



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

### **CATEGORIA 3**

#### **METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE CUSTOS, EFICIÊNCIA E EMISSÕES –**

#### **CASO DO TIC SÃO PAULO - CAMPINAS**

### **1. INTRODUÇÃO**

Anualmente a ANPTrilhos defende a expansão da malha ferroviária brasileira para passageiros na busca de atender à crescente demanda. Para tornar isso realidade são necessários estudos de viabilidade para o melhor uso dos recursos disponíveis.



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA** **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

Este trabalho propõe uma metodologia de simulação e análise para encontrar o recurso energético mais apropriado para alimentar trens não eletrificados, a partir de avaliações detalhadas do desempenho energético de cada trem em cada viagem. É mostrado como elaborar simulações de marcha pelo *software MS Excel* e simulações energéticas pelo *Homer Pro*. Também é apresentado um método de análise que aponta quantitativamente o recurso energético mais apropriado a partir de uma distribuição de pesos entre indicadores.

Foi tomado como caso de estudo o cenário do Serviço Expresso do projeto TIC São Paulo – Campinas, desenvolvido pelo governo do estado de São Paulo, e dado como foco o aumento da eficiência energética, a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e dos custos operacionais.

O *Homer Pro* (*HOMER ENERGY, 2024*) é referência internacional para realizar simulações energéticas em microrredes, porém não projetado para o contexto ferroviário. Entretanto, será mostrado como utilizá-lo na simulação energética de trens e aproveitar o potencial dessa ferramenta em projetos de ferrovias.

## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

### 2. DIAGNÓSTICO

Considere um cenário em que seja impossível ou inviável a eletrificação de uma ferrovia. As principais tecnologias para a geração e o armazenamento de energia a bordo de trens de propulsão elétrica envolvem os combustíveis diesel, biodiesel puro (B100), mistura B20 (20% biodiesel e 80% diesel), gás natural e hidrogênio, além das células a combustível e das baterias (BATISTA, 2024; HOFFRICHTER, 2013; PIRES, 2013). Para a seleção do recurso energético mais apropriado é necessário realizar análises que considerem detalhes do desempenho dos trens nas viagens. As etapas e o resumo da metodologia proposta estão no fluxograma da Figura 1.

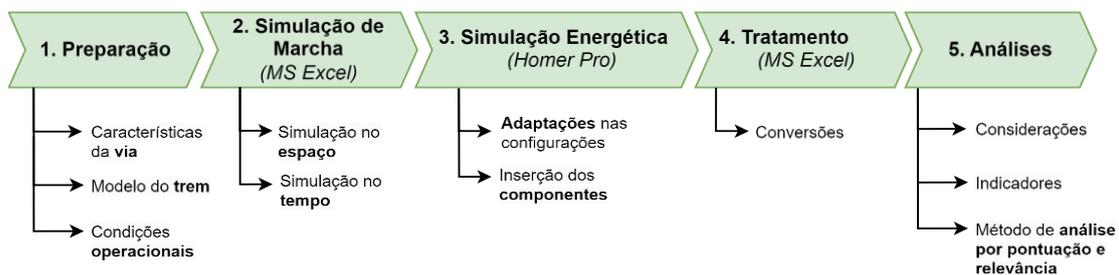


Figura 1 – Resumo da metodologia



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

#### **2.1. Cálculos Para a Simulação de Marcha**

Considerando as equações do APÊNDICE A, o estudo do movimento do trem utiliza as equações 1 a 5 provenientes da cinemática (PIRES, 2013). As resistências ao movimento do trem (equações 6 a 10) variam conforme a sua posição no percurso e são divididas em Normais, que independem do percurso e estão relacionadas às características do trem, Suplementares, que variam conforme as características geométricas da via (rampas e curvas) e Adicionais, que agregam o acréscimo de influências resistivas específicas relacionadas *simultaneamente* ao modelo do trem e às características da via (BATISTA, 2024).

#### **2.2. Cálculo da Demanda Elétrica do Trem**

São aplicadas as equações 11 a 15 (APÊNDICE A) e consideram-se a soma de todas as resistências ao movimento, a aceleração e o torque em cada ponto da trajetória. A massa do trem em movimento é modelada conforme a Equação 11 (PIRES, 2013).



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

#### **2.3. Preparação para Simulação de Marcha**

Para a elaboração da curva de demanda instantânea ao longo da viagem são necessárias as definições dos dados da trajetória e do modelo de trem que será utilizado. Consideram-se o perfil altimétrico (principal característica da via), além da localização e dimensões de raios de curvas, trechos com necessidade de velocidade diferenciada e túneis. Para isso, geralmente são realizadas pesquisas de campo, buscas por dados em plantas de projeto de uma linha ferroviária e uso de mapas geográficos disponíveis. No âmbito das simulações energéticas, são suficientes as características do trem, dos carros, das locomotivas e do sistema de alimentação apresentadas na tabela do APÊNDICE B.

#### **2.4. Simulação de Marcha pelo *MS Excel***

A simulação de marcha pode ser realizada separando o estudo do movimento no espaço em relação ao que toma como referência o tempo, o qual produz a curva de carga a ser importada



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

pelo *Homer Pro*. No *MS Excel* são considerados 24 parâmetros, cada um identificado por uma letra de A a X, dos quais os 16 (A a P) primeiros estão relacionados à dinâmica no espaço e os demais 8 (Q a X) referem-se à simulação no tempo. Na prática, os dados dos parâmetros podem ser organizados em colunas de uma planilha do *MS Excel*.

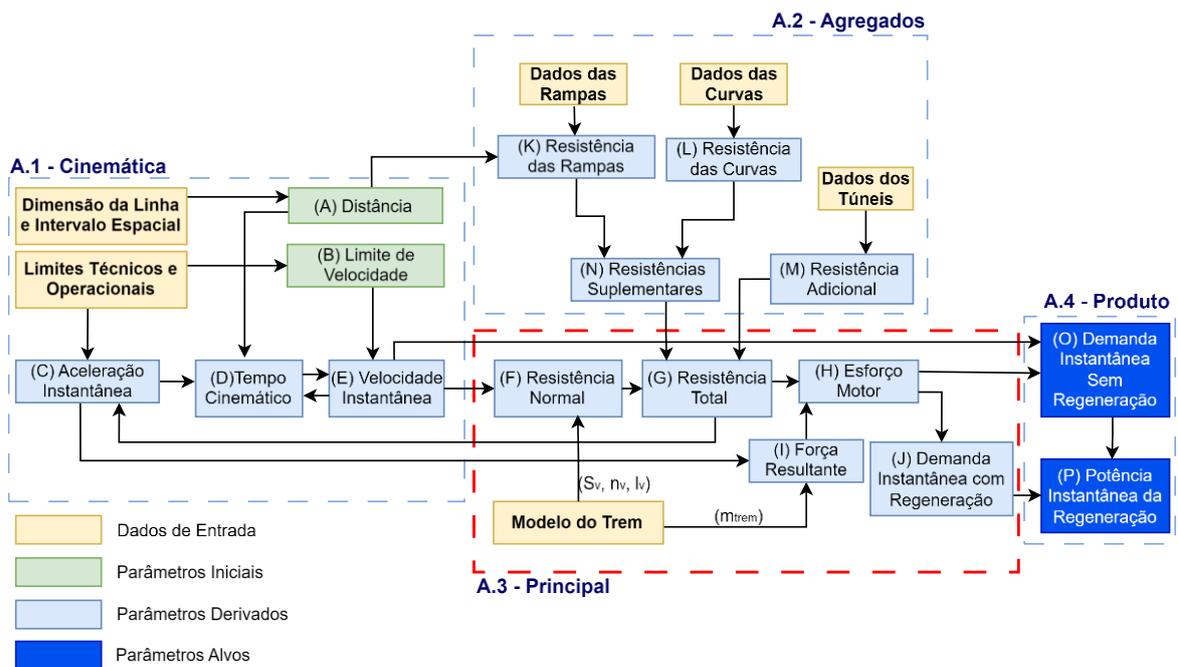
#### **2.4.1. Simulação de Marcha no Espaço**

Nesta etapa, os dados dos parâmetros são utilizados nos cálculos que conduzem à quantificação da variação da demanda elétrica instantânea sem regeneração e da variação da potência instantânea da regeneração no espaço. As interligações entre os blocos de dados foram apresentadas no fluxograma da Figura 2, enquanto o desenvolvimento do conteúdo de cada parâmetro é apresentado na Tabela 1 (considere as equações do APÊNDICE A). Os parâmetros da Tabela 1 (A a P) estão indicados na Figura 2.

**30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

**SIMULAÇÃO DE MARCHA**

**A) NO ESPAÇO**



**Figura 2 – Fluxograma para simulação de marcha no espaço**



**30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

**Tabela 1**

<b>PARÂMETRO</b>		<b>DESCRIÇÃO</b>
<b>A</b>	Distância	Contagem progressiva do percurso conforme a definição do menor intervalo espacial e da dimensão da linha.
<b>B</b>	Limite de velocidade	Velocidade máxima permitida em cada intervalo espacial, conforme os dados da via e da operação do trem.
<b>C</b>	Aceleração Instantânea	Aceleração do trem em cada passo do percurso, mantendo o valor da aceleração máxima até atingir o limite de velocidade (parâmetro B) ou o limite de demanda (parâmetro J).
<b>D</b>	Tempo cinemático	Calcula o tempo transcorrido, conforme o avanço do movimento do trem desde o seu início. Nos intervalos com aceleração nula ou constante, aplica-se a Equação 1, no contrário aplica-se a Equação 17.
<b>E</b>	Velocidade Instantânea	Calcula a velocidade instantânea conforme a Equação 2.
<b>F</b>	Resistência Normal	Aplicação da Equação 7 a partir dos coeficientes da Equação de Davis (PIRES, 2013), os quais são calculados conforme as características técnicas do trem.
<b>G</b>	Resistência Total	Soma as resistências ao movimento do trem (Normal, Suplementares e Adicionais) conforme a Equação 6.
<b>H</b>	Esforço Motor	Calcula o esforço realizado pelo motor a partir da soma da Resistência Total com a Força Resultante do movimento, aplicando a Equação 16, derivada da Equação 13, uma vez que a força motora deve suprir a demanda energética para vencer as resistências ao movimento e produzir a força resultante necessária para movimentar o trem.



**30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

<b>I</b>	Força Resultante	Aplica a Segunda Lei de Newton, conforme a Equação 13.
<b>J</b>	Demanda Inst. C/ Regeneração	Consiste no produto do Esforço Motor com a Velocidade Instantânea, conforme Equação 14.
<b>K</b>	Resistência das Rampas	Calcula a resistência de cada rampa a partir da Equação 18.
<b>L</b>	Res. de Curvas	Aplica a Equação 9 e obtém o acréscimo de resistência em cada curva.
<b>M</b>	Resistências Adicionais	Nos trechos em que há túnel, aplica-se a Equação 10 estimando o fator túnel mais adequado.
<b>N</b>	Resistências Suplementares	Soma os resultados de K e L, conforme a Equação 8.
<b>O</b>	Demanda Instantânea Sem Regeneração	Multiplica os valores instantâneos do Esforço Motor e da Velocidade, nos instantes com aceleração nula ou constante. No contrário, é aplicado o produto dos valores instantâneos da velocidade pela diferença entre a força resultante e o esforço motor.
<b>P</b>	Pot. Instan. da Regeneração	Calcula a diferença entre os resultados dos parâmetros J e O.

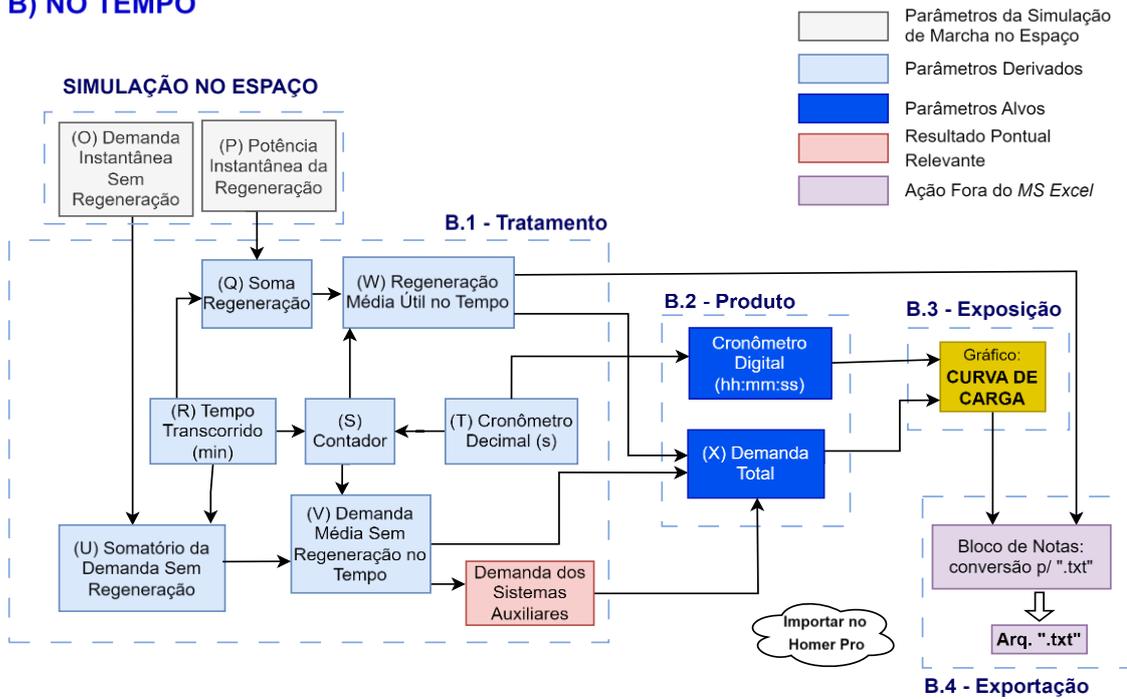
### 2.4.2. Simulação de Marcha no Tempo

O objetivo desta etapa é obter a curva de carga a ser importada pelo software *Homer Pro*, tendo como insumo os resultados da simulação no espaço. Os parâmetros utilizados estão na Tabela 2 e as interligações destes estão ilustradas no fluxograma da Figura 3.

**30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

**SIMULAÇÃO DE MARCHA**

**B) NO TEMPO**



**Figura 3 – Fluxograma para simulação de marcha no tempo**

**30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

**Tabela 2**

PARÂMETRO		DESCRIÇÃO
<b>Q</b>	Somatório da Regeneração	Para cada passo no tempo (1 segundo), todos os resultados do parâmetro P são somados a partir da subtração entre somatórios dos resultados de P correspondentes a dois intervalos consecutivos, cada um desses resulta da soma de todos os valores de P correspondentes aos resultados do parâmetro R menores que o valor do parâmetro T relacionado ao respectivo intervalo. Utiliza-se a função <i>somase</i> , para aplicar esses somatórios. Exemplo: “=SOMASE(\$R:\$R;"<="&T[i];\$P:\$P) – SOMASE(\$R:\$R;"<="&T[i-1];\$P:\$P)”.
<b>R</b>	Tempo Transcorrido (min)	Consiste na conversão dos resultados do Tempo Cinemático (parâmetro D) em minutos. Na prática, os resultados da contagem do tempo cinemático são divididos por 60 a cada passo da simulação.
<b>S</b>	Contador	Componente principal na conversão das referências espaço e tempo, por meio do qual é realizada a contagem da quantidade de intervalos do percurso (simulação no espaço) que estão contidos em cada passo da simulação no tempo. Para isso, é possível realizar a subtração entre as contagens, utilizando a função <i>cont.se</i> , dos resultados de R correspondentes a dois instantes consecutivos (parâmetro T), por exemplo :“=CONT.SE(\$R:\$R;"<="&T[i]) – CONT.SE(\$R:\$R;"<="&T[i-1])”.
<b>T</b>	Cronômetro Decimal	Faz-se neste parâmetro a contagem do tempo de forma periódica em segundos, do início da viagem ao seu término. Inicia-se com zero e prossegue-se a contagem com a soma de “1/60” após cada intervalo. Apenas para apresentação em gráfico, é realizado um cronômetro digital no formato hh:mm:ss em consonância com esse parâmetro.



**30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

<b>U</b>	Somatório de Demanda Sem Regeneração	Soma todos os resultados do parâmetro M contidos em cada intervalo. Para isso, faz-se a subtração entre somatórios dos resultados de M correspondentes a dois instantes consecutivos, onde cada um contém a soma de todos os resultados de M relacionados aos resultados de R o até o seu respectivo momento. Usa-se a função <i>somase</i> . Ex.: “=SOMASE(\$R:\$R;”<=”&T[i];\$M:\$M)-SOMASE(\$R:\$R;”<”&T[i-1];\$M:\$M)”.
<b>V</b>	Demanda Média Sem Regeneração no Tempo	Divide o resultado do parâmetro U pelo dado correspondente ao parâmetro S em cada intervalo. Geralmente é adotado um percentual adequado, aprox. 10%, da média dos resultados desse parâmetro para representar a demanda requisitada pelos sistemas auxiliares.
<b>W</b>	Regeneração Média Útil no Tempo	Em cada intervalo, é realizado o produto entre o rendimento da regeneração ( $\eta_{regen}$ ) e a divisão dos resultados dos parâmetros Q e S.
<b>X</b>	Demanda Total	Soma o resultado do parâmetro V com o total de demanda considerada para os sistemas auxiliares. Exporta-se o resultado (curva de carga) em formato “.txt”. Sugestão: usar o <i>software</i> Bloco de Notas como apoio.

## 2.5. Simulação Energética pelo Software *Homer Pro*

A execução das simulações energéticas pelo *Homer Pro* dá continuidade aos resultados da simulação de marcha. O primeiro passo trata da configuração preliminar deste software e prossegue com a inserção dos componentes, a execução da simulação e a extração dos

## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

resultados, como expõe o fluxograma da Figura 4. As etapas seguintes são o tratamento dos dados e a realização das análises.

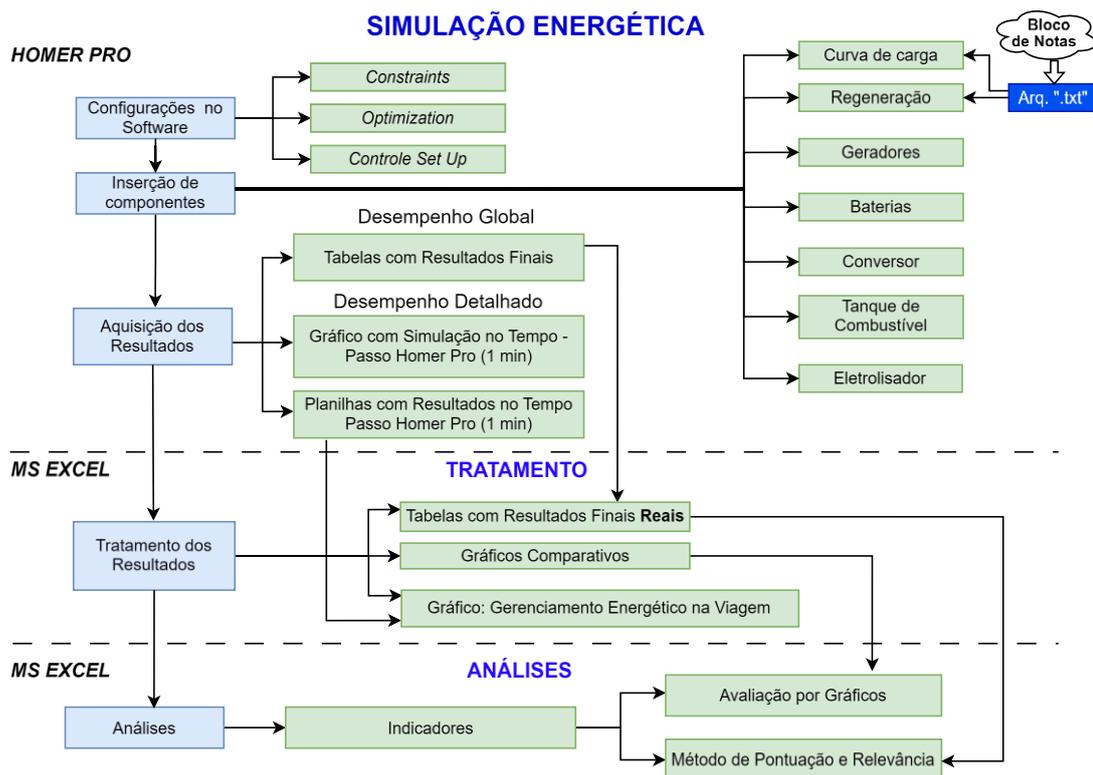


Figura 4 – Fluxograma para simulação energética, tratamento e análises



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

No *Homer Pro* as configurações do software para o cenário ferroviário são realizadas pela aba *"Project"* nos campos *"Constraints"* e *"Optimization"*. No primeiro, é zerada a informação *"Maximum annual capacity shortage"*, que representa o percentual máximo de escassez de energia, a fim de garantir a disponibilidade de energia durante a viagem. No segundo, é configurado o passo da simulação energética para o menor possível, 1 minuto, sendo necessária a realização de conversões na etapa de tratamento dos resultados para atender ao menor intervalo da curva de carga (no caso, 1 segundo). Além disso, é realizada a permissão de múltiplos geradores pelo sistema.

### **2.5.1. Inserção dos componentes do sistema de alimentação**

O sistema de alimentação pode ser composto por geradores, tanque(s) de combustível(is), bateria(s) e conversor(es). Nas simulações com o hidrogênio pode ser acrescentado um eletrolisador. Para o dimensionamento apropriado do sistema, há a necessidade da adição de uma curva de carga proveniente da simulação de marcha. Embora a tecnologia da frenagem



**30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

**Tabela 3**

<b>ITEM</b>	<b>MÉTODO DE INSERÇÃO</b>
Curva de carga (Simulação de marcha)	<i>LOAD</i> → <i>Electric 1</i> → Importa-se a curva de carga no formado .txt. Obs.: Configura-se a opção <i>Time step</i> para o menor possível, 1 minuto, e zerados todos os pontos não contemplados com os dados da curva mediante a opção <i>Method</i> .
Gerador	<i>COMPONENTS</i> → <i>Generator</i> → <i>Catalog</i> (escolher o tipo de gerador)
Tanque de combustível	<i>COMPONENTS</i> → <i>Hydrogen Tank</i> Necessário somente quando se utiliza hidrogênio e eletrolisador.
Bateria	<i>COMPONENTS</i> → <i>Storage</i> → <i>Catalog</i> (escolher o tipo de baterias) Obs.: A capacidade indicada na opção <i>throughput</i> (kWh) necessita ser multiplicada por 60 para a adequação dos resultados ao contexto ferroviário
Conversor	<i>COMPONENTS</i> → <i>Converter</i> → <i>Catalog</i> (escolher o tipo de conversor) Utiliza-se para trabalhar com diferentes tipos de correntes (AC e DC).
Eletrolisador	<i>COMPONENTS</i> → <i>Electrolyzer</i>
Regeneração	<i>COMPONENTS</i> → PV (analogia: frenagem regenerativa e irradiação solar em painéis fotovoltaicos) <i>RESOURCES</i> → <i>Solar DNI Resource</i> (importar curva de regeneração)
<i>Controller Set Up</i>	<i>COMPONENTS</i> → <i>Controller Set Up</i> → <i>Cycle Charging</i> Escolhe esse tipo de controle de despacho de energia para focar em redução de consumo de combustível e de emissões.



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

regenerativa atue com o sistema de tração, o seu efeito no âmbito energético é considerado no sistema de alimentação. Os componentes do sistema de alimentação são inseridos conforme aborda a Tabela 3.

#### **2.5.2. Tratamento dos Resultados**

Na aba *Electrical*, são obtidas as quantidades de energia elétrica produzidas por cada gerador e pelo sistema de regeneração adotado. Nas abas de cada gerador e de cada modelo de bateria são obtidos os valores de consumo e eficiência desses componentes, enquanto que na aba *Emissions* está a quantidade de  $CO_2$  emitidos durante a viagem. Devido às limitações do *Homer Pro* para o cenário ferroviário, alguns resultados necessitam de adaptações. Considerando o intervalo de tempo da curva de carga de 1 segundo, é realizada, com uso do *software MS Excel*, a redução para 1/60 de cada resultado atrelado ao tempo da viagem, como o consumo de combustível (L, kg ou  $m^3$ ), consumo de energia (kWh), energia produzida (kWh) e as emissões (kg).



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

#### **2.6. Realização das Análises**

O estudo analítico considera, preliminarmente, a disponibilidade e a viabilidade dos recursos propícios para atender a demanda da ferrovia na região, inclusive as condições da infraestrutura e da logística para o fornecimento a longo prazo.

As análises dos resultados das simulações de marcha e energética podem ser realizadas a partir de indicadores que expressam os impactos do uso de cada recurso. Quanto maior a quantidade de indicadores, maior é a riqueza de detalhes, porém pode acarretar em análises mais trabalhosas e com risco de perda de foco nos pontos mais importantes de uma avaliação.

Para colaborar na busca por resultados mais satisfatórios, é proposto o "Método de análise por pontuação e relevância", o qual quantitativamente auxilia a encontrar as soluções globais mais satisfatórias a partir do grau de relevância de cada indicador. A experiência prática e a bagagem teórica de profissionais e acadêmicos, nos temas de mobilidade ferroviária e de eficiência energética, contribuem na qualidade das avaliações.



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

#### **2.5.1. Levantamento de Indicadores**

A seleção dos indicadores depende de cada estudo de caso. Há indicadores mais sensíveis às características operacionais do trem e às configurações do sistema de alimentação, como o tempo da viagem e o fator de carga. Outros estão mais atrelados aos resultados das simulações energéticas, como a eficiência e o custo com combustível. Neste trabalho é dada atenção aos indicadores Fator de carga, Tempo da viagem, Consumo, Regeneração, Custo com combustível, Emissões de  $CO_2$ , Eficiência e Fator de capacidade.

#### **2.5.2. Método de Análise por Pontuação e Relevância**

Consiste em converter os resultados de cada indicador em pontuação de 0 a 10 conforme a faixa de valores obtidos nos resultados das simulações. A conversão é realizada de forma que as simulações com os melhores resultados absolutos resultem nas maiores pontuações, aplicando a Equação 19.



## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

$$Pontuação = 10 \cdot \left| \frac{Resultado - \text{Mínimo}}{Máximo - \text{Mínimo}} \right| \quad (19)$$

Uma vez realizada a conversão, calcula-se a Pontuação Global de cada simulação a partir da média ponderada dos resultados nos indicadores considerados, com a adoção de pesos, como apresenta a Equação 20. A distribuição dos pesos é realizada conforme o grau de relevância adotado para cada indicador, alinhada com as condições e interesses de cada projeto.

$$Pontuação Global = \frac{\sum_{k=1}^N (Pontuação_k \cdot Peso_k)}{\sum_{k=1}^N Peso_k} \quad (20)$$

Sendo:  $k$ , a indicação de um indicador;  $Pontuação_k$ , a pontuação da simulação no indicador  $k$ ;  $Peso_k$ , o valor que transmite o grau de relevância dada ao indicador  $k$  na análise, e  $N$  a quantidade de indicadores considerados na análise.

Na sequência, a partir da simulação melhor classificada na pontuação global, é possível encontrar o resultado que aponta tanto o recurso energético mais apropriado para atender ao projeto, quanto a melhor combinação: Via + Configuração do Sistema de alimentação +



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

Recurso Energético + Condições Operacionais + Modelo de trem. A classificação dos resultados também facilita chegar a conclusões alternativas por análises adicionais.

### **3. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

A aplicação da metodologia foi realizada tomando como caso de estudo o cenário do Serviço Expresso do Projeto Trens Intercidades - TIC Eixo Norte, desenvolvido pelo governo do estado de São Paulo para a conexão da capital paulista à cidade de Campinas via trens intercidades. Neste trabalho foram consideradas paradas apenas nas estações Água Branca (substituída posteriormente por Barra Funda - BFU), da cidade de São Paulo, Jundiaí e Campinas. Foi modelado um trem com 300 passageiros, composto por uma locomotiva e 4 carros para passageiros sentados (75 por carro), o qual foi simulado com diferentes limites de aceleração, velocidade e demanda energética.



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

A definição de viagem envolveu os deslocamentos de ida e volta do trem, com início e término em Campinas, resultando em um perfil altimétrico simétrico, proveniente de referências anteriores (BATISTA, 2024), em relação à estação de Água Branca.

#### **3.1. Modelagem do Trem**

As características básicas da operação nas simulações de marcha, do trem, dos carros, da locomotiva e do sistema de alimentação tomado como referência para a realização das simulações de marcha estão na tabela do APÊNDICE B. Foi considerado um modelo de trem com sistema de propulsão elétrica.

#### **3.2. Simulação de Marcha**

Foram realizadas 16 simulações de marcha, considerando tecnologia de frenagem regenerativa com capacidade de recuperar 70% da energia proveniente das frenagens (HOFFRICHTER, 2013) e resistências suplementares ao movimento resumidas nas



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

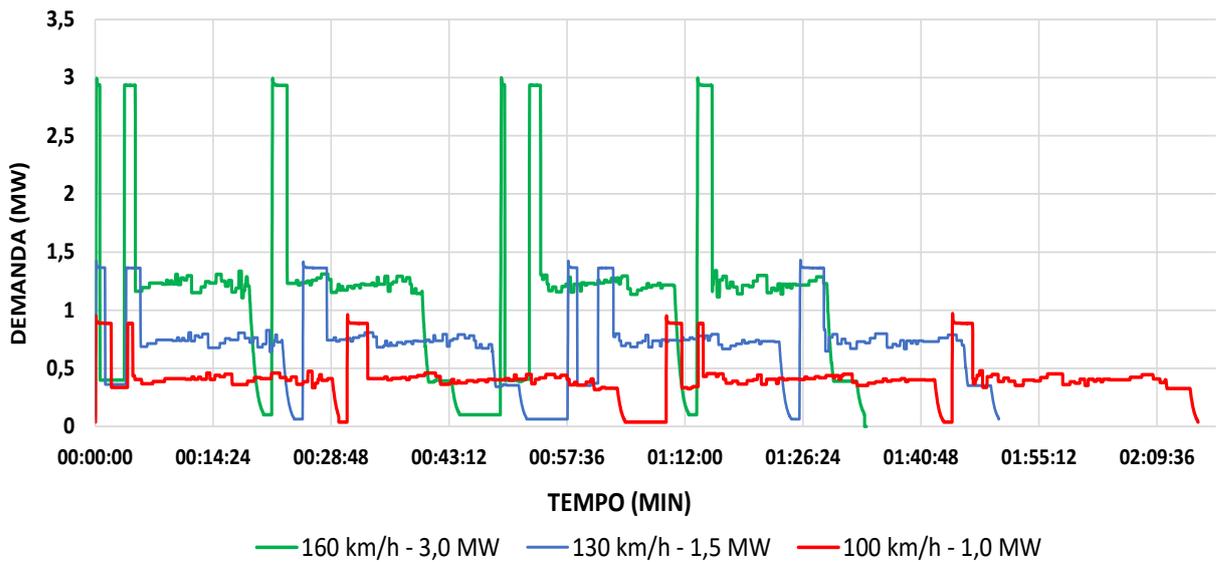
### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

proporcionadas pelas rampas. Os coeficientes da Equação de Davis calculados para a estimativa da resistência normal instantânea foram:  $A = 4,187889 \text{ N}$ ;  $B = 0,023091 \text{ N.h/km}$ ;  $C = 0,000679 \text{ N.h}^2/\text{km}^2$ .

Com essas 16 simulações de marcha foi possível a realização de análises de sensibilidade dos indicadores em relação aos parâmetros demanda máxima, aceleração máxima e velocidade máxima. O fator de carga e o tempo da viagem apresentaram alterações significativas e inversamente proporcionais à variação do limite de demanda. Foi constatado também que enquanto o tempo da viagem variou de forma inversamente proporcional à velocidade máxima, os resultados para o consumo e a regeneração aumentaram conforme o crescimento da velocidade máxima. Por outro lado, os indicadores não apresentaram influência significativa com a variação da aceleração máxima entre 0,9 e 1,2  $\text{m/s}^2$ . Com isso, foram selecionadas 5 curvas de cargas cujos resultados mais se

**30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

destacaram para avaliação nas simulações energéticas, a Figura 5 apresenta o exemplo de 3 dessas.



**Figura 5 – Exemplos de curvas de carga, produtos de simulações de marcha**



## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

### 3.3. Simulações Energéticas

As simulações energéticas foram realizadas a partir das 5 curvas de carga obtida das simulações de marcha. Os tipos de combustíveis considerados foram o diesel, o biodiesel, a mistura B20 (20% biodiesel e 80% diesel), o gás natural e o hidrogênio gasoso, cujas características básicas estão na Tabela 4 (BATISTA, 2024; HOFFRICHTER, 2013).

**Tabela 4**

COMBUSTÍVEL	UNIDADE	PREÇO (R\$/UNIDADE)	RELAÇÃO ENERGIA/MASSA (MJ/kg)	DENSIDADE (kg/m³)
DIESEL	L	6,85 R\$/L	43,20	820,0
MISTURA B20	L	6,90 R\$/L	40,00	845,00
BIODIESEL (B100)	L	7,10 R\$/L	37,20	872,00
GÁS NATURAL (GN)	m³	4,64 R\$/m³	40,00	845,00
HIDROGÊNIO (H2)	kg	46,78 R\$/kg	120,00	0,09

Com isso, conjuntos de 5 simulações energéticas diferentes foram realizadas para cada tipo de combustível, totalizando 25 simulações identificadas por S1 a S25, nas quais também foi utilizado um sistema de baterias como fonte auxiliar, conforme a Tabela 5. Foram observados os custos operacionais, a eficiência global, as emissões de  $CO_2$  e o fator de capacidade.

**30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

**Tabela 5**

Simulação	Limite Dem. (MW)	Pico Demanda Atingido (MW)	Vel. Máx. (km/h)	Recurso	Gerador		Banco Baterias (NEC 185 kW - 85 kWh)			Inversor Pot. (MW)	Pot. Inst. (MW)
					Principal (kW)	Aux. (kW)	Qtd. Baterias	Total Potência (kW)	Total Carga (kWh)		
S1	1	0,97	100	H <sub>2</sub>	500	-	3	555	255	1	1,055
S2	1	0,97	100	GN	500	-	4	740	340	1	1,240
S3	1	0,97	100	B100	500	-	4	740	340	1	1,240
S4	1	0,97	100	B20	500	-	4	740	340	1	1,240
S5	1	0,97	100	Diesel	500	-	4	740	340	1	1,240
S6	3	2,98	160	H <sub>2</sub>	1200	-	10	1850	850	3,4	3,050
S7	3	2,98	160	GN	750	750	9	1665	765	2	3,165
S8	3	2,98	160	B100	1360	-	9	1665	765	2	3,025
S9	3	2,98	160	B20	1360	-	9	1665	765	2	3,025
S10	3	2,98	160	Diesel	1360	-	9	1665	765	2	3,025
S11	1,5	1,41	100	H <sub>2</sub>	400	-	6	1110	510	1,5	1,510
S12	1,5	1,41	100	GN	500	-	5	925	425	1	1,425
S13	1,5	1,41	100	B100	500	-	5	925	425	1	1,425
S14	1,5	1,41	100	B20	500	-	5	925	425	1	1,425
S15	1,5	1,41	100	Diesel	500	-	5	925	425	1	1,425
S16	1,5	1,43	130	H <sub>2</sub>	700	-	4	740	340	2	1,440
S17	1,5	1,43	130	GN	750	-	4	740	340	1	1,490
S18	1,5	1,43	130	B100	910	-	3	555	255	1	1,465
S19	1,5	1,43	130	B20	910	-	3	555	255	1	1,465
S20	1,5	1,43	130	Diesel	910	-	3	555	255	1	1,465
S21	1,5	1,46	160	H <sub>2</sub>	1200	-	3	555	255	2	1,755
S22	1,5	1,46	160	GN	810	500	3	555	255	1	1,865
S23	1,5	1,46	160	B100	1360	-	3	555	255	1	1,915
S24	1,5	1,46	160	B20	1360	-	3	555	255	1	1,915
S25	1,5	1,46	160	Diesel	1360	-	3	555	255	1	1,915



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

Os geradores utilizados nas configurações do sistema de alimentação são modelos comerciais da empresa *Caterpillar*. Os baixos resultados de fator de carga (significativas distâncias entre os valores médio e pico de demanda) nas curvas de cargas das simulações S1 a S15 acarretaram no dimensionamento de sistemas de bateria com capacidade instalada superior à fonte principal. Devido ao pico de demanda e à capacidade do banco de baterias, a capacidade dos conversores utilizados nas simulações S6 a S10 foram superiores a maioria dos demais utilizados em outros cenários. Além disso, a maioria das simulações com uso de hidrogênio (S6, S11, S16 e S21) necessitaram de conversores maiores devido ao fato da tecnologia das células a combustível gerar energia em corrente contínua.

#### **3.4. Resultados das Simulações Energéticas**

Os resultados, para cada viagem, das 25 simulações referentes aos custos com combustível, à eficiência, às emissões de  $CO_2$  e ao fator de capacidade são apresentados na Tabela 6.

**30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

**Tabela 6**

Simulação	Vel. Máx.	Dem. Máx.	Recurso	Custo Combustível por Viagem (R\$)	Emissões de CO2 por Viagem (kg)	Emissões de CO2 por Viagem (kg) c/ <b>Captura de Carbono</b>	Eficiência (%)	Fator Capacidade
S1	100 km/h	3 MW	H2	2.294	0	0	56,3%	0,82
S2			GN	1.313	539	539	34,7%	0,82
S3			B100	1.828	633	158	39,7%	0,82
S4			B20	1.626	627	533	41,6%	0,82
S5			DIESEL	1.611	621	621	39,8%	0,82
S6	160 km/h	3 MW	H2	3.901	0	0	62,6%	0,92
S7			GN	2.209	905	905	38,9%	0,74
S8			B100	3.454	1.182	295	39,7%	0,82
S9			B20	3.071	1.160	986	41,6%	0,82
S10			DIESEL	3.043	1.142	1.142	39,8%	0,82
S11	100 km/h	1,5 MW	H2	2.119	0	0	61,2%	1,00
S12			GN	1.307	536	536	35,0%	0,83
S13			B100	1.825	632	158	39,9%	0,83
S14			B20	1.623	626	532	41,9%	0,83
S15			DIESEL	1.608	620	620	40,0%	0,83
S16	130 km/h	1,5 MW	H2	3.121	0	0	57,7%	1,00
S17			GN	1.766	724	724	36,0%	0,93
S18			B100	2.684	930	233	37,7%	0,77
S19			B20	2.387	921	783	39,6%	0,77
S20			DIESEL	2.365	912	912	37,8%	0,51
S21	160 km/h	1,5 MW	H2	4.211	0	0	56,2%	0,87
S22			GN	2.359	967	967	35,3%	0,79
S23			B100	3.495	1.196	299	38,0%	0,76
S24			B20	3.108	1.173	997	39,9%	0,76
S25			DIESEL	3.079	1.156	1.156	38,1%	0,76



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

#### **3.5. Análises das Simulações Energéticas**

As simulações com uso do hidrogênio se destacaram com maiores custos, conforme a Tabela 6. O uso do B100 também apresentou altos custos comparado aos outros 3 tipos de combustível. A mistura B20 e o diesel apresentaram custos semelhantes nos cenários simulados, o que está coerente com a alta proporção (80%) de diesel na composição do B20.

Por outro lado, as simulações com uso de gás natural apresentaram os menores custos operacionais. Também foi possível observar a redução dos custos com combustível conforme decresce o limite de velocidade, de forma que a velocidade limitada a 100 km/h resultou em menores custos. Tal fato está em conformidade com a Equação de Davis e se deve à participação da componente de arrasto do ar na equação da resistência Normal (PIRES, 2013). A tecnologia do hidrogênio se destacou significativamente nos resultados de eficiência, superando 56% e atingindo o máximo de 62,6% na simulação S6, com o trem a 160 km/h e



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

demanda máxima de 3 MW. As demais simulações apresentaram eficiências globais entre 34,7 % e 41,9 %, conforme mostra a Tabela 6.

Enquanto o hidrogênio não emite  $CO_2$  durante a conversão energética realizada pelas células a combustível, a Tabela 6 mostra que as simulações com biodiesel apresentaram resultados de emissões no ponto de uso muito próximos ao do diesel. Entretanto, ao considerar a captura de 75% de carbono com a plantação da matéria-prima do biodiesel (CORONADO, 2009), o saldo de emissões cai significativamente, de forma que o uso do diesel apresentou os piores resultados nas emissões. Somado a isso, o uso do gás natural resultou em valores intermediários, apontando-o como bom candidato para a substituição do diesel onde houver abundância deste gás.

Os fatores de capacidade obtidos, como apresenta a Tabela 6, demonstraram a influência da curva de carga na configuração do sistema da alimentação, uma vez que a capacidade dos geradores deve atender aos picos de demanda. A mudança de tipo de combustível no



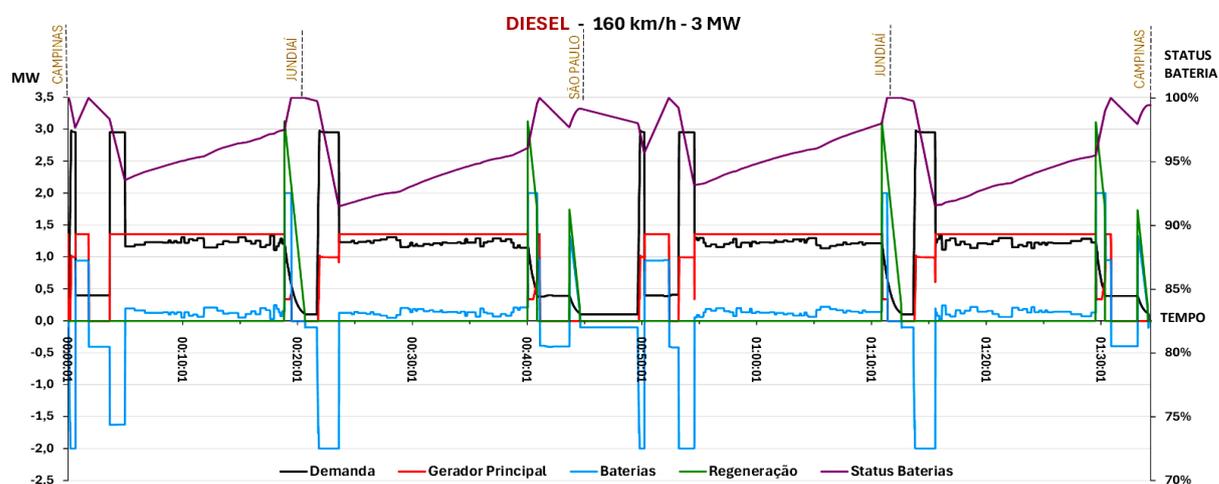
## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

conjunto de simulações com a mesma curva de carga geralmente não causou alteração nos resultados deste indicador. Devido às características das células a combustível, considerando a capacidade de atendimento constante à demanda energética durante a viagem, as simulações com o hidrogênio apresentaram os melhores resultados.

### **3.5.1. Gerenciamento Energético Durante a Viagem**

A dinâmica da contribuição energética instantânea de cada componente do sistema de alimentação ao longo da viagem pode ser estudada por gráfico, conforme o exemplo da Figura 6, obtido pelos resultados do *Homer Pro*. Com isso, é possível analisar diversos detalhes do desempenho do sistema de alimentação de um trem, como por exemplo, a atuação das baterias como fonte auxiliar nas acelerações, o aproveitamento da energia proveniente da regeneração nas frenagens e como os parâmetros demanda e velocidade máximas e o tipo de combustível forçam uma administração exata e assertiva da variação da carga das baterias.

## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



**Figura 6 – Exemplo de gerenciamento energético instantâneo durante uma viagem**

### 3.5.2. Aplicação do Método de Pontuação e Relevância

A Tabela 7 apresenta os pesos adotados, enquanto a Tabela 8 mostra os resultados do método de análise por pontuação e relevância a partir da classificação global. O melhor resultado apontado de forma imediata por este método é a simulação S11 ( $H_2$  - 100 km/h-1,5MW), a 1ª colocada no ranking global, conforme a Tabela 8. Classificada com a maior



## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

pontuação global (6,45), a S11 se destacou bastante em 4 dos 8 indicadores, nos quais resultou na 1ª ou 2ª colocação: emissões de  $CO_2$  com captura de carbono, eficiência, fator de capacidade e consumo. Por outro lado, apresentou piores pontuações nos indicadores fator de carga, tempo da viagem e regeneração. Sobretudo, embora não se destaque no custo com combustível (indicador mais relevante), essa simulação se posicionou acima da média, na 10ª colocação no ranking desse indicador.

**Tabela 7**

Indicador	Peso
Fator de Carga	5
Tempo de viagem	6
Consumo	8
Regeneração	2
Custo com combustível	10
Emissões de $CO_2$ com captura de carbono (C)	4
Eficiência	6
Fator de capacidade	4

## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

### 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

**Tabela 8**

CLASSIFICAÇÃO DAS SIMULAÇÕES																					
GLOBAL			CENÁRIO			SIMULAÇÃO DE MARCHA								SIMULAÇÃO DE ENERGÉTICA							
Ranking	Pontuação	Simulação	Vel. Máx. (km/h)	Dem. Máx. (MW)	Recurso	Fator de Carga		Tempo da Viagem		Consumo		Regeneração		Custo com Combustível		Emissões de CO <sub>2</sub> com Captura de C		Eficiência		Fator de Capacidade	
						Ran.	Pont.	Ran.	Pont.	Ran.	Pont.	Ran.	Pont.	Ran.	Pont.	Ran.	Pont.	Ran.	Pont.	Ran.	Pont.
1	6,45	S11	100	1,5	H2	5ª	0,00	4ª	0,16	2ª	9,96	4ª	0,17	10ª	7,20	1ª	10,00	2ª	9,51	1ª	10,00
2	6,28	S3	100	1	B100	1ª	10,00	5ª	0,00	1ª	10,00	5ª	0,00	9ª	8,21	3ª	8,63	14ª	1,80	7ª	6,31
3	6,24	S4	100	1	B20	1ª	10,00	5ª	0,00	1ª	10,00	5ª	0,00	6ª	8,90	8ª	5,39	7ª	2,50	7ª	6,31
4	6,14	S2	100	1	GN	1ª	10,00	5ª	0,00	1ª	10,00	5ª	0,00	2ª	9,98	10ª	5,34	25ª	0,00	7ª	6,31
5	6,13	S1	100	1	H2	1ª	10,00	5ª	0,00	1ª	10,00	5ª	0,00	21ª	3,40	1ª	10,00	4ª	7,76	7ª	6,31
6	6,10	S5	100	1	DIESEL	1ª	10,00	5ª	0,00	1ª	10,00	5ª	0,00	4ª	8,95	12ª	4,63	13ª	1,84	7ª	6,31
7	6,05	S16	130	1,5	H2	3ª	3,26	3ª	6,00	3ª	5,55	3ª	4,53	20ª	3,75	1ª	10,00	3ª	8,24	2ª	9,93
8	5,38	S17	130	1,5	GN	3ª	3,26	3ª	6,00	3ª	5,55	3ª	4,53	7ª	8,42	13ª	3,74	22ª	0,47	3ª	8,61
9	5,22	S13	100	1,5	B100	5ª	0,00	4ª	0,16	2ª	9,96	4ª	0,17	8ª	8,22	2ª	8,63	10ª	1,88	6ª	6,46
10	5,18	S14	100	1,5	B20	5ª	0,00	4ª	0,16	2ª	9,96	4ª	0,17	5ª	8,91	7ª	5,40	6ª	2,58	6ª	6,46
11	5,13	S6	160	3	H2	4ª	1,31	1ª	10,00	5ª	0,00	1ª	10,00	24ª	1,07	1ª	10,00	1ª	10,00	4ª	8,44
12	5,12	S21	160	1,5	H2	2ª	6,99	2ª	9,21	4ª	0,67	2ª	9,99	25ª	0,00	1ª	10,00	5ª	7,70	5ª	7,24
13	5,09	S12	100	1,5	GN	5ª	0,00	4ª	0,16	2ª	9,96	4ª	0,17	1ª	10,00	9ª	5,36	24ª	0,10	6ª	6,46
14	5,03	S15	100	1,5	DIESEL	5ª	0,00	4ª	0,16	2ª	9,96	4ª	0,17	3ª	8,96	11ª	4,64	9ª	1,92	6ª	6,46
15	4,84	S18	130	1,5	B100	3ª	3,26	3ª	6,00	3ª	5,55	3ª	4,53	15ª	5,26	4ª	7,99	21ª	1,10	10ª	5,23
16	4,73	S19	130	1,5	B20	3ª	3,26	3ª	6,00	3ª	5,55	3ª	4,53	14ª	6,28	14ª	3,23	16ª	1,76	10ª	5,23
17	4,67	S22	160	1,5	GN	2ª	6,99	2ª	9,21	4ª	0,67	2ª	9,99	12ª	6,38	17ª	1,63	23ª	0,23	9ª	5,74
18	4,39	S23	160	1,5	B100	2ª	6,99	2ª	9,21	4ª	0,67	2ª	9,99	23ª	2,47	6ª	7,41	19ª	1,19	11ª	5,14
19	4,26	S7	160	3	GN	4ª	1,31	1ª	10,00	5ª	0,00	1ª	10,00	11ª	6,89	15ª	2,17	17ª	1,53	12ª	4,64
20	4,24	S24	160	1,5	B20	2ª	6,99	2ª	9,21	4ª	0,67	2ª	9,99	19ª	3,80	19ª	1,37	11ª	1,86	11ª	5,14
21	4,10	S20	130	1,5	DIESEL	3ª	3,26	3ª	6,00	3ª	5,55	3ª	4,53	13ª	6,36	16ª	2,11	20ª	1,14	13ª	0,00
22	4,05	S25	160	1,5	DIESEL	2ª	6,99	2ª	9,21	4ª	0,67	2ª	9,99	18ª	3,90	21ª	0,00	18ª	1,23	11ª	5,14
23	3,96	S8	160	3	B100	4ª	1,31	1ª	10,00	5ª	0,00	1ª	10,00	22ª	2,61	5ª	7,44	15ª	1,80	8ª	6,20
24	3,81	S9	160	3	B20	4ª	1,31	1ª	10,00	5ª	0,00	1ª	10,00	17ª	3,93	18ª	1,47	8ª	2,50	8ª	6,20
25	3,62	S10	160	3	DIESEL	4ª	1,31	1ª	10,00	5ª	0,00	1ª	10,00	16ª	4,02	20ª	0,12	12ª	1,84	8ª	6,20

\* Pontuação Global: em azul os resultados igual ou acima da média, em vermelho aqueles abaixo da média.

\* Classificação nos indicadores: mais amarelo, melhor classificação; mais avermelhado, pior classificação.

\* As abreviações Ran. e Pont. referem-se às palavras "Ranking" e "Pontuação", respectivamente.

Melhor classificação  Pior classificação



## **30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**

### **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

Adicionalmente e ainda se apropriando da Tabela 8, considerando apenas as simulações acima da média global, desprezando aquelas com hidrogênio e com velocidade máxima de 100 km/h, é possível chegar na simulação S17 (*GN* - 130km/h-1,5MW) como a mais apropriada. Em outra análise, agora desconsiderando os recursos gás natural, B100 e hidrogênio, além da velocidade máxima de 100 km/h, o resultado indicaria a simulação S19 (*B20* - 130km/h-1,5MW) como a mais propícia para a implantação. Isso mostra que mesmo sem alterar a distribuição dos pesos, é possível utilizar a tabela de resultados do método de análise por pontuação e relevância para chegar a distintas conclusões que podem ser mais adequadas para um cenário real devido ao uso de novas considerações mais atualizadas e aplicáveis.

#### **3.5.3. TIC Real e o TIC Simulado**

Nas principais comparações entre as características reais e simuladas, conforme mostra a Tabela 9, é possível notar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida, considerando as devidas proporções e o fato de ter sido utilizado um valor conservativo para a quantidade de



## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

passageiros perante as dimensões utilizadas para os carros. Vale lembrar que a simulação considerou a versão de 2019 do TIC, onde ainda cogitava a estação de Água Branca (ABR) como parada na capital.

**Tabela 9**

	<b>TIC Real</b>	<b>TIC Simulado</b>
Estações	BFU, JUN, CAM	ABR, JUN, CAM
Percurso ida/volta (km)	101	102
Quantidade Passageiros	860	300
Comprimento Trem (m)	300	111,6
Largura Trem (m)	3,3	3,1
Máximo Carga por Eixo (t)	18	10,1
Velocidade Máxima (km/h)	140	100, 130, 160
Duração da viagem (hh:mm)	01:04	01:07, 00:54, 00:47

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho contou com características técnicas e operacionais de uma via, concluindo com a indicação de opções mais favoráveis para alimentar um modelo de um trem. A metodologia



## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

também levou à constatação dos combustíveis mais dispendiosos, outros mais poluentes e outros menos eficientes, conforme apresenta a Figura 6.

▪ Eficientes:	GN; B100; DIESEL; B20; H <sub>2</sub>
▪ Econômicos:	H <sub>2</sub> ; B100; GN; B20; DIESEL
▪ Menos poluidores (CO <sub>2</sub> ):	DIESEL; B20; GN; B100; H <sub>2</sub>

**Figura 6 – Resultado da comparação entre os recursos estudados**

Com uma quantidade significativa de 25 simulações, foi aplicado o método de análise por pontuação e relevância, cujo resultado imediato apontou a simulação S11 (H<sub>2</sub> - 100km/h-1,5MW) como a opção mais favorável, enquanto análises adicionais indicaram as configurações das simulações S17 (GN - 130km/h-1,5MW) e S19 (B20 - 130km/h-1,5MW) para uma aplicação real, considerando uma distribuição de relevâncias para 8 indicadores.

Esta metodologia tem importante utilidade nos planejamentos de expansão da malha ferroviária brasileira. A sua aplicação está em consonância com os esforços para uma transição energética com o aumento de eficiência e a redução de emissões de CO<sub>2</sub>, bem como está apta



## 30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

para os estudos das futuras conexões ferroviárias brasileiras (RJ - SP, São Paulo - Sorocaba, São Paulo - Santos, São Paulo - São José dos Campos, entre outras).

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BATISTA, André Heleno. **Metodologia para avaliação de soluções energéticas híbridas para transporte sobre trilhos**: caso do TIC São Paulo-Campinas. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

CORONADO, C. R.; de Carvalho, J. A.; SILVEIRA, J. L. **Biodiesel CO<sub>2</sub> emissions: A comparison with the main fuels in the brazilian market**. *Fuel Processing Technology*, El Servier 2009.

HOFFRICHTER, A. **Hydrogen as an energy carrier for railway traction**. 2013. *Thesis (Doctor of Philosophy)* - University of Birmingham, Birmingham, 2013.

HOMER ENERGY. **Homer Pro**. 2024. Disponível em: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>. Acesso em: 05 ago. 2024.

PIRES, C. L, **Engenharia elétrica ferroviária e metroviária**. São Paulo: LTC, 2013, v.1

**30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

**APÊNDICE A**

**Tabela 10**

1) $t_{final} = t_{inicial} + \Delta S/v(t)$	9) $R_{curva} = \frac{500 \cdot b}{\rho}$
2) $v_{final} = v_{inicial} + a_{final} \cdot \Delta t$	10) $R_{adicionais} = C_t \cdot C \cdot v^2$
3) $S_{final} = S_{inicial} + v_{inicial} \cdot t + \frac{1}{2} a t^2$	11) $m'_{trem} = m_{trem} \cdot \xi$
4) $v_{final}^2 = v_{inicial}^2 + 2a\Delta S$	12) $\sum_{j=1}^n F_j = m'_{trem} \cdot a$
5) $a = \Delta v/\Delta t$	13) $F_{motor} - R = m'_{trem} \cdot a$
6) $R = R_{normal} + R_{suplementares} + R_{adicionais}$	14) $P_{mec} = F_{motor} \cdot v$
7) $R_{normal} = A + B \cdot v + C \cdot v^2$	15) $P_{el} = \frac{P_t}{\eta_b}$
8) $R_{suplementares} = R_{curva} + R_{rampa}$	16) $F_{motor} = m'_{trem} \cdot a + R$
17) $t_{final} = t_{inicial} + \left( \sqrt{v_{inicial}^2 + 2 \cdot a \cdot (s - s_{inicial})} - v_{inicial} \right) \cdot \frac{1}{a_{inicial}}$	
18) $R_{rampa} = \left( \frac{\Delta S}{L_{trem}} \right) \cdot \tan(\theta_{rampa}) \cdot m_{trem} \cdot g \cdot 10^3$	

Consultar as referências Pires (2013) e Batista (2024) para mais detalhes destas equações.

**30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

**APÊNDICE B**

**Tabela 11**

<b>Característica</b>		<b>Valor</b>
Operação	Limite de velocidade no percurso (km/h)	160
	Limite de velocidade no trecho urbano (km/h)	90
	Comprimento do trecho urbano - em São Paulo e Campinas (km)	5
	Intervalo na estação Jundiaí (s)	60
	Intervalo na estação Água Branca (São Paulo) (s)	300
Trem completo	Total composições (locomotivas+carros)	5
	Quantidade de passageiros por trem	300
	Altura carro (m)	3,58
	Largura carro (m)	3,1
	Massa trem cheio (t)	252,82
	Intervalo entre carros (m)	0,70
	Comprimento trem (m)	111,55
	Seção transversal (m <sup>2</sup> )	11,08
Perímetro (m)	229,30	
Carros de passageiro	Quantidade de carros para passageiros	4
	Massa carro vazio (t)	33,5
	Massa passageiro (t)	0,070
	Massa carro cheio (t)	40,30
	Quantidade de passageiros por carro	75
	Comprimento carro (m)	21,75
	Quantidade de truques por carro	2
	Quantidade de eixos por carro	4
	Massa por eixo por carro (t)	10,08
	Peso carro (kN)	394,94



**30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA**  
**11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

	Demanda máxima adotada	2500
	Coeficiente de arrasto	1,05
	Coeficiente de inércia - carro	1,04
	Constante aerodinâmica k1 (Totten)	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Locomotivas	Quantidade de locomotivas	1
	Massa locomotiva vazia (t)	33,5
	Massa locomotiva com sistema de alimentação (t)	91,62
	Comprimento da locomotiva (m)	21,75
	Quantidade de truques por locomotiva	2
	Quantidade de eixos locomotiva	4
	Massa por eixo por locomotiva (t)	22,91
	Peso locomotiva (kN)	897,92
	Coeficiente de Arrasto	1,05
	Coeficiente de inércia locomotiva	1,30
	Constante aerodinâmica k1 (Totten)	0,00046
Sistema de alimentação (referência)	Massa Sistema de Alimentação (t)	36,98
	Gerador – Potência (kW)	2500
	Gerador – Fabricante	Caterpillar
	Gerador – Modelo	CAT 3516E
	Gerador – Massa (t)	18,48
	Gerador – Combustível	Diesel
	Bateria – Fabricante	Toshiba
	Bateria – Modelo	SCiB
	Bateria – Carga (kWh)	60
	Bateria – Massa (t)	1,85
	Banco de Baterias – Quantidade de baterias	10

Observações: a unidade de medida "t" refere-se à tonelada (1t = 1000 kg); os valores da tabela referem-se aos adotados no estudo de caso (capítulo 3 deste trabalho).