

CATEGORIA 3

ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DE DOIS MODELOS DE TRENS DE PASSAGEIROS EM UMA MESMA LINHA OPERACIONAL

1. INTRODUÇÃO

O transporte público de passageiros iniciou no Brasil em 1867. A tração elétrica em trens foi primeiramente utilizada em companhias ferroviárias do Rio de Janeiro, sendo depois estendida para o restante do país. Aos poucos, a tração elétrica foi restrita ao sistema de transporte metropolitano, sendo que a tração de carga passou a utilizar combustível fóssil. O transporte ferroviário, metrô ou trem de superfície auxilia na locomoção de grande quantidade de pessoas com segurança, gerando pouca poluição, e em tempo reduzido quando comparado aos demais meios de transporte (NABAIS, 2014).

Os benefícios do sistema metroferroviário incluem a economia de R\$8 bilhões com a retirada de ônibus e carros das ruas, a redução de 1,6 milhões de toneladas de emissões de poluentes na atmosfera, redução de 1 bilhão de horas nos deslocamentos, economia de 296 milhões de reais em custos de acidentes e de 847 milhões de litros de combustíveis fósseis segundo ANPTRILHOS (2022:11).

O relatório geral de 2018, divulgado em 2020, do Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Públicos (SIMOB/ANTP, 2020) sobre sistema de informações da mobilidade urbana traz dados importantes do transporte

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



sobre trilhos quando comparado com outros meios de transporte. O consumo de energia em Toneladas Equivalentes de Petróleo (TEP) é de 1 milhão por ano, conforme pode ser visto na Figura 1. A participação percentual do transporte sobre trilhos está em 9% dentro do cenário nacional. O ônibus aparece como maior consumo em transportes coletivos. Quanto maior o município em estudo, maior a participação do consumo de energia do transporte sobre trilhos (SIMOB/ANTP, 2020:51). Ainda dentro do mesmo relatório, é válido mencionar a distância percorrida sobre trilhos: são 32 bilhões de quilômetros por ano, o que corresponde a 8% na participação total de quilômetros percorridos e está apresentado na Figura 2. Nas figuras abaixo, TC significa Transporte Coletivo e TI transporte individual.

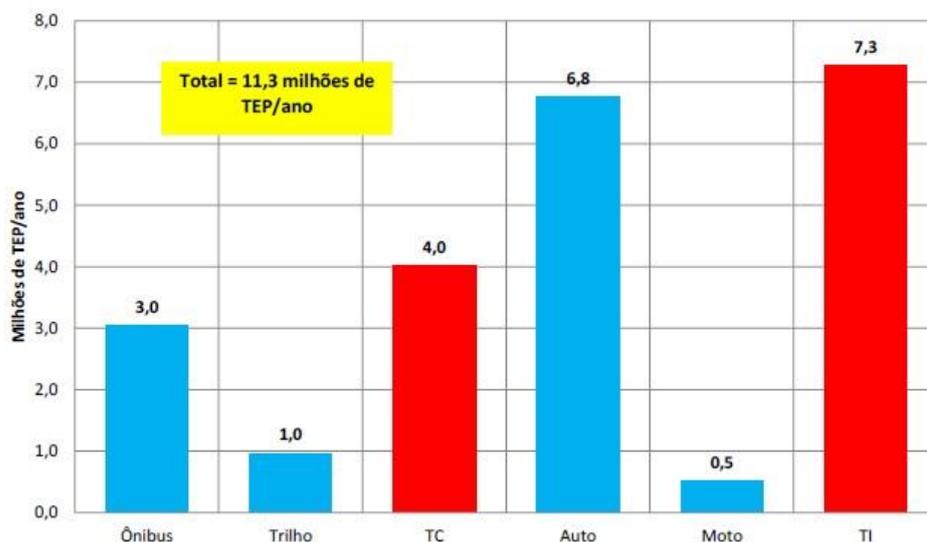


Figura 1 – Consumo anual de energia por modo de transporte, 2018

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS**

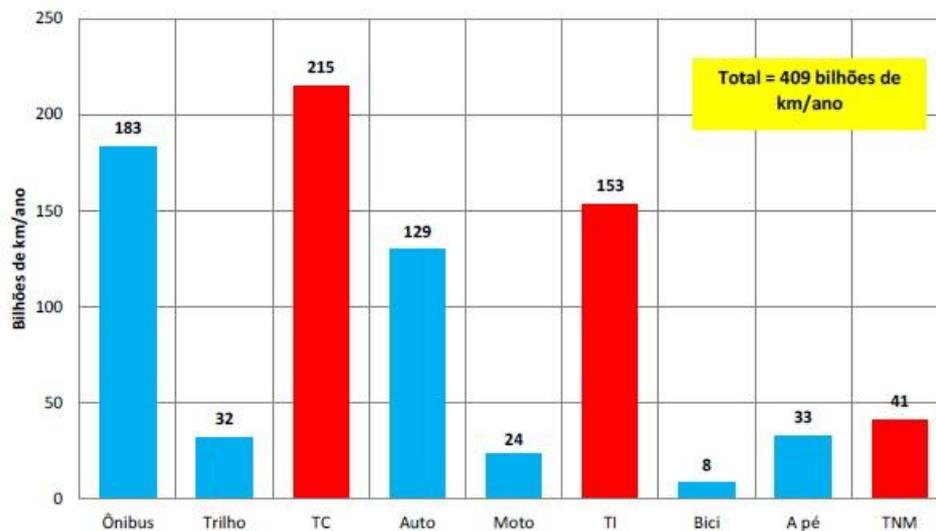


Figura 2 – Distâncias anuais percorridas pelas pessoas por modo de transporte, 2018

Dentro do contexto do transporte de massa sobre trilhos no Brasil, encontra-se a Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre (TRENSURB). Fundada em 1984, com sua sede em Porto Alegre/RS e transportando, atualmente, uma média de cem mil passageiros por dia.

A empresa de transportes de passageiros conta com trens de superfície e tem sua linha na região metropolitana de Porto Alegre. Com 43,8 quilômetros de extensão, passando por 6 municípios, 22 estações com intervalo médio de 2,1 km, 5 subestações de energia, alimentação por catenária com tensão de 3 kVcc e opera por aproximadamente 20 horas por dia. A frota é composta por 40 trens divididos em duas séries. A série 100 possui 25 trens de origem japonesa que começaram a operar 1984. Possui 4 carros (2 carros motores e 2 carros reboques), 8 motores de tração de corrente contínua, alimentação por 2 pantógrafos, motor alternador e ventilação no salão de passageiros. A série 200 é composta por 15 trens de origem franco-espanhola que começaram a operar em 2014.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



Possui 4 carros (2 carros motores e 2 carros reboques), 8 motores de tração de corrente alternada, alimentação por 1 pantógrafo, conversor estático e ar condicionado no salão de passageiros.

Essa frota opera com trens acoplados durante os horários de pico (2 horas pela manhã e 2 horas pela tarde) e em eventos especiais. A série 100 começou a operação com trens acoplados em junho de 2015 e a série 200 em março de 2020. As duas séries não são intercambiáveis.

A empresa contou com 3 expansões ao longo de sua história. No início da operação comercial a via chegava até a estação Sapucaia na cidade de Sapucaia. A segunda expansão chegou até o município de São Leopoldo em 2011. A última expansão foi em 2014 com a chegada até Novo Hamburgo, com o seu traçado em via elevada.

Os dados utilizados neste trabalho foram retirados do período de janeiro de 2012 até setembro de 2022.

O presente artigo compara o índice de consumo das duas séries operando em uma mesma linha operacional e está estruturado da seguinte forma: a segunda seção apresenta trabalhos relacionados ao tema de consumo energético em transporte de passageiros; a metodologia de obtenção dos dados está na terceira seção; a quarta seção demonstra a utilização dos dados pesquisados e os cálculos feitos para obtenção do índice de consumo; a quinta seção discute os resultados e apresenta os gráficos criados, e finaliza com a conclusão.

1.1. OBJETIVO

Este trabalho analisa o índice de consumo energético de duas frotas de fabricações distintas e operando sobre uma mesma linha. Observa, também, as variáveis que são relevantes no comportamento do consumo energético. Os dados obtidos de planilhas internas foram analisados nos softwares IBM SPSS® e Microsoft Office Excel®.

1.2. TRABALHOS RELACIONADOS

Foram realizadas pesquisas em artigos que contenham termos em inglês e em português relacionados a impactos operacionais, diferentes séries de trens numa mesma linha, falhas de material rodante e consumo de energia de material rodante.

O trabalho de D'ACIERNO (2019) trata da implementação de estratégias para redução do consumo de energia em casos de limitações do material rodante. Afirma que o maior custo é relacionado a alimentação do material rodante. Apresenta como estratégias mais utilizadas a diminuição da velocidade máxima e adoção de movimentos inerciais mais frequentes. Demonstra o paradigma da redução de energia e o acréscimo de tempo de viagem. Isso acaba causando desconforto para o usuário. Conclui que o rearranjo de grades horárias implicam em aumento de consumo.

Sobre perdas de energia em transporte ferroviário, o trabalho de FRANTASOVA (2020) propõe um algoritmo baseado em redes neurais. Defende que um monitoramento em tempo real da energia consumida pelos trens e a energia entregue pelas subestações são capazes de minimizar as perdas das seções da via. Utiliza a agilidade das redes neurais e a experiência de profissionais para alimentar o algoritmo. Afirma que cada

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



seção possui certos fatores que afetam as perdas e que não dependem somente de fatores técnicos. O algoritmo proposto tem alta acurácia, conseguindo identificar perdas em 30 minutos e com uma redução de perdas de 5%.

A formação de arcos é muito comum em trens que utilizam pantógrafo para a alimentação. A influência dos arcos na eficiência energética é tratada no trabalho de MARISCOTTI (2020). Descreve que se o arco ocorre durante a frenagem regenerativa a tensão é elevada e pode interferir na dissipação de energia e na reabsorção dela. Mesmo sendo de curta duração, os valores do arco não podem ser negligenciados por conta da alta incidência na operação.

O trabalho de VALERIY (2020) apresenta a utilização de fontes híbridas para alimentação da tração e como é dividida a utilização das mesmas. A alteração do consumo energético tem relação com o estilo de condução dos trens conforme descrevem VITAL (2014) e KUBÍN (2015).

A predição de consumo de energia está presente no trabalho de ZHAOLU (2019). Através da utilização de uma modificação da regressão linear propôs um modelo de análise que obteve 2,29% de erro no consumo energético de trams (veículo leve sobre trilhos de piso baixo utilizados em regiões urbanas). O trabalho constata que o alto consumo de energia deve-se ao grande volume de tráfego e pequenos intervalos de partida. Define que os elementos que têm grande influência na tração são a quilometragem percorrida, o volume de passageiros e a temperatura média. E que os elementos que têm influência na energia auxiliar do material rodante são o volume de passageiros e a taxa de paradas.

Conclui que as relações do consumo e dos elementos são não lineares. Variam conforme o mês e dependem da temperatura ambiente e do volume de passageiros.

Não foram encontrados trabalhos que tratam de diferentes séries de trens operando em uma mesma linha.

1.3. CONCEITOS APLICÁVEIS

Alguns conceitos utilizados no trabalho serão detalhados nesta seção.

1.3.1. Patinação

Um dos conceitos mencionados nos trabalhos relacionados e que será utilizado neste trabalho é o da patinação de rodas. Conhecido também como escorregamento. Devido a sua importância no trabalho, foi decidido descrever o sistema em item separado. O termo “patinação” pode ser definido como falta de aderência entre rodas e trilhos.

No caso de patinação, a força de atrito denominada aderência que se opõe ao deslizamento da roda é maior que o produto do peso do carro na roda pelo coeficiente de atrito estático. Neste caso, dizemos que o trem patina e o atrito estático é substituído pelo atrito de deslizamento, que é menor que o de aderência (BRINA, 1982:8).

Pode ocorrer em baixa velocidade e alta velocidade. A baixa velocidade a rotação das rodas é diminuída até que as rodas parem de patinar. Já na alta velocidade, se as rodas não pararem, o circuito principal é desligado.

Ainda segundo BRINA (1982), a equação que define a patinação é dada pela equação de Coulomb:

$$F \leq P_a \cdot f$$

Figura 3 - Equação de Coulomb

Sendo F a força sobre o trilho, Pa peso descarregado pela roda e f o coeficiente de aderência. As causas da patinação são: o aumento de F, quando há um aumento brusco de força tratora, pode acontecer que esta supere o valor do produto levando o trem a patinar. O que acontece principalmente na partida, porque nela é desenvolvida o maior esforço de tração; a diminuição de f, o valor do coeficiente de aderência pode baixar com a presença de umidade ou óleo nos trilhos; e a diminuição de Pa, devido a trepidações nos trilhos, deficiência de nivelamento da via ou mau balanceamento das rodas, pode-se diminuir o peso aderente.

Ao analisar o caso da TRENURB, cada série tem sua tecnologia quanto a detecção da patinação e de seu tratamento.

Na série 100, a detecção de patinação de rodas consiste em um resistor para a ponte de tensão do circuito principal e de um relé sensor de corrente. O trem japonês possuía um sistema de areeiro para tratar essa condição e que foi desativado no início dos anos 2000. Essa solução virou uma chave do sistema de antipatinação que altera a curva de aceleração do trem sem a aspersão de areia no boleto do trilho. Fazendo com que a roda do trem gire mais lentamente e tenha um melhor contato.

Na série 200, quando ocorrer deslizamento na tração ou na frenagem, o esforço será reduzido até que a aderência seja alcançada. Esse esforço é controlado por um módulo supervisor. Conforme descrito em ALSTOM (2014a:30) o primeiro estágio ocorre a uma

taxa de subida rápida de aproximadamente 70% do valor demandado que estava presente antes da condição de patinação e o segundo estágio é numa taxa mais lenta de reaplicação de torque ao total do valor requerido. Se uma segunda patinação ocorre durante a reaplicação de torque, a demanda é reduzida, mas na próxima reaplicação de torque, o ponto no qual a rampa muda para uma taxa mais baixa. Fazendo com que o sistema module a demanda de torque para fazer o melhor uso da aderência disponível. Na Figura 4 está apresentado o comportamento da tração no caso de patinação das rodas.

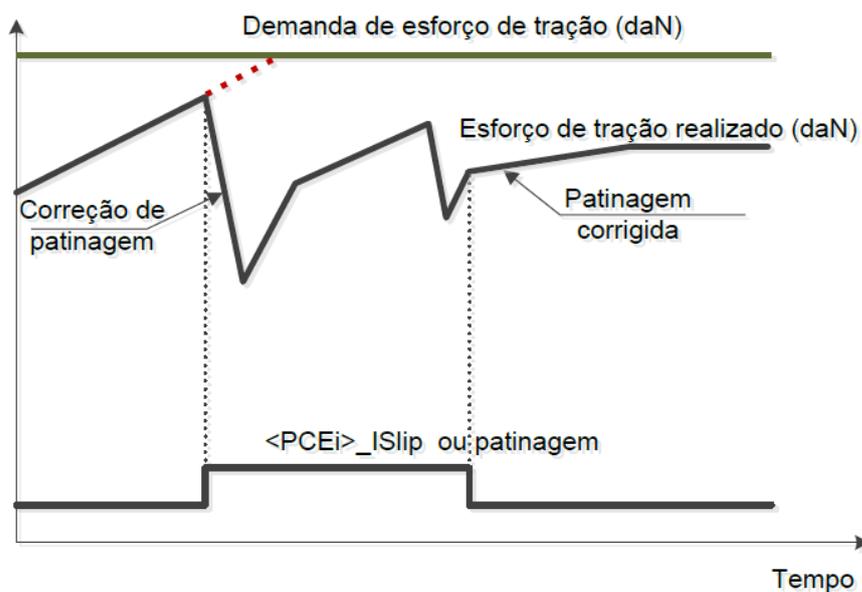


Figura 4 – Esforço de tração na antipatinação de rodas

1.3.2. Operação em potência reduzida

A série 200 tem na cabine o painel de chaves e botões que inclui a chave de potência reduzida. Essa chave altera a potência para 2/3 através de um controlador proporcional

integral. O sistema de propulsão limita o esforço para limitar a corrente através da catenária (ALSTOM, 2014b). A curva de aceleração se altera por conta disso. Essa chave foi mantida em ligada desde o segundo mês de operação dos trens já que sua potência reduzida não alterou o tempo de viagem em um tempo considerável e o consumo de energia é menor.

2. METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho foram necessários três dados básicos: consumo energético em quilowatt-hora (kWh), quantidade de passageiros transportada (em toneladas ou unidade) e quilometragem de cada série de trens (km). A partir desses dados pode-se calcular a quantidade de viagens, a quantidade de passageiros por viagem e, o principal ponto deste artigo, o índice de consumo.

Foram realizadas pesquisas em sistemas internos da empresa dos quais foram retirados relatórios referentes a quantidade mensal de passageiros e contabilizadas as entradas e saídas de passageiros das estações. Neste trabalho, foi adotado a quantidade de passageiros de entrada no sistema. A quilometragem foi medida pelo registrador de eventos dos trens e calculando mensalmente o valor de cada série e o valor total percorrido. A medição do consumo de energia de tração em quilowatt-hora mensal das 5 subestações.

De posse do índice de consumo de cada série e dos dados acima mencionados, foram criados gráficos e tabelas para entender os fatores que influenciaram e tem correlação

no índice de consumo da frota. Foram utilizados softwares Microsoft Office Excel® e IBM SPSS® para criação das figuras e tabelas.

3. CÁLCULO DO ÍNDICE DE CONSUMO

O desenvolvimento do trabalho foi em grande parte para encontrar a variável índice de consumo. O índice de consumo é definido pela Figura 5:

$$\text{Índice de consumo} = \frac{\text{energia consumida}(kWh)}{\text{distância}(km) \times \text{peso}(ton)}$$

Figura 5 - Equação do índice de consumo

A energia consumida em quilowatt-hora é definida pelo consumo de tração do trem. A distância percorrida em quilômetros. O peso em toneladas considerando o trem e os passageiros. A seguir são descritos os passos para os valores do índice de consumo de energia de cada série e também da frota.

3.1. ÍNDICE DE CONSUMO DE ENERGIA DA SÉRIE 200

O valor adotado para este trabalho foi retirado da média de valores apresentados em um estudo realizado pelo consórcio FROTAPOA responsável pela fabricação do trem. Este estudo foi realizado durante seis dias em 2015 e focou no consumo energético. Foram apresentados gráficos do índice de consumo ao longo da operação em cada um destes seis dias. Destes gráficos foram retirados os valores máximos e mínimos e realizada a média do índice de consumo. O valor médio do índice de consumo adotado como referência neste trabalho foi de 0,0361 (kWh/km.ton).

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS**

Na Figura 6 está apresentado o índice de consumo de energia do trem ao longo de um dia de operação pela linha em vermelho (09/03/2015).

Resultados do Consumo de Energia = f(Peso*distância)

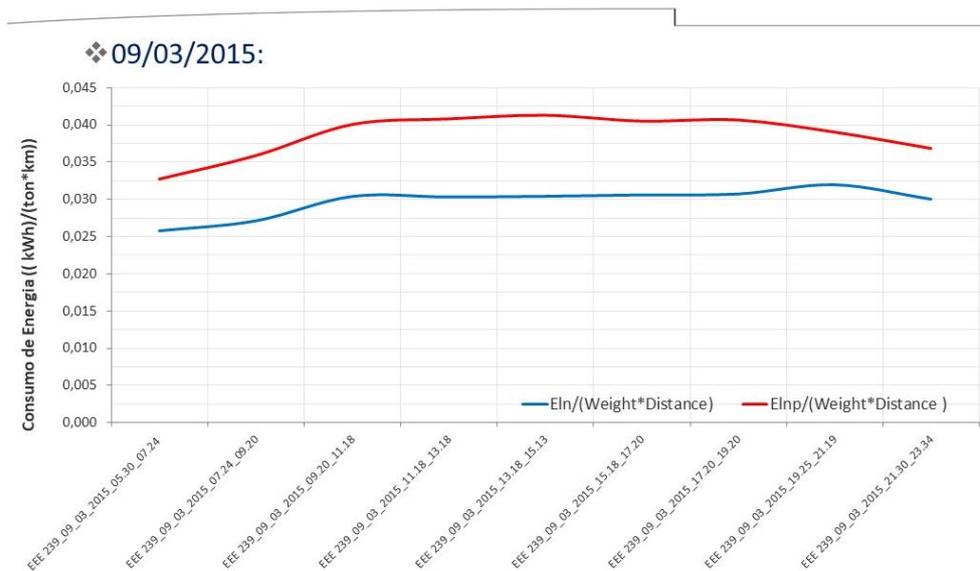


Figura 6 – Variação do índice de consumo de energia ao longo de um dia de operação (09/03/2015)

3.2. ÍNDICE DE CONSUMO DE ENERGIA DA SÉRIE 100

O índice de energia da série 100 não foi medido nos trens, como no caso da série 200. O índice foi calculado. Para tanto, foram utilizados os dados da empresa sobre volume de passageiros, a quilometragem percorrida pela série 100 e o consumo energético mensal. Neste último parâmetro, o valor para cálculo foi retirado do período anterior à entrada da série 200. O valor do peso do trem foi retirado de seus manuais (NIPPON, 1984). O peso considerado de cada passageiro de 70 kg foi retirado do edital e dos manuais dos trens da série 200.

O número de viagens mensal foi calculado dividindo a quilometragem total do mês pela extensão da via. Nesse caso, para considerar terminais de manobra e outras movimentações, o valor foi arredondado para 44 km. O valor consumido por viagem foi calculado pelo consumo (kWh) mensal dividido pelo número de viagens mensal. A quantidade média de passageiros por viagem ao mês foi calculada pelo número de entrada nos bloqueios dividido pelo número de viagens mensal.

De posse dos valores de consumo por viagem e de passageiros por viagem, o índice de consumo foi calculado baseado na Figura 5 e contabilizado entre julho de 2012 e agosto de 2014. O valor do peso sofreu uma alteração conforme vê-se na Figura 7. O valor médio de passageiros de passageiros por viagem foi multiplicado pelo peso médio de 70kg.

$$\text{Índice de consumo} = \frac{\text{energia consumida por viagem (kWh)}}{44 \text{ (km)} \times (202,5 + (\text{passageiros} \times 0,07) \text{ (ton)})}$$

Figura 7 - Equação do índice de consumo da série 100

O valor médio do índice e que foi adotado para esse trabalho foi de 0,0622 (kWh/km.ton). O valor médio de quilowatt-hora por viagem foi de 683,88 kWh e o valor médio de passageiros por viagem foi de 678,89 passageiros. Foi desconsiderado o mês de setembro de 2014, pois foi iniciada a operação da série 200.

3.3. ÍNDICE DE CONSUMO DE ENERGIA DA FROTA

O índice de energia da frota seguiu os passos do índice da série 100 com uma alteração. Para o cálculo do peso foi feita a média de peso das duas séries e está apresentado na Figura 8. A frota é composta pelos 40 trens das duas séries.

$$\text{Índice de consumo} = \frac{\text{energia consumida por viagem (kWh)}}{44 (\text{km}) \times (182,81 + (\text{passageiros} \times 0,07)(\text{ton})}$$

Figura 8 - Equação do índice de consumo da frota

O valor médio do índice e que foi adotado para esse trabalho foi de 0,0561 (kWh/km.ton). O valor médio de quilowatt-hora por viagem foi de 539,09 kWh e o valor médio de passageiros por viagem foi de 510,47 passageiros.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para análise dos dados obtidos e calculados, foram criadas variáveis de interesse em uma tabela mensal entre julho de 2012 e setembro de 2022. As variáveis, representadas por colunas na planilha, foram Mês/Ano, volume de passageiros que entraram no sistema, quilometragem da série 100, quilometragem da série 200, quilometragem da frota, número total de viagens, número total de viagens da série 100, número total de viagens da série 200, percentual de viagens da série 100, percentual de viagens da série 200, consumo quilowatt-hora mensal, quilowatt-hora por passageiro da frota, quilowatt-hora por quilômetro da frota, quilowatt-hora por viagem da frota, quilowatt-hora por viagem da série 100, passageiros por viagem da série 100, índice de consumo da série 100, passageiros por viagem da frota e índice de consumo da frota.

As figuras a seguir apresentam os gráficos das variáveis de interesse neste trabalho no período de setembro de 2014, início da operação da série 200, até setembro de 2022.

A Figura 9 apresenta a quilometragem da frota e a quantidade de passageiros que entraram no sistema.

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS**

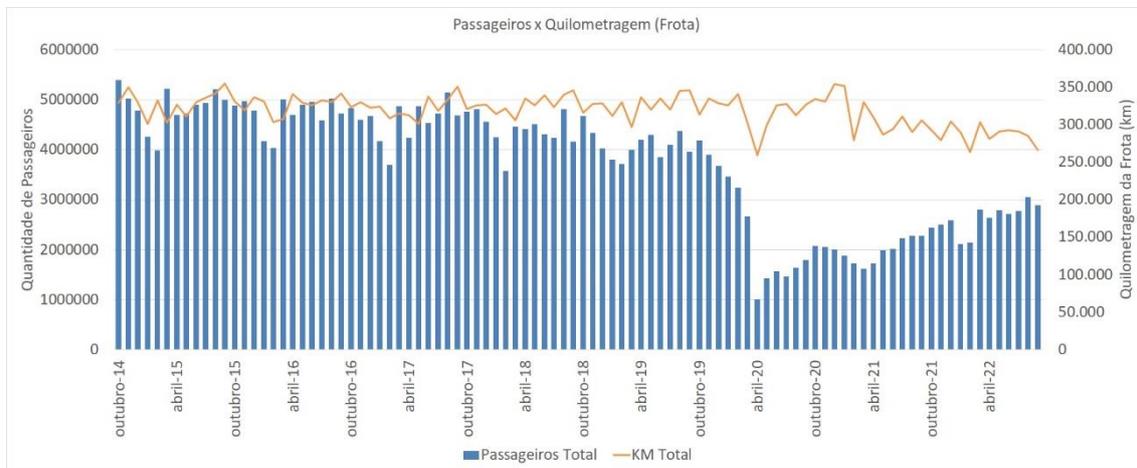


Figura 9 - Quilometragem e quantidade de passageiros

Nota-se pela figura acima o efeito da pandemia em março de 2020 e uma retomada lenta de passageiros a partir de então.

As próximas figuras apresentam os gráficos e que possui como parâmetro principal o índice de consumo de energia da frota ao longo dos meses de interesse representada pela linha laranja.

A Figura 10 mostra a variação do índice de consumo de energia e a quilometragem da frota ao longo dos meses. A Figura 11 mostra a variação do índice de consumo de energia e o consumo de energia medido nas subestações. A Figura 12 mostra a variação do índice de consumo de energia e a quilometragem da série 200. A Figura 13 traça um comparativo do índice de consumo de energia da frota com a quilometragem que cada série rodou ao longo dos meses. A linha em vermelho é o índice de consumo de energia médio da série 100 e a linha verde é o índice de consumo de energia médio da série 200.

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS**

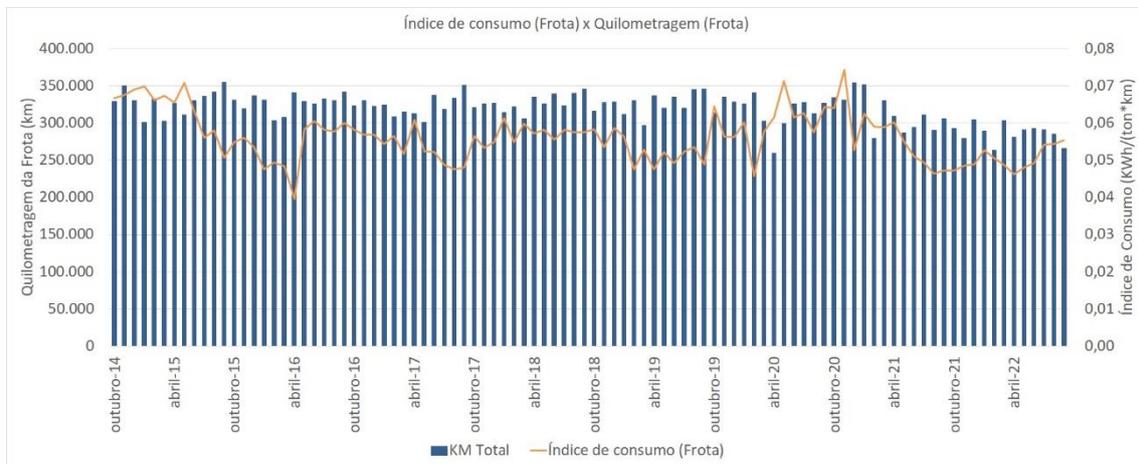


Figura 10 - Quilometragem e índice de consumo de energia da frota

Na Figura 10 observa-se que o índice de consumo de energia não varia conforme a quilometragem da frota e que com a baixa quilometragem entre março de 2020 e maio de 2020 o índice de consumo de energia aumentou.

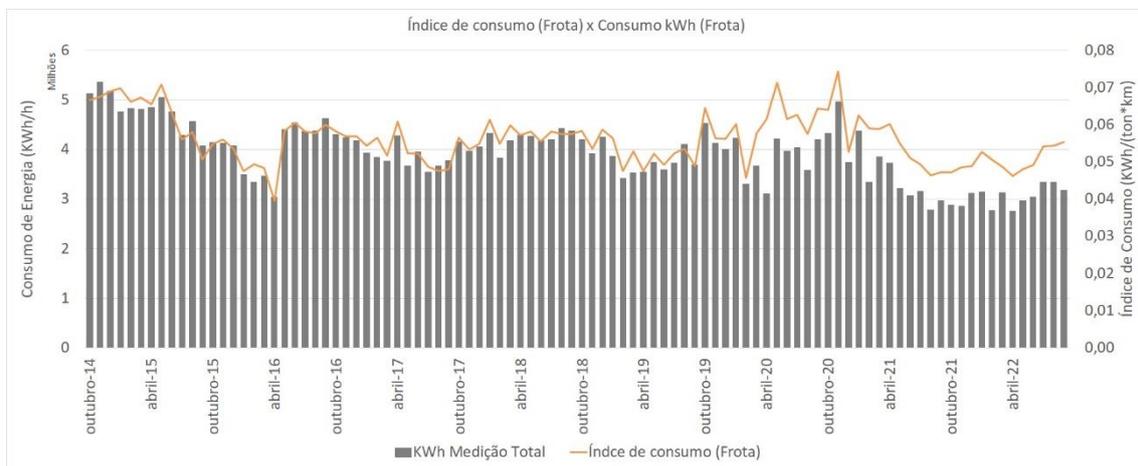


Figura 11 – Consumo de energia total e índice de consumo de energia da frota

Na Figura 11 observa-se que a linha do índice de consumo de energia segue a variação de energia de tração consumida. A linha do índice de consumo de energia acompanha o aumento e diminuição do consumo energético.

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS**

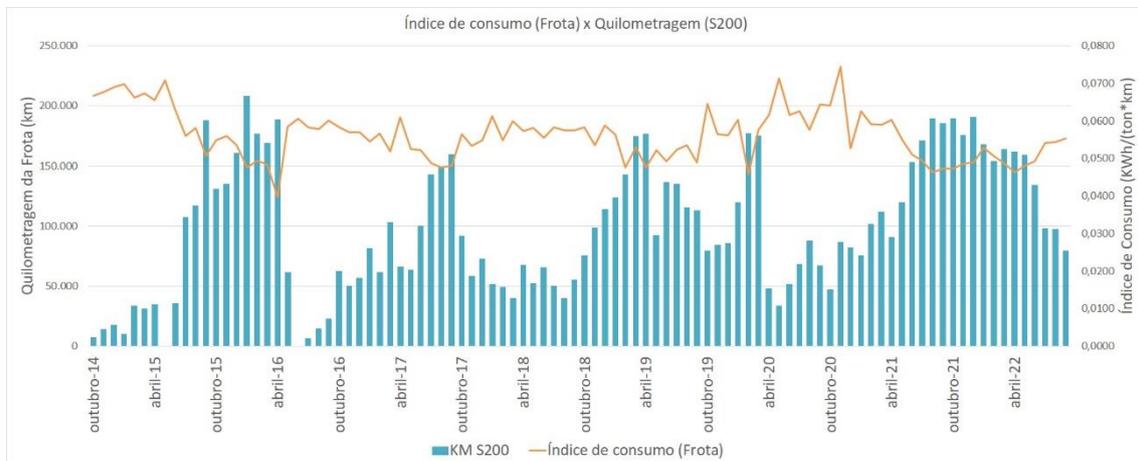


Figura 12 - Quilometragem da série 200 e índice de consumo de energia da frota

Na Figura 12 observa-se que o índice de consumo de energia aumentou conforme a baixa quilometragem da série 200 no período entre abril de 2020 e dezembro de 2020 devido a pandemia. Nota-se que o índice de consumo de energia diminuiu nos meses de aumento de participação da série 200 na operação, mas que sua maior quilometragem não coincide com o menor índice.

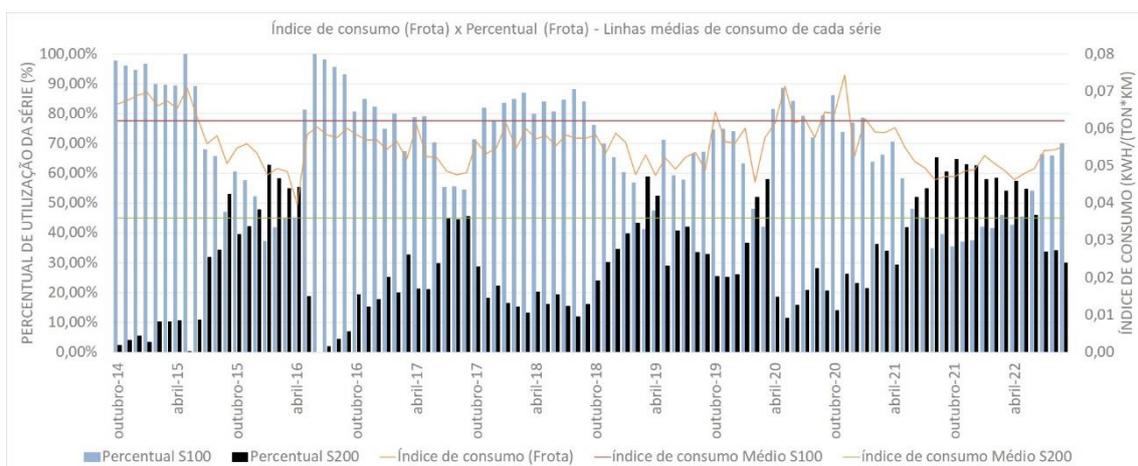


Figura 13 - Quilometragem das séries 100 e 200; índice de consumo de energia da frota e linhas que representam o índice de consumo de cada série

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



Na Figura 13 nota-se que o índice de consumo de energia calculado da frota fica abaixo do índice da série 100 em 100 meses dos 129 observados nesse trabalho. O índice de consumo de energia da série 200 nunca foi alcançado.

Ao observar o valor de índice de consumo da série 100 nas figuras acima, nota-se que ele é 58,02% maior que o da série 200 (0,0361 kWh/km.ton). Quando se compara o índice de consumo da frota, o índice de consumo é reduzido em 9,83% ficando em média com 0,0561kWh/km.ton. Para se notar uma diminuição no índice de consumo médio da série 100 em 25% (0,0466 kWh/km.ton) é necessário que 54% das viagens sejam realizadas pela série 200.

O índice de consumo médio a partir de março de 2020, período da pandemia, foi de 0,0556 (kWh/km.ton). Ressalta-se que durante o período acentuado da pandemia a empresa operou durante os horários de vale e de pico com trens acoplados das duas séries para manter o distanciamento dos passageiros.

Observa-se que existe um percentual de viagens ou quilometragem mínima da série 200 para que o índice de consumo de energia esteja abaixo do índice da série 100. O percentual é de 35,39% de viagens da série 200 para ficar abaixo da média do índice de consumo de energia da série 100 com um desvio padrão de 16,74%.

As tabelas a seguir demonstram em valores numéricos os cinco melhores e piores casos tendo como parâmetro de comparação o índice de consumo, Tabela 1 e Tabela 3, respectivamente. A Tabela 2 utiliza os menores índices de consumo de energia e mostra os valores de quilowatt por passageiro e por quilômetro.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



Os cinco maiores e menores meses do número de passageiros por viagem estão na Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente.

Os cinco menores e maiores meses do consumo de energia estão na Tabela 6 e Tabela 8, respectivamente. A Tabela 7 compara os meses de menor consumo com a precipitação média e umidade relativa mensal e a Tabela 9 compara os meses de maior consumo com a precipitação média e umidade relativa mensal.

Tabela 1 Os 5 menores índices de consumo de energia da frota

Mês/Ano	Passageiros	Quilometragem (km)	Consumo (kWh)	Passageiros/viagem	Índice de consumo
abr-16	4.701.158	340.831	3.043.818	606,90	0,0396
fev-20	3.242.227	341.214	3.306.863	418,09	0,0457
abr-22	2.641.037	281.429	2.755.604	412,91	0,0462
ago-21	2.274.209	290.654	2.787.489	344,28	0,0464
set-21	2.273.710	305.859	2.970.060	327,09	0,0472

Os resultados apresentados na tabela acima contam com utilização da série 200 acima de 60% no percentual das viagens realizadas. Os índices nos meses de abril de 2022, agosto de 2021 e setembro de 2021 sofreram com a baixa demanda de passageiros ainda por conta da pandemia.

Foram realizados cálculos para obter o consumo energético do quilowatt-hora por passageiro e por quilômetro. Os valores de abril de 2016 são os menores valores encontrados para esses dois parâmetros entre janeiro de 2012 e setembro de 2022. Os demais meses tem seu quilowatt-hora por quilômetro entre os menores, porém o quilowatt-hora por passageiros não segue essa lógica. Tem seus valores na média dos

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS**



valores da frota (1,1482). A Tabela 2 mostra o resultado do cálculo mensal referenciado acima.

Tabela 2 Os 5 menores índices de consumo de energia da frota com seus quilowatt-hora por passageiro e por quilômetro

Mês/Ano	kWh/passageiro	kWh/km
abr-16	0,6475	8,9306
fev-20	1,0199	9,6915
abr-22	1,0434	9,7915
ago-21	1,2257	9,5904
set-21	1,3063	9,7106

Tabela 3 Os 5 maiores índices de consumo de energia da frota

Mês/Ano	Passageiros	Quilometragem (km)	Consumo (kWh)	Passageiros/viagem	Índice de consumo
nov-20	2.051.943	330.616	4.968.928	273,08	0,0744
mai-20	1.427.155	299.246	4.217.618	209,84	0,0714
mai-15	4.718.422	310.751	5.055.390	668,09	0,0709
jan-15	4.257.396	301.204	4.760.280	621,92	0,0698
dez-14	4.788.465	329.837	5.175.094	638,78	0,0690

Os resultados da Tabela 3 se explicam por alguns fatores. Os meses do ano de 2020 são explicados pela pandemia, portanto com baixa demanda de passageiros e alta disponibilidade de trens. Em especial os trens acoplados. Os meses de 2015 e o mês de 2014 são do período de entrada em operação dos trens da série 200. Além disso, esses meses contaram com alta demanda de passageiros.

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS**



Tabela 4 As 5 maiores quantidades de passageiros por viagem da frota

Mês/Ano	Passageiros	Quilometragem (km)	Consumo (kWh)	Passageiros/viagem	Índice de consumo
mar-12	4.551.719	238.528	3.789.542	839,63	0,0608
mai-12	4.424.554	249.141	3.902.627	781,41	0,0609
out-13	4.996.631	283.279	4.335.631	776,1	0,0596
mar-15	5.223.091	302.474	4.811.934	759,79	0,0674
out-12	4.770.399	281.983	4.323.962	744,36	0,0602

Sobre a Tabela 4, o alto índice de passageiros por viagem está totalmente vinculado ao aumento do número de passageiros. Os meses de março tem historicamente um aumento na quantidade de usuários por conta do início do ano escolar. Vale apontar que somente no mês de março o índice de consumo se mostrou maior que a média sendo o sétimo maior valor calculado.

Tabela 5 As 5 menores quantidades de passageiros por viagem da frota

Mês/Ano	Passageiros	Quilometragem (km)	Consumo (kWh)	Passageiros/viagem	Índice de consumo
abr-20	1.004.983	259.113	3.104.252	170,66	0,0615
jul-20	1.468.648	327.842	4.037.063	197,11	0,0626
mai-20	1.427.155	299.246	4.217.618	209,84	0,0714
jun-20	1.562.243	326.329	3.968.843	210,64	0,0616
mar-21	1.622.313	330.559	3.852.902	215,94	0,0589

Em relação à tabela acima, os menores valores de passageiros por viagem estão vinculados ao período de pandemia e do isolamento. Em abril de 2020 foi o mês com a menor entrada de passageiros no sistema.

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS**



Tabela 6 Os 5 menores consumos de energia

Mês/Ano	Passageiros	Quilometragem (km)	Consumo (kWh)	Passageiros/viagem	Índice de consumo
abr-22	2.641.037	281.429	2.755.604	412,91	0,0462
fev-22	2.143.595	263.639	2.773.894	357,76	0,0506
ago-21	2.274.209	290.654	2.787.489	344,28	0,0464
nov-21	2.501.716	279.435	2.859.973	393,92	0,0486
out-21	2.436.018	292.705	2.882.074	366,19	0,0472

Os resultados da Tabela 6 contam com utilização da série 200 acima de 60% no percentual das viagens realizadas e com os índices de consumo de energia abaixo da média. Pesquisando pela precipitação dos meses da mesma tabela, nota-se que eles estão abaixo da média para Porto Alegre. A baixa precipitação influencia no coeficiente de aderência conforme Figura 3, o que diminui a incidência da patinação e por consequência o consumo de energia do trem.

A Tabela 7 foi construída a partir de dados retirados do Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET). A base meteorológica foi o município de Porto Alegre no período de janeiro de 2012 e setembro de 2022.

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS**



Tabela 7 Os 5 menores consumos de energia com a temperatura média mensal, a precipitação média mensal e a umidade relativa média mensal para Porto Alegre

Mês/Ano	Temperatura média POA (°C)	Precipitação média POA (mm)	Umidade relativa POA (%)
abr-22	19,80	0,16	79,07
fev-22	25,20	0,04	70,99
ago-21	16,54	0,18	80,21
nov-21	21,90	0,15	69,73
out-21	19,69	0,08	71,98

Tabela 8 Os 5 maiores consumos de energia

Mês/Ano	Passageiros	Quilometragem (km)	Consumo (kWh)	Passageiros/viagem	Índice de consumo
abr-14	5.038.214	349.268	5.272.706	634,70	0,0611
jul-14	5.069.797	321.814	5.304.965	693,17	0,0657
nov-14	5.020.804	349.697	5.367.325	631,73	0,0676
ago-14	5.268.456	358.299	5.802.536	646,98	0,0654
jun-14	4.681.751	351.555	5.845.116	585,96	0,0683

Na Tabela 8, os maiores consumos de energia são explicados pela operação somente da série 100, alta demanda de passageiros e as precipitações estão acima da média nos meses de julho e novembro de 2014. Excesso de água sobre os trilhos diminui o atrito entre as rodas e os trilhos fazendo com que a operação utilize o sistema de antipatinação do trem. Ele altera a curva de aceleração para melhorar o contato entre roda-trilho e, por consequência, aumenta o consumo de energia.

A Tabela 9 foi construída a partir de dados retirados do Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET). A base meteorológica foi o município de Porto Alegre.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



Observa-se que os valores da precipitação média em junho e julho de 2014 são praticamente o dobro do maior valor apresentado na Tabela 7.

Tabela 9 Os 5 maiores consumos de energia com a temperatura média mensal, a precipitação média mensal e a umidade relativa média mensal para Porto Alegre

Mês/Ano	Temperatura média POA (°C)	Precipitação média POA (mm)	Umidade relativa POA (%)
abr-14	21,03	0,12	76,14
jul-14	15,47	0,35	81,64
nov-14	22,90	0,15	72,52
ago-14	16,00	0,18	76,90
jun-14	15,32	0,33	85,64

A temperatura não parece ser um fator determinante já que valores semelhantes estão entre os piores e melhores de cada variável analisada.

Um mês de interesse para a operação da TRENURB é o mês de setembro devido à feira de exposições EXPOINTER. A qual acontece em Esteio e há um aumento considerável de passageiros, em especial aos finais de semana. Ao observar as tabelas acima, o mês de setembro só está presente em uma dessas análises.

Ressalta-se que ao longo da operação da série 200 houveram períodos de baixa quilometragem e que lentamente a quantidade de passageiros pós pandemia está aumentando. Mesmo com esses adventos, vê-se uma linha de tendência, em vermelho, de diminuição do índice de consumo da frota conforme Figura 14.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS

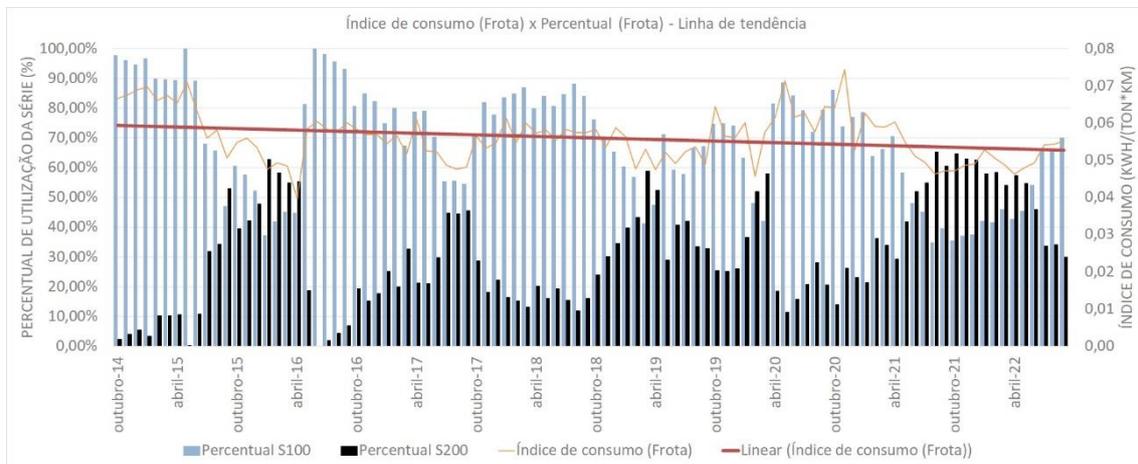


Figura 14 - Quilometragem das séries 100 e 200; índice de consumo da frota e a linha de tendência de queda do índice de consumo da frota

Para finalizar a análise dos dados de consumo, foi utilizado o software IBM SPSS® e a correlação de bivariável com os coeficientes de Pearson para traçar a correlação entre as variáveis. A correlação pode variar entre +1 e -1. Quanto mais perto de +1, os dados têm maior grau de correlação positiva. Enquanto quanto mais perto de -1, os dados têm maior grau de correlação negativa. Valores próximos a zero indicam que os dados não possuem correlação (WILCOX, 2003).

A correlação do índice de consumo com as demais variáveis está na Tabela 10. Foi utilizada a planilha completa com dados de janeiro de 2012 a setembro de 2022.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



Tabela 10 Correlação das variáveis e o índice de consumo

Variáveis	Índice de consumo
Mês/Ano	-0,470
Passageiros mensal	0,124
Quilometragem série 100	0,741
Quilometragem série 200	-0,788
Quilometragem total	-0,093
Consumo de tração	0,796
Quilowatt-hora por quilômetro	0,874
Quilowatt-hora por viagem	0,874
Passageiros por viagem	0,174
Temperatura POA	0,023
Precipitação POA	-0,034

A partir da Tabela 10, nota-se que as variáveis meteorológicas tem baixa correlação com o índice de consumo já que se aproximam de zero. Os consumos de energia, sejam quais forem, tem uma correlação positiva, ou seja, quanto maior o índice maior a sua correlação. A quilometragem total não tem correlação com o índice de consumo. Entretanto, a quilometragem da série 100 tem correlação positiva com o índice e a quilometragem da série 200 tem correlação negativa. Demonstra-se que quanto mais trens da série 200 estão operando menor será o índice de consumo de energia. Interessante notar que os valores absolutos das séries estão próximos. A quantidade de passageiros não tem correlação forte. Os meses do ano tem correlação moderada e negativa, o que se explica pela estabilização da série 200 ao longo dos anos. Possivelmente, se não houvesse paradas dos trens este valor negativo seria mais próximo a -1.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho confirmou a redução do índice de consumo de energia com a entrada de uma nova série mais moderna e econômica. O percentual do índice de consumo ficou abaixo, em média, 9,83% abaixo do índice da série 100. Nota-se que existe um percentual da série 200 que deve ser mantido para que esse índice esteja abaixo do valor da série 100.

A entrada em operação da série 200 no momento de alta de consumo energético no ano de 2014 decorreu na diminuição do índice de consumo de energia da frota. O artigo apresentado demonstra a redução do índice de consumo de energia através de análise gráfica e das tabelas desenvolvidas, as variáveis que explicam os cenários do índice de energia, da quantidade de passageiros por viagem e do consumo energético. Com foco no detalhamento das causas dos cinco melhores e dos cinco piores resultados mensais entre janeiro de 2012 e setembro de 2022.

Na área de transporte de passageiros por meios ferroviários, maiores estudos devem ser feitos no estilo de operação de cada frota, para minimizar seu consumo energético. Através de instrumentação da tração do material rodante e durante a operação comercial de cada série ao longo de um ano para que se consiga notar a sazonalidade das estações e do número de passageiros. Assim como visualizar as patinações, as frenagens de emergência aplicadas e as paradas realizadas para que se investigue o consumo nessas situações. Um foco maior na operação dos trens deve explicar a baixa correlação entre o índice de consumo e a quantidade de passageiros.

Os equipamentos auxiliares como os ares condicionados também devem ser monitorados. Com relação a empresa de transportes aqui analisada, ressalta-se, também, a necessidade de operar com os modelos da série 200 para utilizar a regeneração de energia da frenagem para a tração dos demais trens. Demais análises estatísticas e por redes neurais com o mesmo banco de dados também são válidas para trabalhos futuros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALSTOM. **Manual de manutenção AG10000**. Porto Alegre: Trem-Unidade elétrico Série 200, 2014a.

ALSTOM. **Manual de operação AG1000**. Porto Alegre: Trem-Unidade elétrico Série 200, 2014b.

ANPTRILHOS, Associação Nacional dos Transportadores de Passageiros sobre Trilhos. **Balço do Setor Metroferroviário 2021-2022**. Brasília: ANP Trilhos, 2022.

BRINA, Helvécio Lapertosa. **Estradas de ferro 2**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1982.

D'ACIERNO, Luc; BOTTE, Marilisa. **The Implementation of Energy-Saving Strategies in the Case of Limitation in Rolling Stock Availability**. Nápoles: 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe) 2019.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



FRANTASOVA, Dmitry; KUDRYASHOVA, Yuliya. **Information and Measurement System for Electric Power Losses Accounting in Railway Transport.** Novosibirsk: International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia, 2020.

KUBÍN, Jiří; FERKOVÁ, Želmíra. **Influence of Driving Style of a Tram Driver on the Tram's Energy Consumption.** Tatranska Lomnic: International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), 2015.

MARISCOTTI, Andrea; FEMINE, Antonio Delle; GALLO, Daniele; GIORDANO, Domenico; SIGNORINO, Davide. **How Pantograph Electric Arcs affect Energy Efficiency in DC Railway Vehicles.** Gijón: 2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2020.

NABAIS, Rui José da Silva. **Manual básico de engenharia ferroviária.** São Paulo: Oficina de textos, 2014.

NIPPON Sharyo Seizo Kaisha, LTD; HITACHI LTD. KAWASAKI Heavy Industries. **Manual de manutenção VOL IV Equipamento elétrico principal.** Porto Alegre: Trem-Unidade elétrico Série 100, 1984.

SIMOB/ANTP. **Relatório geral 2018.** São Paulo: ANTP, 2020.

VALERIY, Kuznetsov; PETRO, Hubsyky; YEVHEN, Kosariev; VIKTOR, Sychenko; MYAMLIN, Sergiy; VITALIJ, Liashuk. **Hybrid railway traction power supply system.** Istanbul: IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2020.

**29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS**



VITAL, Davi Martins. **Análise Estatística do Perfil de Consumo Energético de um Trem Metropolitano**. Novo Hamburgo: UFSM, 2014.

WILCOX, Rand. **Applying Contemporary Statistical Techniques**. San Diego: Academic Press, 2003.

ZHAOLU, Su; LIWEI, Dong. **Prediction of Tram Energy Consumption Based on Modified Regression Model**. Chongqing: 2nd International Conference on Safety Produce Informatization (IICSPI), 2019.