

CATEGORIA 3

APLICAÇÃO DO ADVANCED ANALYTICS NA GESTÃO DA EFICIÊNCIA

ENERGÉTICA EM FERROVIAS HEAVY HAUL

Luiz Carlos Junior, Rodrigo Pirola, Marcos Cotta, Angelo Guimarães, Guilherme Lana, Vivian Parreira e Bruno Muniz

RESUMO

Com as crescentes pressões financeiras e ambientais sobre as ferrovias, reduzir os custos com consumo de combustível e, conseqüentemente, as emissões de gases de efeito estufa, é um desafio constante para as empresas deste setor, mesmo sendo este um dos segmentos de transporte mais eficientes energeticamente. Inevitavelmente, além de todas as ações de processo e capacitação que são amplamente conduzidas, implementar tecnologias que suportem mais esta redução é totalmente necessário. Atualmente, as empresas deste setor estão em condições de explorar as oportunidades criadas pelas novas tendências advindas com a chamada Indústria 4.0, possibilitando a integração de diferentes sensores às mais distintas tecnologias, de comunicação à apresentação, gerando informações em tempo real, suportando o processo de tomada de decisão operacional. As informações obtidas através da medição do nível do tanque das locomotivas, as diferentes análises avançadas e tipos de decisão suportados por esta tecnologia serão apresentadas neste Artigo. O resultado alcançado com esta análises possibilitou alterar padrões de condução, locais de paradas de trens, reduzindo o

consumo durante a viagem, reduzindo variabilidade do processo, trazendo benefícios financeiros e ambientais mediante a redução do consumo de combustível e a emissão de gases de efeito estufa.

Palavras-Chaves: Operação; eficiência energética; medidores de nível de combustível e análise avançada.

INTRODUÇÃO

O indicador de Eficiência Energética (EE) das ferrovias da VALE são mensurados com base na gestão do consumo específico, o qual é representado pela equação presente na Figura 1.

$$EE = \left[\frac{\text{LitroConsumido}}{10^3 \times \text{Ton Bruta} \times \text{km}} \right] = \left[\frac{\text{Litros}}{\text{kTKB}} \right]$$

Figura 1 – Fórmula do Indicador de Eficiência Energética

O índice de Eficiência Energética (EE), segundo JORDÃO et al. (2006), expressa o consumo de combustível de uma locomotiva em relação à quantidade de carga tracionada por uma determinada distância.

BOCHARNIKOV et al. (2007) menciona que o uso mais eficiente da energia de tração é vital para ferrovias modernas. Desta forma, empresas deste ramo buscam estratégias

para economia de diesel, visto que este é o maior gasto variável de uma ferrovia de carga.

Este indicador é amplamente acompanhado no dia a dia das ferrovias da VALE, tanto pela operação quanto pela manutenção. O fato deste acompanhamento ser diário é devido ao consumo de combustível representar, em média, 65% de todos os custos operacionais de uma ferrovia e, 35% de todos os custos ferroviários, conforme pode ser visualizado na Figura 2.

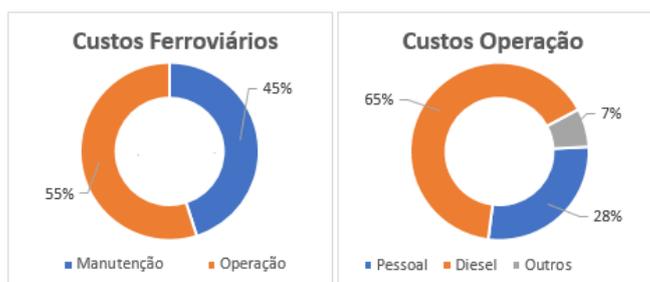


Figura 2 – Custos Ferroviários e Operacionais

Conforme mencionado, as ferrovias da VALE realizam a gestão dos litros consumidos, ao invés dos litros abastecidos. Esta gestão se dá pela utilização de, no mínimo, dois eventos de abastecimento, o qual possibilita o rateio de todos o volume apurado entre estes dois eventos, conforme pode ser visualizado na Figura 3 e pela equação a seguir.

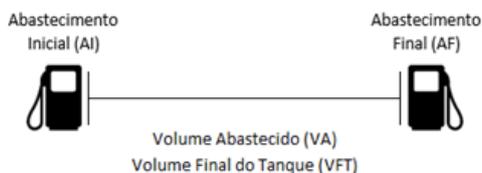


Figura 3 – Rateio do Consumo Entre Eventos

Equação:

$$VolumeConsumido = VAAF + VFTAI - VFTAF$$

Sobre a apuração citada na Figura 3, ocorre um rateio do volume consumido gerado. Inicialmente, a apropriação deste volume é rateada em três importantes processos ferroviários, que são: Formar, Circular e Carregar/Descarregar. Estes, respectivamente, são responsáveis pelo consumo de 3,4%, 94,2% e 2,4% de todo o consumo de combustível que ocorre, de forma cíclica, entre os eventos de descarga e carga dos vagões.

Atualmente, o rateio da maior parcela do consumo, que é no processo de Circular, é feito com base matemática através da Fórmula de Davis. Já o rateio nos processos de Formar e Carregar, são feitos com base em consumos históricos, o qual aplica-se um fator de litros por hora (L/H). Em ambos os casos, mesmo que exista uma elevada certeza sobre o volume consumido gerado entre os eventos de abastecimento (através da automação presente nos postos de abastecimento), temos, como pode ser percebido, um rateio entre os processos (e dentro do mesmo processo) com baixo nível de precisão.

Sabe-se o quão importante é o indicador de Eficiência Energética (EE) para a saúde financeira da empresa, onde cada pequena variação sobre o resultado deste indicador implica em um significativo dispêndio ou economia para o balanço da mesma.

Apesar de toda esta relevância, vários são os fatores presentes na sua gestão, que a tornam difícil e custosa esta medição, que são:

- *Dificuldade na medição do consumo (precisão dos equipamentos de medição/método de rateio);*
- *Elevada quantidade de variáveis de interferência (representativamente versus responsabilidade);*
- *Dificuldade em avaliar de forma isolada o impacto de cada variável na variação do indicador (elevada sensibilidade).*

Visando superar cada um dos obstáculos citados acima, foi estabelecido pela área de Engenharia da VALE um Sistema de gerenciamento do consumo de combustível para suas ferrovias, conforme pode ser visualizado na Figura 4, o qual objetiva:

- *Aumentar a precisão no cálculo do volume de diesel consumido em diferentes níveis de estratificação (Medição);*
- *Fornecer melhor projeção do indicador, evoluindo da abordagem pragmática para a abordagem simulada (Projeção);*
- *Ampliar o conhecimento sobre as variáveis que impactam o indicador buscando mensurar a sua representatividade (Análise).*

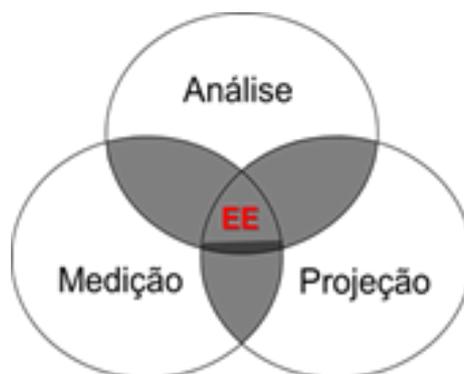


Figura 4 – Sistema de Gerenciamento de Consumo de Combustível

Por fim, verificou-se que as soluções existentes na Indústria 4.0, com suas aplicações de Internet das coisas (IoT) e análise avançadas de dados, seria totalmente viável para tratar o consumo de combustível e alcanças os objetivos propostos.

CONTEXTO OPERACIONAL E TECNOLÓGICO

Conforme DOMÍNGUES et al. (2012) em particular, a operação de trânsito (circulação) tem um impacto importante sobre o consumo de combustível e diferentes estratégias podem ser aplicada para gerar uma certa otimização sobre este processo.

Segundo PEREIRA (2009), a Eficiência Energética (EE) é um assunto de extrema importância para o negócio, uma vez que este consiste no maior gasto de uma ferrovia de carga. Para melhorar a eficiência energética, ações podem ser tomadas em vários níveis, tais como: operacional, tecnológico, manutenção, recebimento, controle, abastecimento e gerencial.

Alinhado com os níveis de atuação citados pelos autores referenciado acima, buscou-se correlacionar a linha de atuação especificada no Sistema de gerenciamento do consumo de combustível da VALE e as reais necessidades do negócio, chegando, portanto, a cenário apresentado na Figura 5.

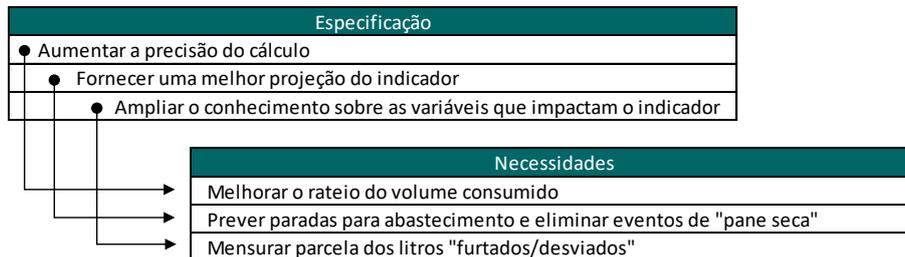


Figura 5 - Especificação versus Necessidades

Baseando-se apenas no primeiro item especificado na Figura 5, “Aumentar a precisão do Cálculo”, torna-se inevitável a busca por uma tecnologia que suporte a tomada de decisão operacional e contribuía de forma favorável para a melhoria e gestão de diversas variáveis inerentes ao consumo de combustível e, conseqüentemente, que refletem variações sobre o indicador de Eficiência Energética (EE).

Visando atender as necessidades operacionais, sempre respeitando a especificação presente no Sistema de gerenciamento do consumo de combustível, o departamento de engenharia ferroviária da VALE realizou uma ampla pesquisa no mercado (e até mesmo buscou desenvolvimento interno – Tabela 1), de uma solução que permita realizar a apuração (seja por vazão ou nível) do consumo de combustível das locomotivas e, conseqüentemente dos trens, permitindo a tomada de decisão operacional sobre estes dados.

Tabela 1. Soluções identificadas/desenvolvidas

Solução	Ano de Teste
Smar	2012
Smcc*	2013
Ztr	2015
Omnicom	2016

* *Desenvolvimento interno*

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Ao longo de todo este período quatro soluções foram identificadas/desenvolvidas. Cada solução foi testada por pelo menos 1 ano, na qual, após este período, um relatório de homologação foi elaborado e a sua viabilidade técnica e econômico-financeira eram apuradas. Em vários casos, a baixa precisão dos equipamentos e os elevados custos na aquisição da solução foram empecilhos para uma ampla aplicação (frota de aproximadamente 300 locomotivas).

Mediante aos avanços tecnológicos e ao barateamento de algumas soluções tecnológicas, associada a implementação de projetos auxiliares, permitiu-se que, ao final de 2016, a área de engenharia aprovasse um investimento que objetiva realizar a instalação, no primeiro ano de, pelo menos, 48 locomotivas de sua frota, ou seja, aproximadamente 15% de suas locomotivas (instalação plurianual).

Dentre as várias soluções pesquisadas, pode-se destacar, sobre a solução escolhida, as seguintes funcionalidades e/ou características presentes na Figura 6 e abaixo:

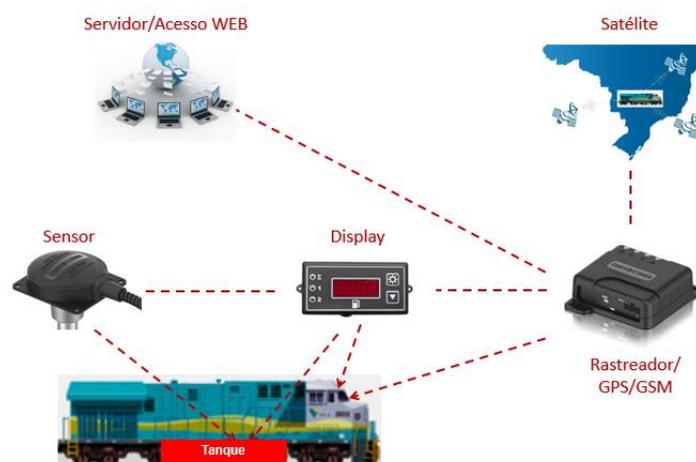


Figura 6 – Detalhamento da solução escolhida

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



- *Medição capacitiva, não necessitando de ar comprimido para realizar a medição;*
- *Capacidade de realizar a medição de forma estática e dinâmica (com razoável precisão < 1%);*
- *Integração com o sistema de rastreamento (acesso online – localiza a locomotiva com informação de consumo entre pontos e nível de tanque);*
- *Trabalha, na média, com quatro elementos sensores instalados nas extremidades do tanque das locomotivas (compensação de desníveis).*

Vale ressaltar, para que as necessidades de negócio fossem amplamente atendidas, buscou-se desenvolver um projeto com equipe multidisciplinar envolvendo as áreas da Tecnologia de Informação (TI), Engenharia e Tecnologia Operacional (TO).

O trabalho em formato matricial dessas equipes foi fundamental para o sucesso do desenvolvimento da solução, envolvendo desde o estudo dos equipamentos, elaboração de um manual técnico de instalação e manutenção física, a própria instalação e configuração dos componentes nas locomotivas até a integração com sistemas de informação.

Na camada da Tecnologia da Informação (TI), de fato onde os dados se transformam em informações, pode-se disponibilizar estas informações de forma estruturada nos sistemas legados da empresa e, conseqüentemente, serem analisadas e publicadas nos painéis operacionais disponibilizados dentro do centro de controle operacional.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Seguindo os pilares de atuação presente no Sistema de gerenciamento do consumo de combustível, buscou-se através da implantação dos medidores melhorar a **Medição** do

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



consumo de combustível das locomotivas/trens da VALE. Após esta medição, na qual, suportada pelos processos de TI permitiram transformar dados em informações (através dos medidores de consumo de combustível), buscou-se realizar um trabalho de análise avançadas visando atuar sobre os outros dois pilares presentes no Sistema de gerenciamento do consumo de combustível, que são: **Análise e Projeção**.

A busca pelo trabalho de análise avançada foi desenvolvida em quatro etapas, sendo que estas etapas desenvolveram dois ativos digitais. A primeira etapa transformou os dados brutos dos medidores em **dados brutos dos medidores em cubos de informações** processados para fornecer **detalhamento** completo sobre ocorrências de **eventos** diversos. A segunda etapa, desenvolveu a **segmentação** de padrões (modelos de trens) nas **condições da via** (rampas e curvas) e na **forma de condução** para estudos específicos. A terceira etapa gerou o **aprendizado de máquina** para **predição do consumo** conforme padrões prévios (preenchimento das variáveis da fórmula de Davis através de aprendizado de máquina – dados reais). A quarta etapa nós permitiu **otimizar a aceleração** (velocidades) para encontrar melhor forma de vencer os trechos (rampas e curvas) na via (simulação de cenários hipotéticos). Por fim, dois ativos digitais foram desenvolvidos: o primeiro o algoritmo/código fonte do aprendizado de máquina e o segundo um Dashboard representativos com os dados analisados e as tendências futuras do indicador de Eficiência Energética (EE).

Para suportar o desenvolvimento destas quatro etapas e dois ativos digitais, que foram citados acima, a metodologia presente na Figura 7 foi estabelecida:



Figura 7 – Metodologia utilizada

Dentro desta metodologia, várias atividades foram desenvolvidas, conforme pode ser visualizada na Figura 8:

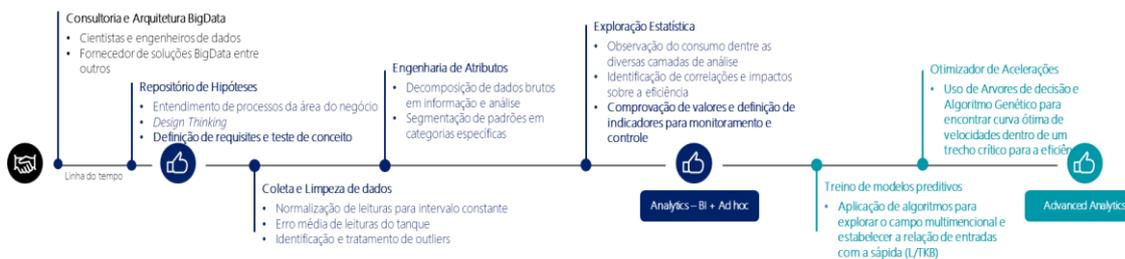


Figura 8 – Atividades e Produtos desenvolvidos

Após o entendimento e execução da metodologia e das atividades , torna-se necessário realizar o detalhamento dos produtos (insight) obtidos:

1. Análise exploratório sobre a variabilidade do consumo em trens

Com esta análise, conseguiu-se obter os valores de referência da Eficiência Energética para um cada um dos modelos de trens e perfil de via, para uma análise comparativa e, também, seu desvio padrão, conforme pode ser visualizado através da Figura 9.

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Condic ao_Ci...	Velo	Form. Trem	Qtd Locs.	Posição	Rampa Forte			Rampa Leve	
					Plano	Descendo	Subindo	Descendo	Subindo
Vazio	20 ≤ x < 40	168	1	Comandada			-3.96		-2.42
				Lider	-2.80	-2.65	-4.64	-2.88	-3.22
				Subtotal	-2.80	-2.65	-6.43	-3.23	-3.65
		252	2	Comandada			-10.28		-6.03
				Lider			-11.51	-5.60	-6.16
				Subtotal	-2.80	-2.65	-6.43	-3.23	-3.65
	3	Lider	-4.10	-3.73	-6.07	-3.87	-4.08		
		Remota			-5.42	-2.86	-3.18		
		Subtotal	-4.10	-3.73	-6.83	-4.13	-4.31		
	40 ≤ x < 60	168	1	Comandada			-3.72	-0.68	-0.97
				Lider	-2.95	-1.94	-4.10	-2.64	-3.13
				Subtotal	-2.95	-1.94	-5.00	-2.87	-3.51
		252	2	Comandada			-7.45	-4.56	-5.67
				Lider			-9.31	-5.13	-6.18
				Subtotal	-2.95	-1.94	-5.00	-2.87	-3.51
	3	Lider	-3.74	-2.91	-5.26	-3.51	-4.02		
		Remota	-2.74		-4.71	-2.68	-2.89		
		Subtotal	-5.67	-3.84	-8.47	-4.99	-5.95		
Grand total					-3.88	-3.10	-5.73	-3.58	-4.08
					-3.43	-2.63	-5.86	-3.30	-3.81

Figura 9 – Tabela comparativa entre trens e perfil

Constatou-se que, em perfis específicos, o modelo de trens com 3 locomotivas e 252 vagões é o mais econômico. Analisando apenas os trens vazios e carregados de 252 vagões, percebeu-se que os trens vazios apresentam uma maior variabilidade de consumo (fora do normal), conforme pode ser visualizado na Gráfico 1 abaixo:

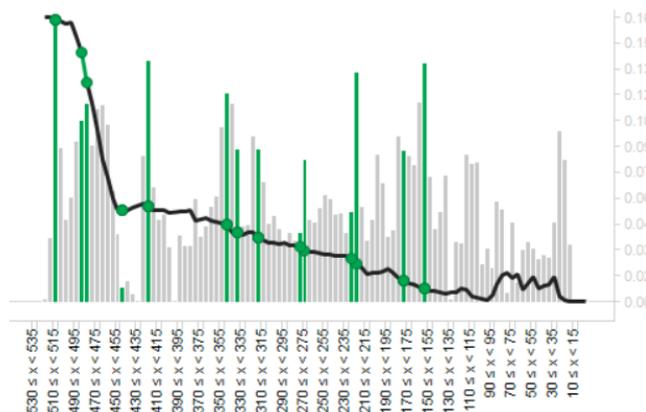


Gráfico 1 – Variabilidade de consumo em determinados locais

Com base nestes valores e locais, estabeleceu-se como ação, visando a redução a variabilidade no consumo de combustível, um padrão de condução para trens vazios,

antes, existente apenas para trens carregados, visando a uniformidade na condução do trem e, conseqüentemente, a redução do consumo de combustível.

2. Locais ótimos de parada de trens vazios e carregados

Nesta etapa do projeto buscou-se descobrir o custo de uma parada em cada ponto da ferrovia e a partir dos perfis de rampa e eventos ocorridos com a intenção de parar, selecionar os locais que apresentam uma estatística favorável para o consumo e restringir os desfavoráveis.

Pode-se perceber nesta etapa que as paradas em locais recomendados consomem em média 30 e 46% menos combustível por trens vazios e carregados (com sugestões a cada 7 Km), respectivamente. No Gráfico 2, pode-se identificar estes locais. As cores azul e verde referem-se aos locais com melhor perfil de consumo e os locais com cores amarela e vermelha com pior perfil de consumo.

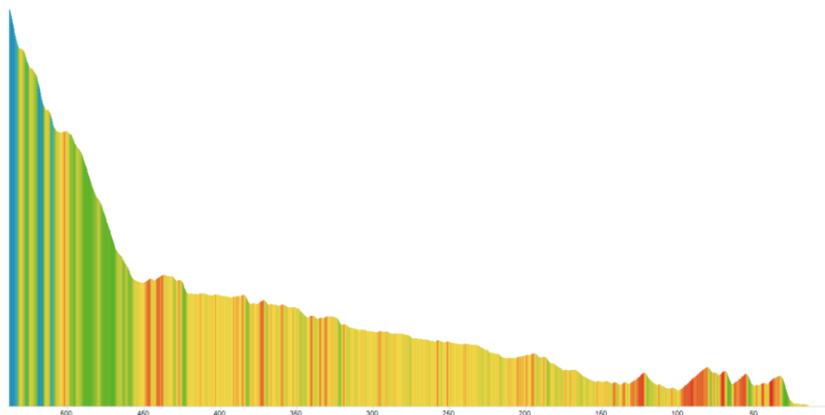


Gráfico 2 – Impacto do Perfil de Via (rampas) na Eficiência

Como ação oriunda desta análise, disponibilizou-se um Dashboard dentro do Centro de Controle Operacional da Ferrovia apresentando uma sugestão de local de parada azul e verde em detrimento a parada realizadas nos locais amarelos e vermelhos.

3. Otimização das curvas de velocidade por perfis de via

Nesta etapa do projeto desenvolveu-se um otimizador que busca as curvas ótimas de velocidade por perfil de via. O Gráfico 03 exemplifica o campo de possibilidade de soluções (neste exemplo, apenas três dimensões), aonde busca-se chegar em uma única solução ótima global (do menor consumo de combustível – relacionando dezenas de outras dimensões).

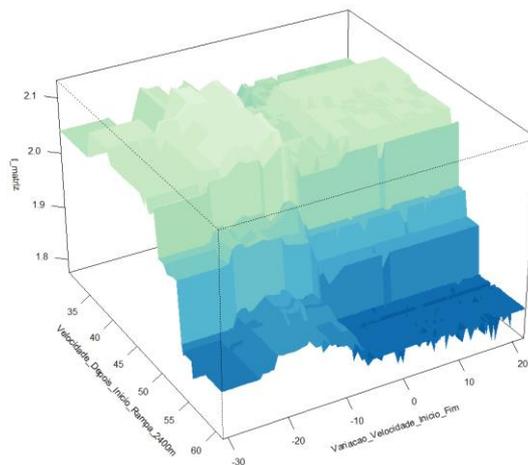


Gráfico 3 – Impacto do Perfil de Via (rampas) na Eficiência

Após a geração do otimizador, conseguimos extrair uma curva conforme apresentada no Gráfico 4. Este gráfico apresenta a velocidade a cada minuto em um trecho que deve ser respeitada para se conseguir o máximo de eficiência energética (menor consumo).

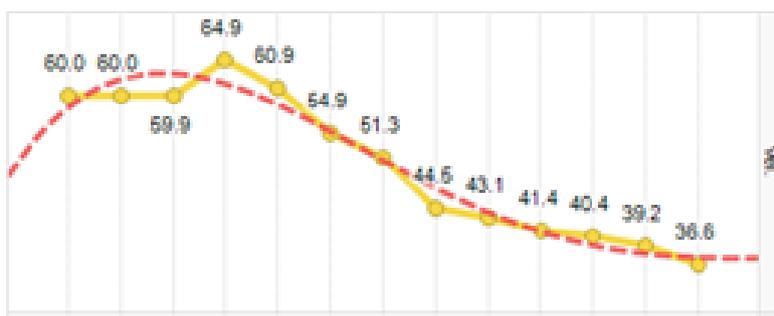


Gráfico 4 – Sugestão de velocidade ótima versus perfil

Com base nestes resultados, estabeleceu-se como ação, alterações no padrão de condução para os trens carregados (que já existiam um padrão de condução estabelecido), visando a uniformidade na condução do trem e, conseqüentemente, a redução do consumo de combustível.

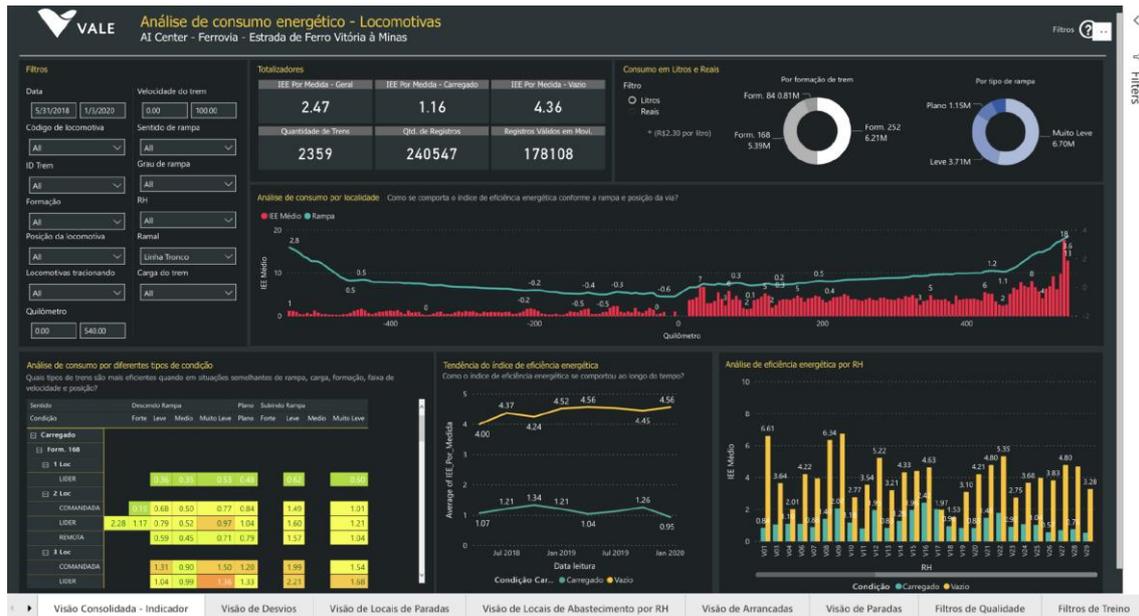
4. Painel de monitoramento de eficiência

Nesta última etapa um dashboard foi criado no Microsoft Power BI, o qual contempla a Análise de Consumo Energético, onde conta-se com seis visões que demonstram respectivamente os KPI (indicadores) do projeto, os desvios dos valores ideais, análise do local de parada das locomotivas, os locais de abastecimento de cada macrorregião,

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



o consumo energético nas arrancadas da locomotiva e o consumo energético durante as paradas da locomotiva.



Parte deste painel ainda está em fase final de construção e será disponibilizado para os controladores de tráfego dentro dos Centro de Controle Operacional.

CONCLUSÃO

A entrada dos sensores de medição do consumo de combustível bem como as ferramentas de análise avançada de dados, permitiu avanços em todas as frentes propostas no Sistema de gerenciamento de consumo de combustível da VALE. A melhoria sobre o processo de medição é notória, sendo esta a sustentação necessária para as demais frentes de atuação, que são a análise e projeção dos dados. Ressalta-se a robustez da tecnologia escolhida, desde os sensores até a plataforma de análise, o qual

permite a integridade e disponibilidade constante dos dados para os algoritmos de aprendizado de máquina. Com este projeto, estima-se um benefício potencial anual, após a implementação das ações estabelecidas, na ordem de 2,9 Milhões de Litros de combustível e de 7,7 Mil Toneladas de CO2 não emitidos. Este benefício dar-se-à, principalmente pelas mudanças nos Padrões de Condução, tanto dos trens vazios quanto dos trens carregados, bem como a disponibilização de Painéis de Controle para o suporte a tomada de decisão dentro do Centro de Controle Operacional da Ferrovia.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

JORDÃO, L.; F. Ribeiro, 2006: Otimização da Eficiência Energética no Corredor Centro da FCA, Uma Análise da Redução de custo Operacional por Trecho. Monografia de Pós-graduação em Engenharia Ferroviária. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte.

PEREIRA, 2009: Soluções de otimização da eficiência energética de uma ferrovia de carga. Tese. RIO DE JANEIRO: PUC.

DOMÍNGUES, M.; FERNÁNDEZ-CARDADOR, A.; CUCALA, A.P.; PECHARROMÁN, R.R., 2012: Energy Savings in Metropolitan Railway Substations Through Regenerative Energy Recovery and Optimal Design of ATO Speed Profiles. In: IEEE transactions on automation science and engineering, v.9, n. 3.

BOCHARNIKOV, Y.V.; TOBIAS, A.M.; ROBERTS, C.; HILLMANSEN, S.; GOODMAN, C.J., 2007: Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways.