicaba: Editora Distribuidora, 1990. 468 p.

HARTMAN, H. L. **SME Mining Engineering Handbook**. 2ª edição. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2012.

IMMERSIVE TECHNOLOGIES. **Catálogo de Resultados Reais**. 2018. 72p.

IMMERSIVE TECHNOLOGIES. Disponível em:

<<https://www.immersivetechologies.com/products/Simulators.htm#why-simulation>>. Acesso em 01 de outubro de 2019.

Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). **A Força da Mineração Brasileira**, 2012. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002221.pdf>>. Acesso em 02 de outubro de 2019.

LATTA, J.N.; OBERG, D.J. A conceptual virtual reality model. **IEEE Computer Graphics & Applications**, p. 23-29, 1994.

LOPES, E. S.; OLIVEIRA, D.; SILVA, P. C.; CHIQUETTO, A. L. Avaliação do Desempenho de Operadores no Treinamento com Simulador de Realidade Virtual *Forwarder*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 177-186, 2010.

LOPES, J. R. **Viabilização técnica e econômica da lavra contínua de minério de ferro com uso de sistema de britagem móvel “in pit” auto propelido**. 90 f. Dissertação (Mestrado em Lavra de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

MENDES, L.G.; MENDES, E. A. G.; BOMFIN, D. Simuladores de Condução de Trens: processo de aprendizagem de maquinistas ferroviários. **Congresso Nacional de Ambientes Hiperídia para Aprendizagem**, João Pessoa, 2013.

NETTO, A. V.; TAHARA, C.S.; PORTO, A.J.V.; GONÇALVES FILHO, E. V. Realidade Virtual e suas Aplicações na Área de Manufatura, Treinamento, Simulação e Desenvolvimento de Produto. **Gestão e Produção**, v.5, n.2, p. 104-116, 1998.

OLIVEIRA, C. M.; MATOS, C. E.; LEANDRO, J. M.; MORAIS, L. F.; SOTERO, M. J.; OLIVEIRA, R. R. A. **Estudo de Caso: Treinamento com realidade virtual para motoristas no segmento de transporte rodoviário de passageiros em Minas Gerais realizado na Viação BHZMG**. 71 f. Monografia (Especialista em Gestão Empresarial) - Fundação Dom Cabral, Belo Horizonte, 2018.

OLIVEIRA, M. M. **Análise dos Indicadores de Performance com o Custo de Minério de Ferro em uma Mina por Meio de Regressão Múltipla**. 55 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, 2016.

PAGNUSSAT, M. B.; LOPES, E. S.; SILVA, P. C.; DINIZ, C. C. C.; WATZLAWICK, L. F. Desempenho de Operadores de Diferentes Idades no Treinamento com Simulador Virtual *Forwarder*. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.10, n.18, 2014.

PARISE, D.; MALINOVSKI, J. R. Análise e reflexões sobre o desenvolvimento tecnológico da colheita florestal no Brasil. **Seminário de Atualização sobre Sistemas de Colheita de Madeira e Transporte Florestal**, Curitiba, 2002.

PEREIRA, M. K. **Análise Comparativa entre Caminhões Fora de Estrada na Mineração - Através de Indicadores de Desempenho**. 80 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2019.

QUEVEDO, J. M. G. **Modelo de simulação para o sistema de carregamento e transporte em mina a céu aberto**. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Revista M&T. Edição 563. São Paulo: Editora SobraTema, 2004.

RIBEIRO, B. G. C. **Estudo De Viabilidade Econômica para a Implantação de Correias Transportadoras de Rom de Minério de Ferro. Estudo de Caso da Mina Fábrica em Congonhas, Estado de Minas Gerais**. 81 f. Dissertação (Mestrado em Lavra de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

RIBEIRO, L. S.; MACHADO, H. C. Treinamento Comportamental para Pilotos: Proposta Metodológica com Utilização do Simulador de Voo. **Revista Conexão Sipaer**, v. 7, n. 1, p. 55-62, 2016.

RIBEIRO, M. W. S.; ZORZAL, E. R. Realidade Virtual e Aumentada: Aplicações e Tendências. **XIII Simpósio de Realidade Virtual e Aumentada**, Uberlândia: Editora SBC, 2011.

ROCHA, R. V. **Avaliação de Desempenho Humano Individual e em Equipe em Simulações Interativas Distribuídas de Treinamento**. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

RODOVALHO, E. C.; LIMA, H. M.; TOMI, G. New approach for reduction of diesel consumption by comparing different mining haulage configurations. **Journal of Environmental Management**, p. 177-185, 2016.

ROSA, A. L. E.; MARTINS, D.; CAMPAGNOLI, E.; CASTRO, E.; GHELERE, E.; GONÇALVES, F. B.; OLIVEIRA, P. **Desenvolvimento de Técnicas de Gerenciamento e Treinamento de Motoristas para a Redução do Consumo de Combustível na Transportadora Ghelere**. 103 f. Monografia (Especialista em Gestão de Negócios) - Fundação Dom Cabral, Curitiba, 2017.

SANO, H.; MONTENEGRO FILHO, M. J. F. As Técnicas de Avaliação da Eficiência, Eficácia e Efetividade na Gestão Pública e sua Relevância para o Desenvolvimento Social e das Ações Públicas. **Desenvolvimento em Questão**, Editora Unijuí, n. 22, p. 35-61, 2013.

SERGIO, A. P.; NUNES, A. F. K.; GULIN NETO, A.; RIGOLINO, C. L.; ANDRIGHETO, R.; GOLIN, R. W.; ABREU, R. A. M. **Diesel – O Grande Vilão: Uma Análise Técnico-Operacional do Consumo de Diesel dos Veículos de Sistemas Rodoviários e Ferroviários**. 98 f. Monografia (Especialista em Gestão de Negócios) - Fundação Dom Cabral, Curitiba, 2018.

TRUEMAN, E. In pit crushing: the application and benefits of track mounted crushing equipment. **National Seminar on New Trends in Cost Effective Iron Ore Mining**, Noamundi, Bhar, Índia, 2001.