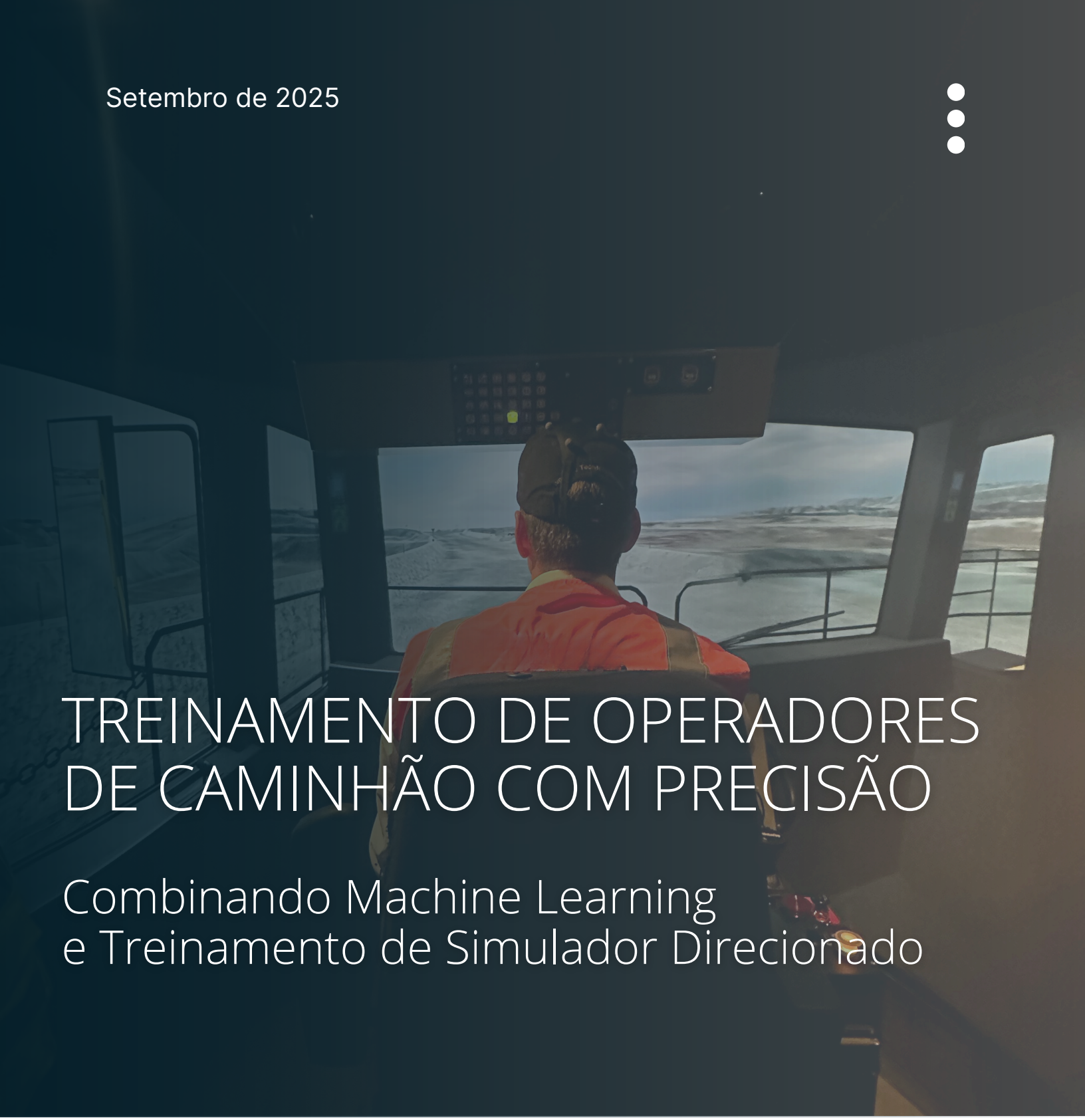
Setembro de 2025



TREINAMENTO DE OPERADORES DE CAMINHÃO COM PRECISÃO

Combinando Machine Learning e Treinamento de Simulador Direcionado

Um estudo de parceria:

IMMERSIVE TECHNOLOGIES

CASCADIA SCIENTIFIC

INTRODUÇÃO

Na mineração, mesmo pequenas decisões tomadas por um operador podem fazer uma grande diferença na eficiência de um site. Não por meio de erros drásticos ou incidentes que chamem a atenção, mas por meio de decisões sutis e cotidianas que se acumulam ao longo de milhares de ciclos de transporte. Os dados da Cascadia Scientific revelam uma constatação fascinante: a diferença entre os operadores mais qualificados e os menos qualificados pode ultrapassar 10% em eficiência de combustível. E quando você observa locais de mineração ao redor do mundo, o mesmo padrão se repete – silencioso, consistente e impossível de ignorar.

Essa diferença representa o limite entre uma mina atingir suas metas de custo ou perder silenciosamente milhões de dólares por ano. E, no entanto, nas condições voláteis e imprevisíveis da mineração a céu aberto em larga escala, onde as distâncias de transporte mudam, o clima transforma vias em rios e cada turno é distinto, identificar com precisão o desempenho do operador é notoriamente difícil.

Para reduzir essa lacuna, uma grande mineradora de carvão colombiana trabalhou com a Cascadia Scientific para implementar scorecards de operadores baseados em machine learning (ML), aliados a treinamentos direcionados em simuladores da Immersive Technologies. O objetivo era claro: medir o desempenho com precisão, identificar onde melhorias eram necessárias e orientar os operadores de forma assertiva.

O que se segue é a história de como esse programa foi estruturado: sua metodologia, resultados e por que ele oferece um modelo poderoso para operações de mineração ao redor do mundo.

Conteúdo

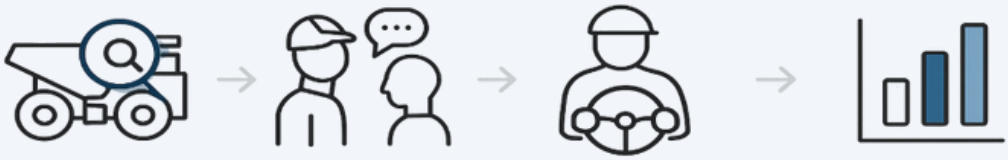
INTRODUÇÃO	2
PROGRAMA DE EFICIÊNCIA DE COMBUSTÍVEL	3
ENTENDENDO O MODELO	4
TREINAMENTO DIRECIONADO AO OPERADOR	5
OS RESULTADOS	6
CONCLUSÕES	7
AGRADECIMENTOS	8

PROGRAMA DE EFICIÊNCIA DE COMBUSTÍVEL

Modelagem de Operadores (Cascadia Scientific) + Treinamento em Simulador (Immersive Technologies)

Em uma mina a céu aberto líder no mercado, a Cascadia Scientific firmou parceria com a Immersive Technologies para lançar um programa de eficiência de combustível de ponta para operadores de caminhões fora de estrada. Ao combinar a análise avançada de dados e os insights de machine learning da Cascadia com o treinamento em simulador da Immersive, líder do setor, o programa oferece orientação direcionada e prática, resultando em melhorias mensuráveis no desempenho do operador e no consumo de combustível. Essa abordagem integrada capacita os operadores a otimizar as técnicas de direção em um ambiente seguro e controlado, garantindo, ao mesmo tempo, a melhoria contínua em campo.

Programa de Eficiência de Combustível do Operador:



Modelar → Orientar → Treinar → Medir

1. IDENTIFICAR OPERADORES COM BAIXO DESEMPENHO (CASCADIA SCIENTIFIC)

Modelos de machine learning foram criados para avaliar o desempenho de cada operador. Operadores cujo desempenho estivessem 1 desvio-padrão abaixo da média eram sinalizados para um treinamento progressivo.

2. PLANO DE ORIENTAÇÃO PROGRESSIVA

Os operadores sinalizados (~16% da lista) recebiam inicialmente uma carta; se o desempenho não melhorasse, eles se reuniam individualmente com seu gestor, se ainda estivessem abaixo da meta, eram enviados ao simulador da Immersive Technologies para treinamento.

3. TREINAMENTO EM SIMULADOR DA IMMERSIVE TECHNOLOGIES

Treinamento direcionado sobre eficiência de combustível, oferecido por meio de programas de simuladores da Immersive Technologies, foi implementado para corrigir comportamentos específicos dos operadores.

4. MEDIR O IMPACTO DA EFICIÊNCIA DE COMBUSTÍVEL NO CAMPO

Os dados de desempenho pós-treinamento foram comparados aos resultados anteriores para quantificar os ganhos no mundo real.

ENTENDENDO O MODELO

Coleta de dados - incluindo medidores de vazão de combustível de alta precisão

Dizem que um modelo é tão bom quanto os dados em que se baseia. A Cascadia Scientific não deixou isso ao acaso. Seu pacote de instrumentação – equipado com sistemas de medição de combustível com precisão superior a 99% – capturou a história por trás de cada gota de combustível queimada. Mas o combustível por si só não era suficiente. Ao combinar isso com a telemetria detalhada do veículo – acompanhando atribuição de operadores, carga transportada, tempos de ciclo e distâncias percorridas – foi possível criar um conjunto de informações robusto e confiável. Não eram apenas dados brutos; eram a base para um modelo capaz de compreender as nuances do uso de combustível por operadores de caminhões fora de estrada.

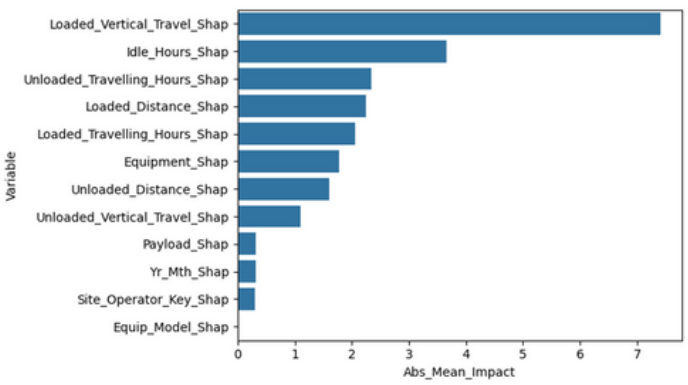
Modelagem de Eficiência do Operador

Imagine tentar prever o consumo de combustível de um caminhão fora de estrada, onde cada ciclo é diferente – cargas variam, perfis de transporte mudam, condições climáticas interferem e muito mais. A média tradicional simplesmente não é suficiente. Então, a Cascadia Scientific cria um modelo de machine learning usando *gradient boosted trees* – uma técnica que combina diversas decisões simples em uma previsão poderosa.

Mas prever, por si só, não basta. Precisamos entender o porquê. É aí que entram os valores de SHAP. Inspirados na teoria dos jogos, os valores de SHAP revelam o quanto cada fator – como carga transportada, distância, tempo em marcha lenta ou clima – contribui para o consumo de combustível em cada ciclo. Ao considerar todas essas variáveis, é possível isolar o impacto exclusivo do operador no consumo de combustível.

Isso significa que, independentemente do caminhão ou turno, a Cascadia Scientific pode medir e comparar de forma justa como o estilo de condução de cada motorista afeta a eficiência de combustível.

Impacto das variáveis do ciclo de transporte no consumo de combustível



TREINAMENTO DIRECIONADO AO OPERADOR

Construindo hábitos de economia de combustível com o treinamento da Immersive Technologies

Mesmo hábitos aparentemente insignificantes dos operadores, especialmente os menos eficientes, podem silenciosamente aumentar o consumo de combustível e custos operacionais. Os modelos da Cascadia identificam os operadores que precisam de suporte, começando por orientação direta e, em seguida, direcionando-os ao programa de simulador da Immersive Technologies. Ali, em um ambiente seguro e realista, os hábitos foram reformulados com feedback em tempo real, transformando a prática em ganhos mensuráveis em campo.

Metodologia de Treinamento de Operadores:

SIMULADORES DE EQUIPAMENTOS AVANÇADOS

Os simuladores da Immersive Technologies recriam ambientes de mina realistas para operação de equipamentos. Isso permite que os operadores pratiquem e dominem técnicas de operação mais eficientes em consumo de combustível sem risco de danificar os equipamentos ou causar atrasos na produção.

DESENVOLVIMENTO DE HABILIDADES E MUDANÇA COMPORTAMENTAL

O treinamento foca em comportamentos específicos que levam ao desperdício de combustível, como uso excessivo de RPM do motor, utilização correta dos freios, controle de velocidade e seleção adequada de marchas. Ao praticar essas habilidades em simuladores, com feedback e alertas em tempo real, os operadores aprendem a operar com mais eficiência na mina.

REDUÇÃO DE CUSTO E RISCO

O treinamento em simuladores elimina a necessidade de horas improdutivas em máquinas e reduz o risco de danos ao equipamento, resultando em menos atrasos e menores custos operacionais.

INSIGHTS BASEADOS EM DADOS

A plataforma do simulador armazena dados de avaliação e todas as pontuações podem ser reportadas com segurança à gerência e aos instrutores, permitindo que eles monitorem o progresso da equipe e identifiquem áreas para melhorias adicionais de desempenho.

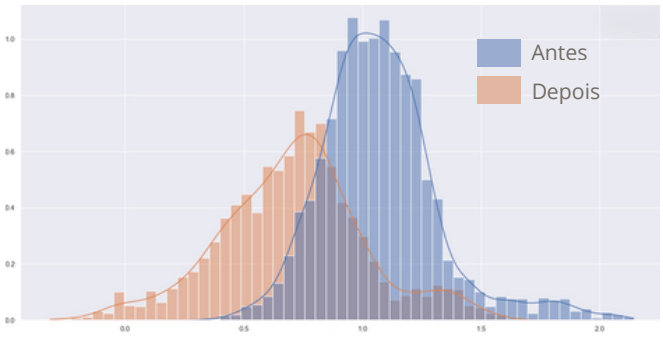
OS RESULTADOS

Do pior ao melhor: como todos os funcionários de baixo desempenho melhoraram

Nesta operação, a história começa com os operadores que mais enfrentaram dificuldades. Vinte e um motoristas, já sinalizados com cartas de advertência e treinamento individual, passaram pelo treinamento em simulador da Immersive Technologies. Todos eles apresentaram melhora. Em média, reduziram o consumo de combustível em 11,45% em relação ao padrão de condução anterior. É uma resultado notável.

Considerando todos os ciclos de transporte, os caminhões modelados consumiram em média 39,43 galões por hora. A diferença entre os melhores e os piores operadores foi de 3,37 galões – 8,5% do consumo total. O treinamento em simulador não eliminou essa diferença, mas começou a reduzi-la, estreitando a diferença. Os operadores treinados consumiram 0,386 galões por hora a menos, reduzindo o impacto sobre o operador de 8,5% para 7,5% – um aumento de 1% na eficiência geral da frota. Números pequenos, sim – mas na mineração, mesmo pequenos ganhos de eficiência se acumulam rapidamente.

Distribuição do desempenho do operador antes e depois do treinamento



Programa de Eficiência de Combustível do Operador

802 OPERADORES MODELADOS NO TOTAL

IDENTIFICAÇÃO DE OPERADORES COM BAIXO DESEMPENHO

128 operadores (16%) apresentaram desempenho de mais um desvio padrão abaixo da média, dando início ao programa de treinamento progressivo.

PLANO PROGRESSIVO DE ORIENTAÇÃO

128 operadores receberam uma carta; alguns tiveram reuniões individuais com os gestores. Aqueles que não apresentaram melhora foram encaminhados para treinamento em simulador da Immersive Technologies. 21 operadores (aproximadamente 2,6% da equipe) concluíram o treinamento em simulador.

MEDIÇÃO DO IMPACTO NA EFICIÊNCIA DE COMBUSTÍVEL EM CAMPO

Após o treinamento, os operadores reduziram o uso de combustível em 0,386 galões por hora, uma melhoria de 11,85% em relação à sua própria linha de base e um ganho de quase 1% no consumo geral da frota.

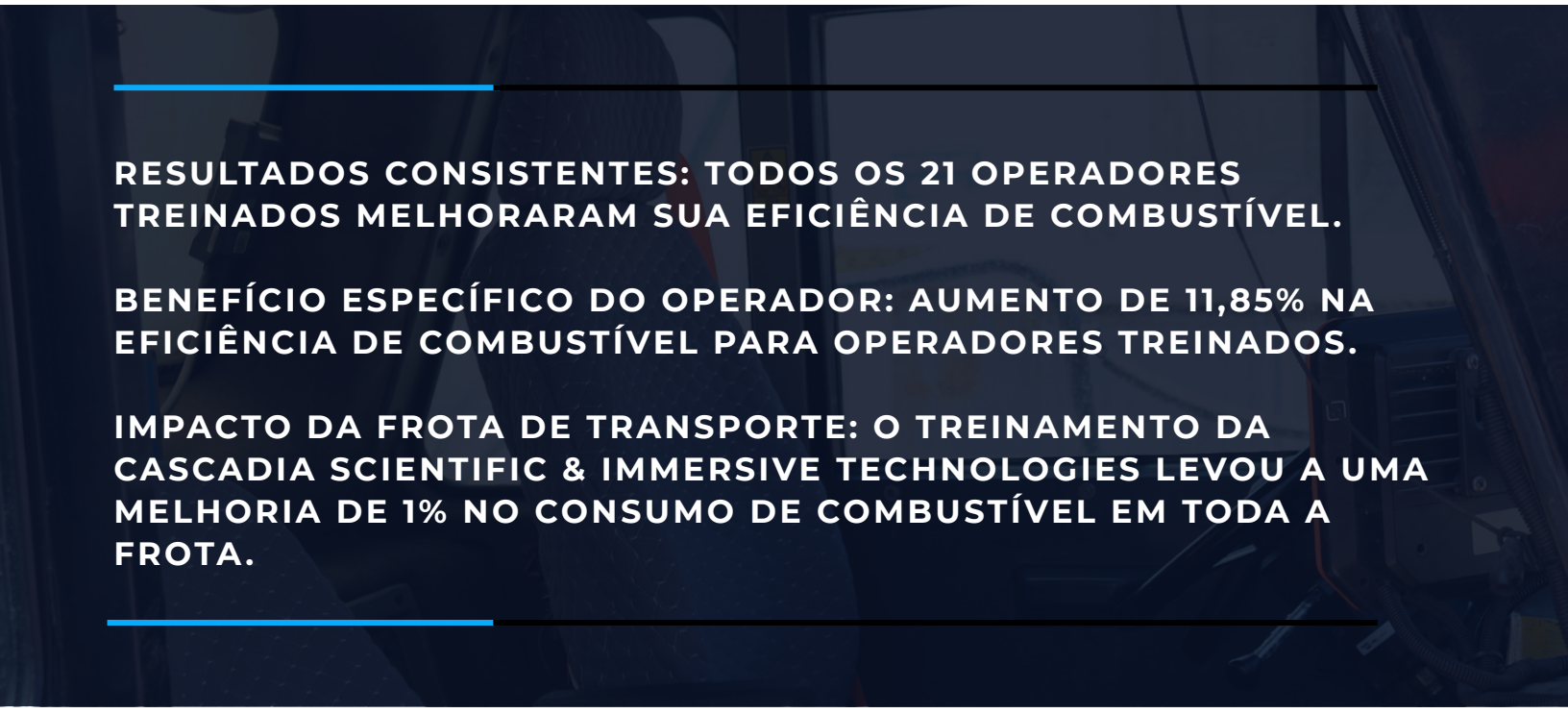
CONCLUSÕES

Na mineração, a pessoa ao volante molda silenciosamente a economia de uma operação. Este estudo mostrou que combinar os insights dos operadores baseados em dados da Cascadia Scientific com o treinamento em simulador da Immersive Technologies pode gerar economias reais e mensuráveis de combustível.

É importante reconhecer o escopo do estudo. Apenas 2,6% da equipe operacional, os de menor desempenho, participaram deste programa. Ampliar essa abordagem para mais operadores poderia gerar economias muito maiores. Além disso, a combinação de caminhões mecânicos e elétricos adiciona complexidade; caminhões com acionamento mecânico podem revelar efeitos ainda mais significativos sobre os operadores.

A parceria entre a Cascadia Scientific e a Immersive Technologies oferece às minas uma solução completa: identificar com precisão os que apresentam baixo desempenho, oferecer treinamento direcionado e medir os resultados em campo. Isso é mais do que um programa piloto: é um modelo de como as operações de mineração podem transformar hábitos sutis dos operadores em economias significativas de custos e ganhos em sustentabilidade.

A questão agora não é se o treinamento do operador funciona, mas como incorporá-lo, combinando insights contínuos com atualizações direcionadas, de modo que o desempenho se torne uma vantagem sustentada, e não um ganho momentâneo.



RESULTADOS CONSISTENTES: TODOS OS 21 OPERADORES TREINADOS MELHORARAM SUA EFICIÊNCIA DE COMBUSTÍVEL.

BENEFÍCIO ESPECÍFICO DO OPERADOR: AUMENTO DE 11,85% NA EFICIÊNCIA DE COMBUSTÍVEL PARA OPERADORES TREINADOS.

IMPACTO DA FROTA DE TRANSPORTE: O TREINAMENTO DA CASCADIA SCIENTIFIC & IMMERSIVE TECHNOLOGIES LEVOU A UMA MELHORIA DE 1% NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM TODA A FROTA.

Agradecimentos:

Estendemos nossos sinceros agradecimentos aos operadores e à equipe de gestão da operação em questão pela cooperação e comprometimento ao longo deste programa. Sua abertura à inovação e à melhoria contínua tornaram este estudo possível. Agradecimentos especiais às equipes técnicas da Cascadia Scientific e da Immersive Technologies pela expertise e colaboração no desenvolvimento e entrega da solução de treinamento integrado.

Também reconhecemos as equipes de ciência de dados e análise, cujo trabalho rigoroso garantiu a precisão e a confiabilidade das medições de desempenho. Por fim, agradecemos o apoio da liderança da mina em defender esta iniciativa e fomentar uma cultura que valoriza tanto a segurança quanto a eficiência.

CASCADIA SCIENTIFIC

IMMERSIVE TECHNOLOGIES