

14 a 17
setembro
2021

27ª SEMANA DE TECNOLOGIA
METROFERROVIÁRIA

TRILHOS PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE SUBESTAÇÕES INVERSORAS POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Ruan Streitenberger Guedes

Jean Marco Rodrigues Fini

Carlos Alberto de Sousa

REALIZAÇÃO



ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE METRÔ



14 a 17
setembro
2021

27ª SEMANA DE TECNOLOGIA
METROFERROVIÁRIA

TRILHOS PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL

RUAN STREITENBERGER GUEDES

- Engenheiro Especializado da Coordenadoria de Estudos e Plan. da Manutenção de Equip. Fixos Elétricos e Eletromecânicos, na Gerência de Manutenção do Metrô-SP
- Trabalhou na manutenção do Material Rodante e Gerência de Projetos do Metrô-SP
- cursou Pós Graduação em Eficiência Energética no Senai/SP com extensão na RWTH Aachen University na Alemanha
- Atualmente cursando mestrado em Engenharia Elétrica na área de concentração de Sistemas de Potência na Escola Politécnica da USP – EPUSP

REALIZAÇÃO

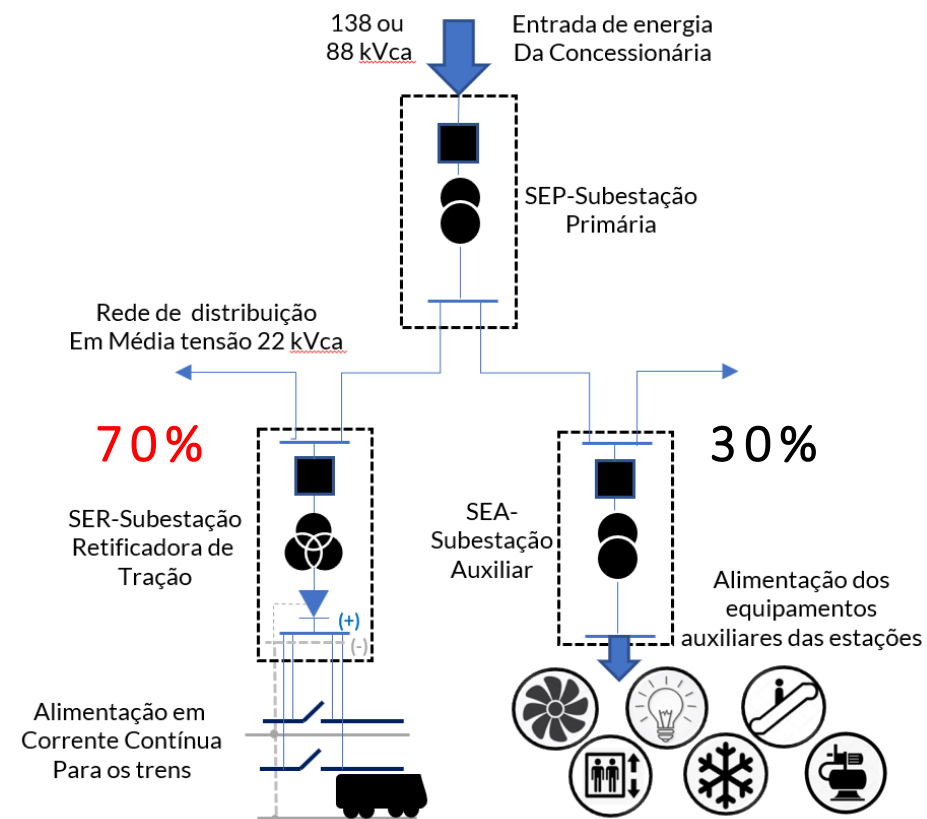


ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE METRÔ

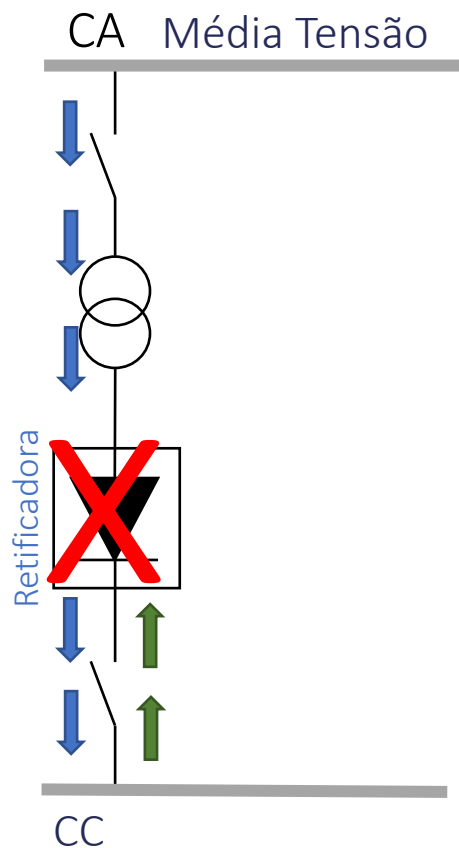


- Trabalho voltado para eficiência energética no sistema de tração;
- O Metrô-SP é um grande consumidor de energia elétrica;
- Energia consumida pela tração dos trens é representativa, por volta de 70%
- Em 2019 o Metrô consumiu:
 - 477 GWh;
 - 330 GWh no sistema de tração;
 - R\$ 227 milhões em termos de custo;
- Redução do consumo de energia na tração:

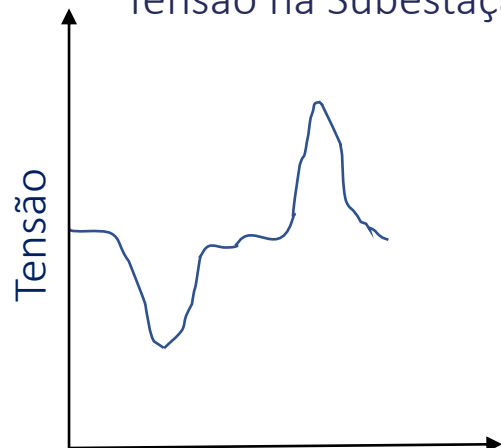
Uso eficaz e maior reaproveitamento da energia da frenagem regenerativa!!



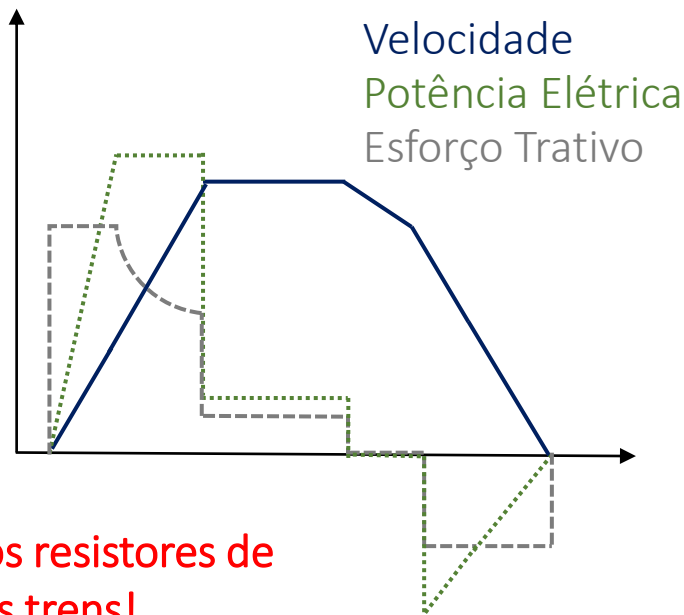
Ciclo de Tração



Comportamento Tensão na Subestação



Comportamento Trem



Parada na Estação

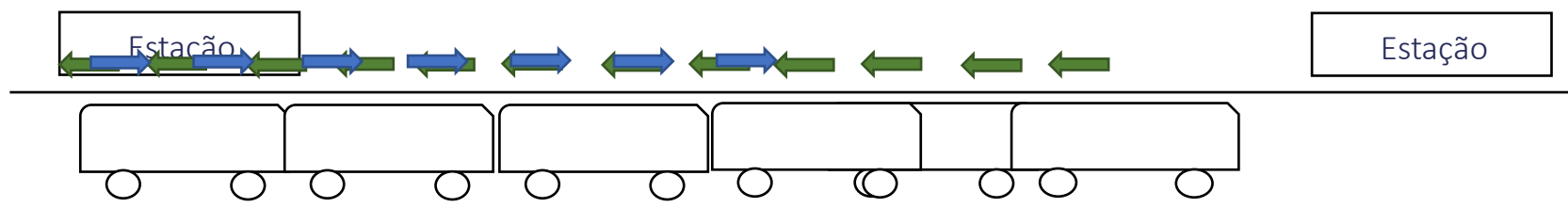
Aceleração

Regime (Cruising)

Deslizamento (Coasting)

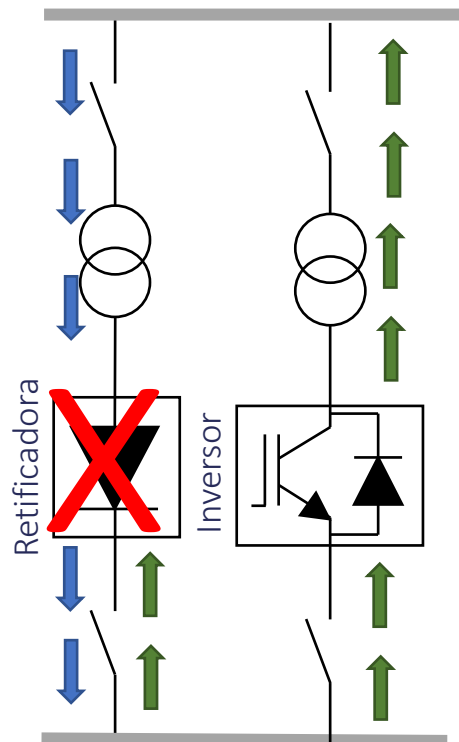
Frenagem

Energia dissipada nos resistores de frenagem dos trens!



INTRODUÇÃO

CA Média Tensão



Tensão
Te



éfrica
ivo

Parada na
Estação

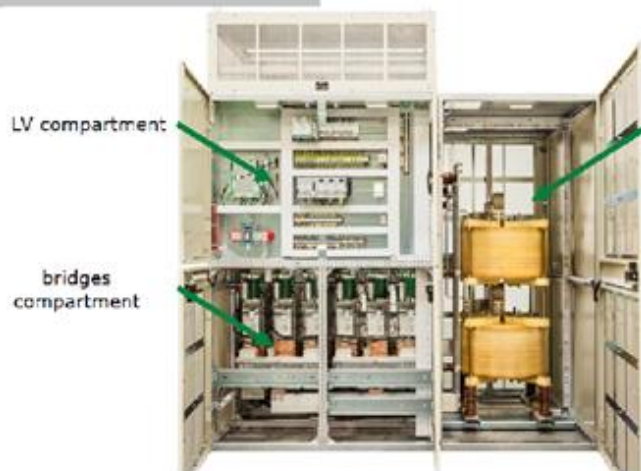
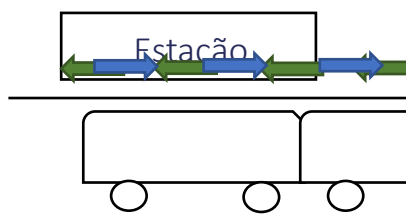
Aceleração

Regime
(Cruising)

Deslizamento
(Coasting)

Frenagem

CC



ção

Objetivo

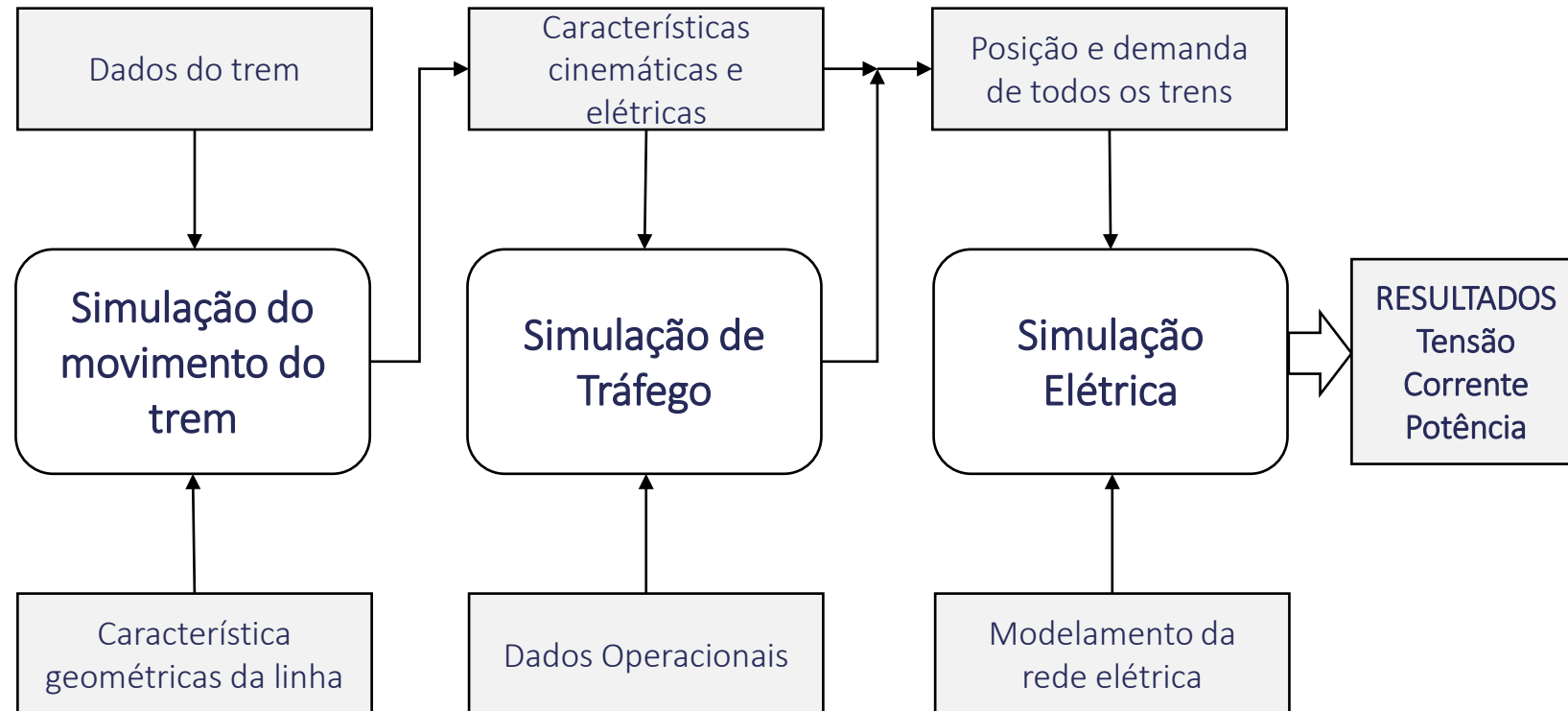
- Estudar e avaliar a aplicação de um Inversor para o sistema de tração na Linha 1- Azul;

Como?

- Desenvolvimento de uma ferramenta de simulação do sistema de tração elétrica: modelamento de trens, tráfego e rede de tração;
- Cálculo do fluxo de energia em diferentes cenários;



Simulação do Sistema de Tração



Modelamento do Movimento do Trem

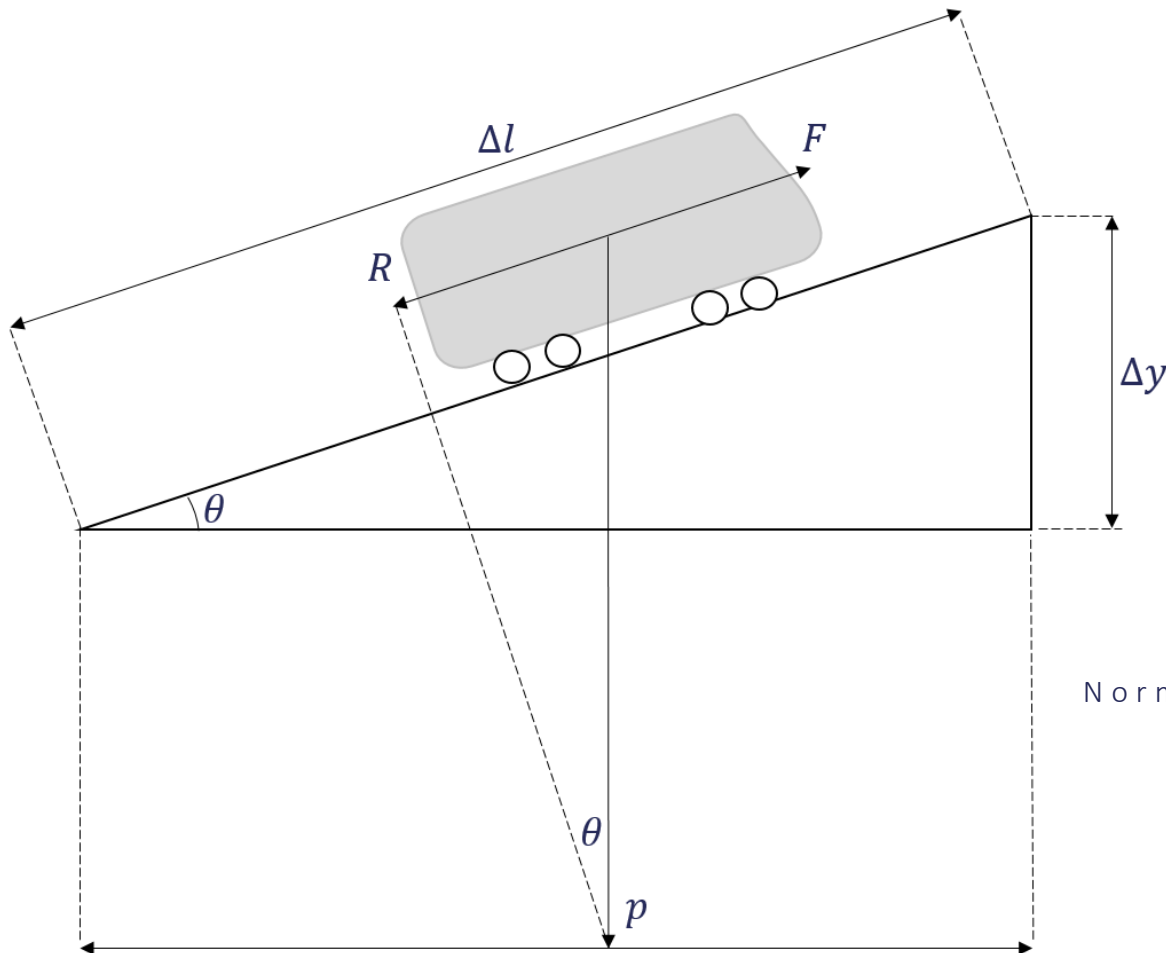
2ª Lei de Newton

$$F = m * a$$

$$F_m - (R_N + R_i + R_c) = m' * a$$

Normais ao movimento $\Rightarrow m' = m_t * (1 + \xi) + m_{pax}$ Curvas

$$\Rightarrow R_N = A + B * v_t + C * v_t^2 * ftun$$



Cálculo dos parâmetros cinemáticos e elétricos

- Velocidade do trem

$$V_{t_{i+1}} = V_{t_i} + \Delta t * \frac{F_u(t_i, v_{t_i})}{m'}$$

- Posição e espaço percorrido

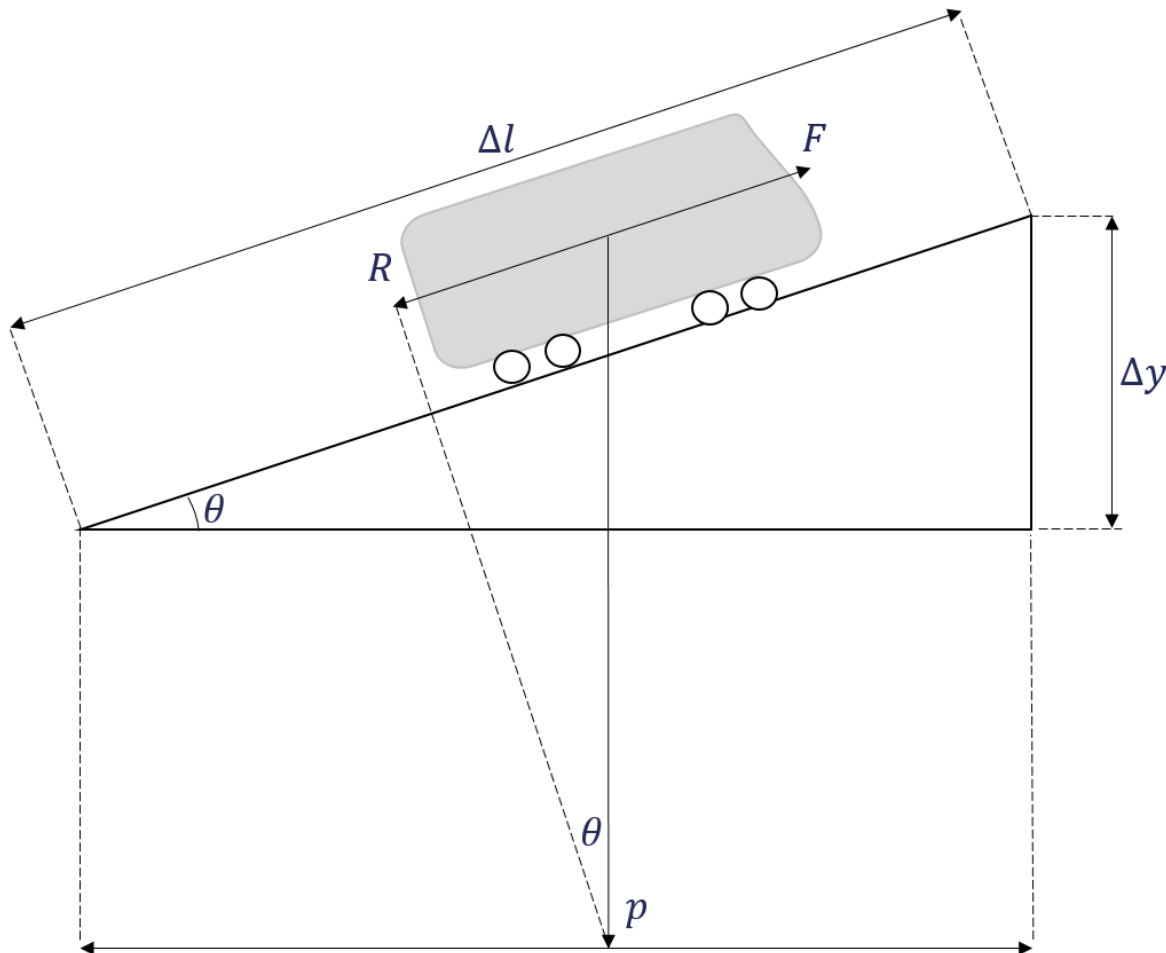
$$S_{i+1} = S_i + \Delta t * \frac{V_{i+1} + V_i}{2}$$

- Potência Mecânica

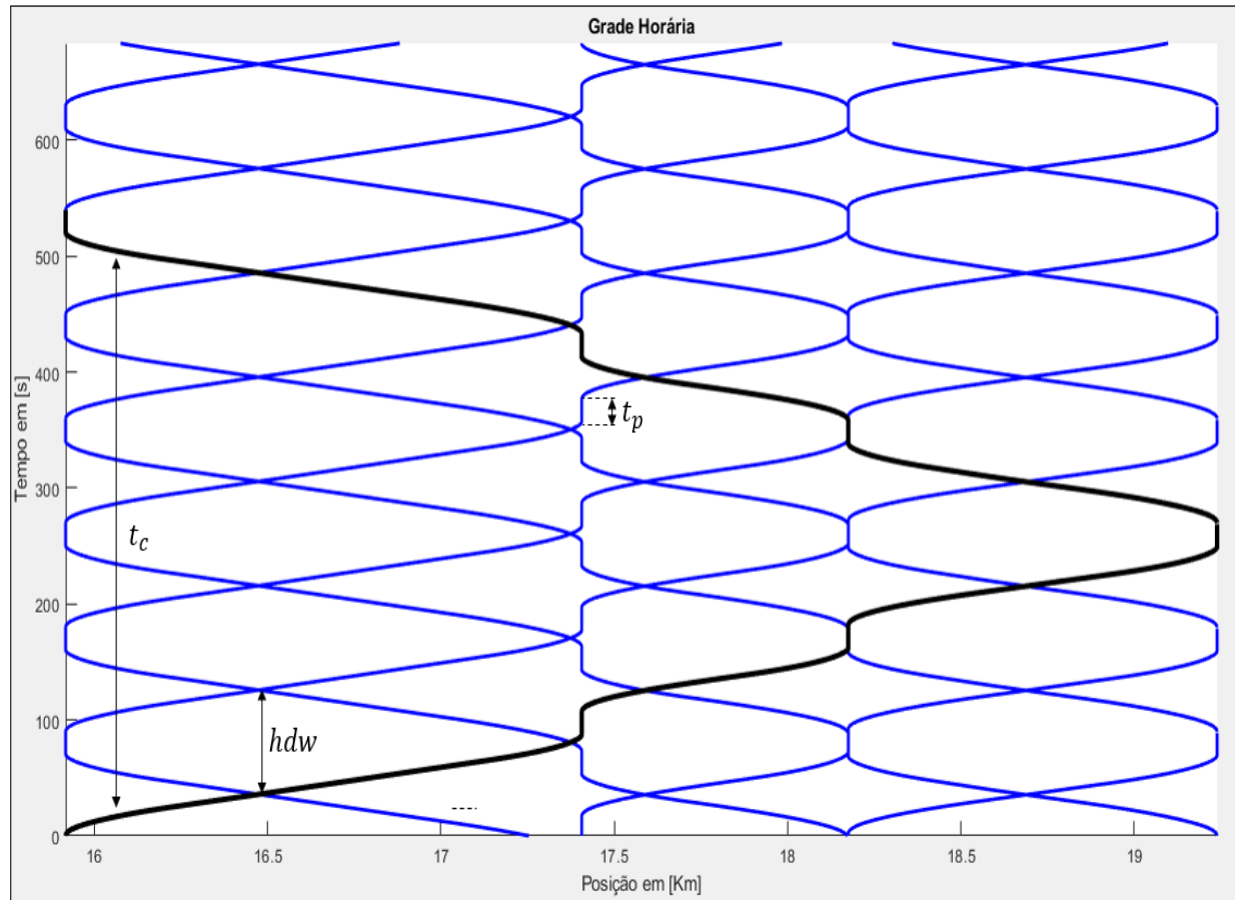
$$P_{mec} = \frac{F_m * V_t}{3,6}$$

- Potência Elétrica

$$P_{ele} = \frac{P_{mec}}{\eta_b} + P_{aux}$$



Simulação de Tráfego



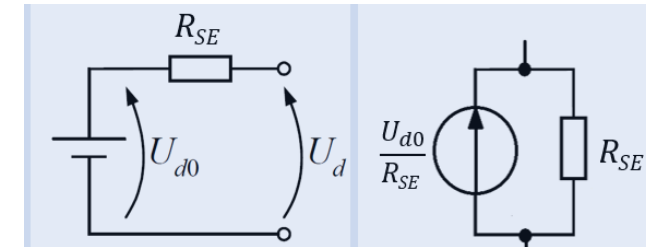
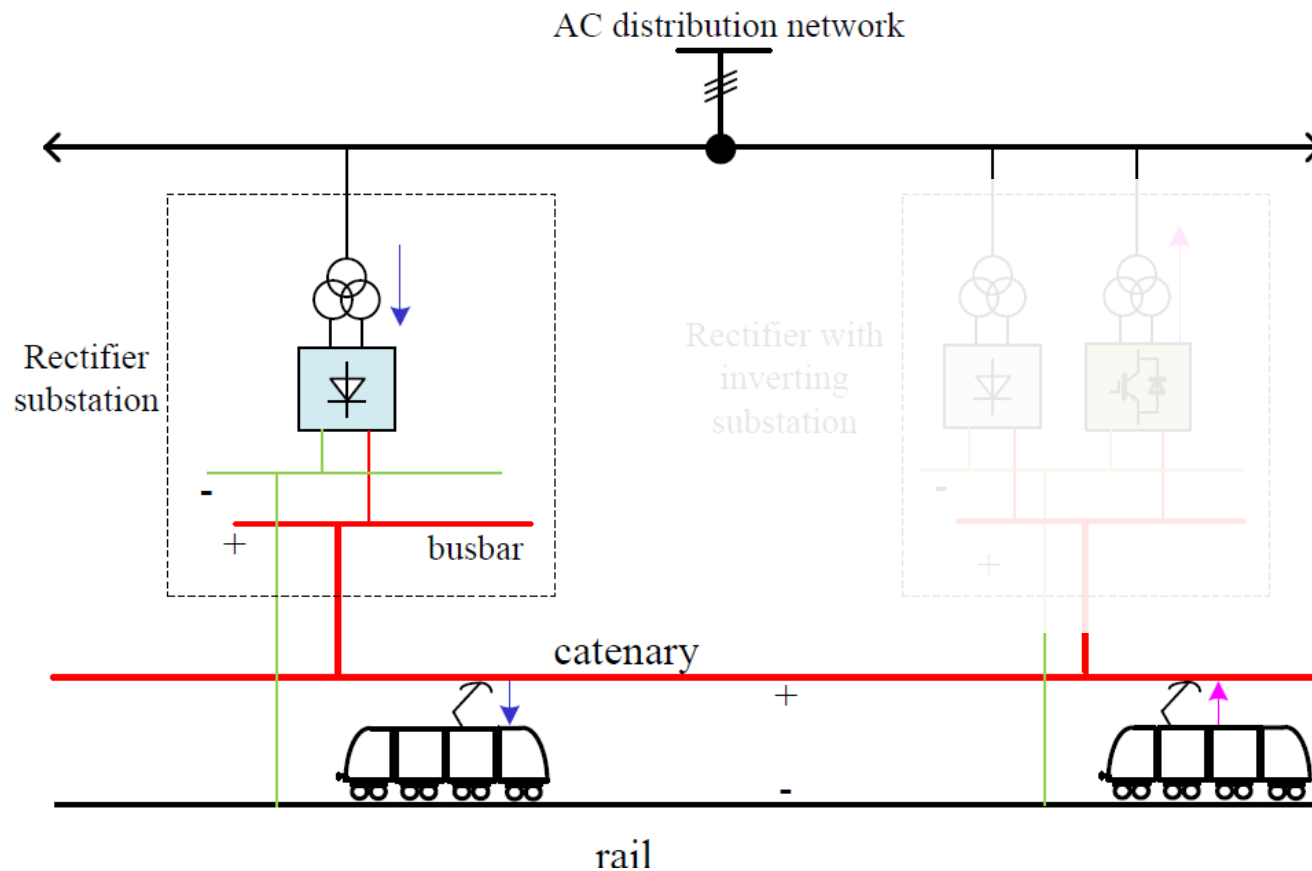
Monta grade horária com a posição dos trens de acordo com:

- Intervalo entre trens-Headway(hdw);
- Tempo de parada nas estações(t_p);
- Tempo de ciclo(t_c);

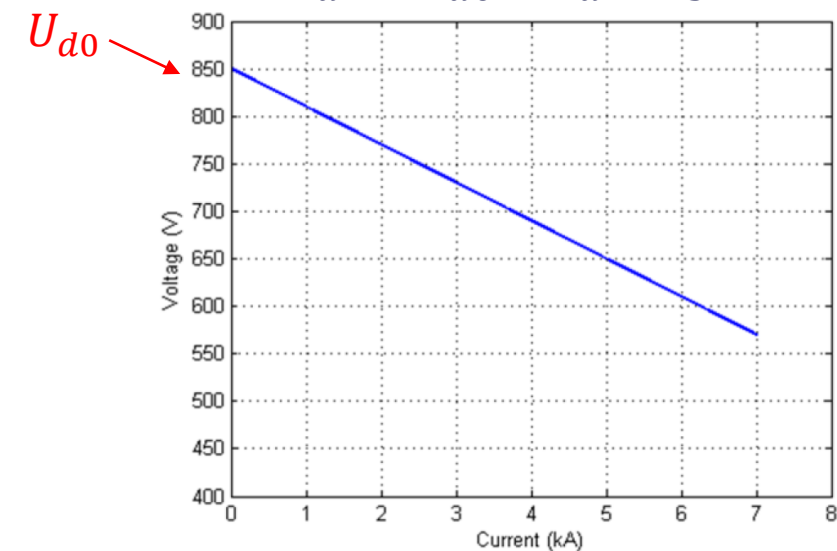
Simulação Elétrica

Modelamento da rede elétrica

- Subestação Retificadora



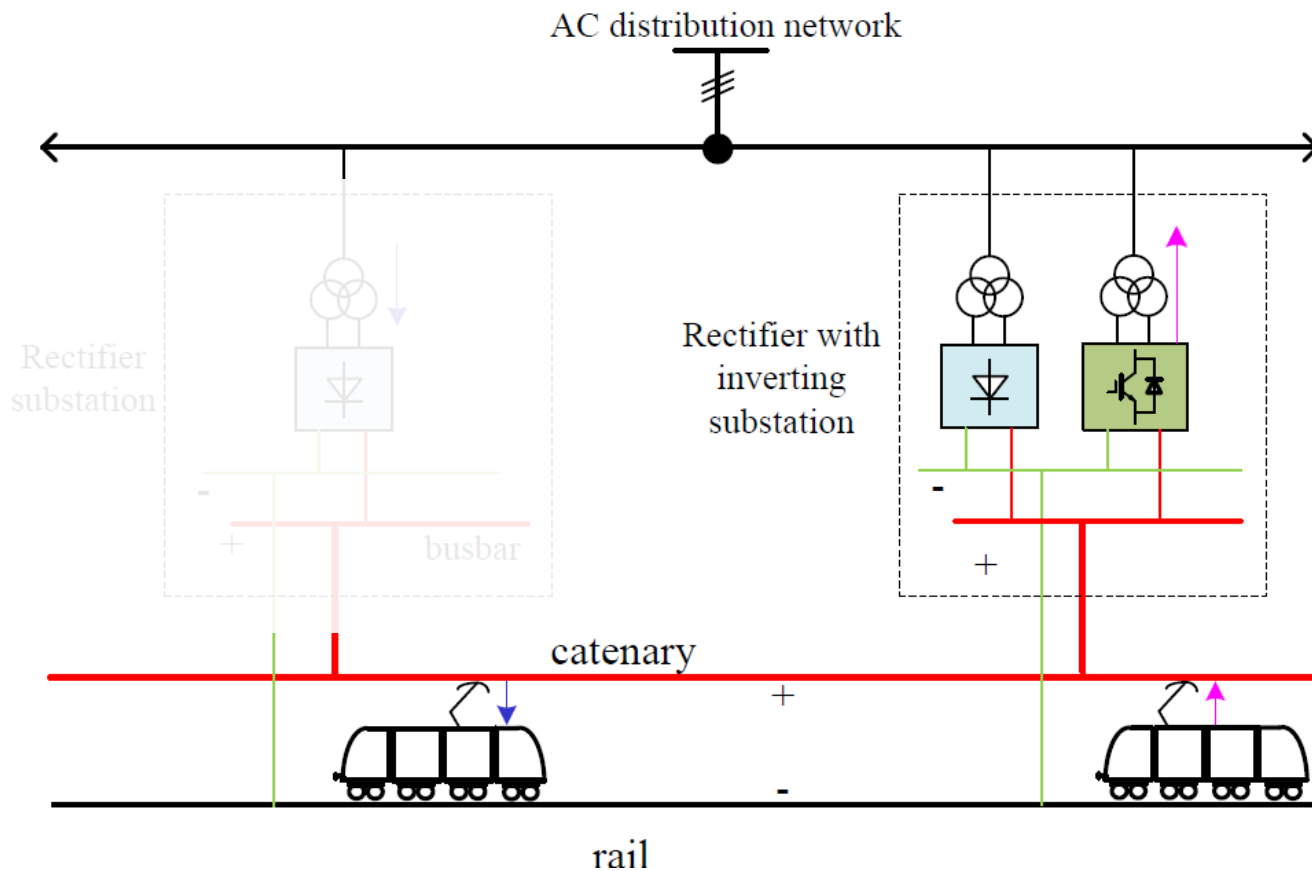
$$U_d = U_{d0} - I_d * R_{SE}$$



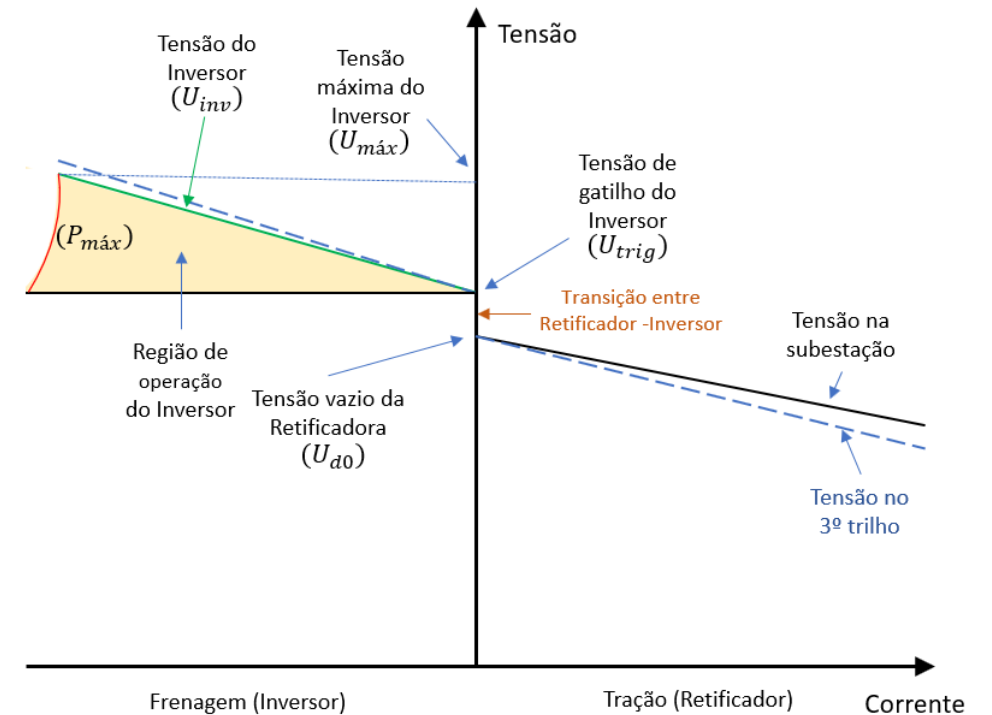
Fonte: (TIAN, ZHANG, *et al.*, 2018)

Modelamento da rede elétrica

- Subestação Inversora

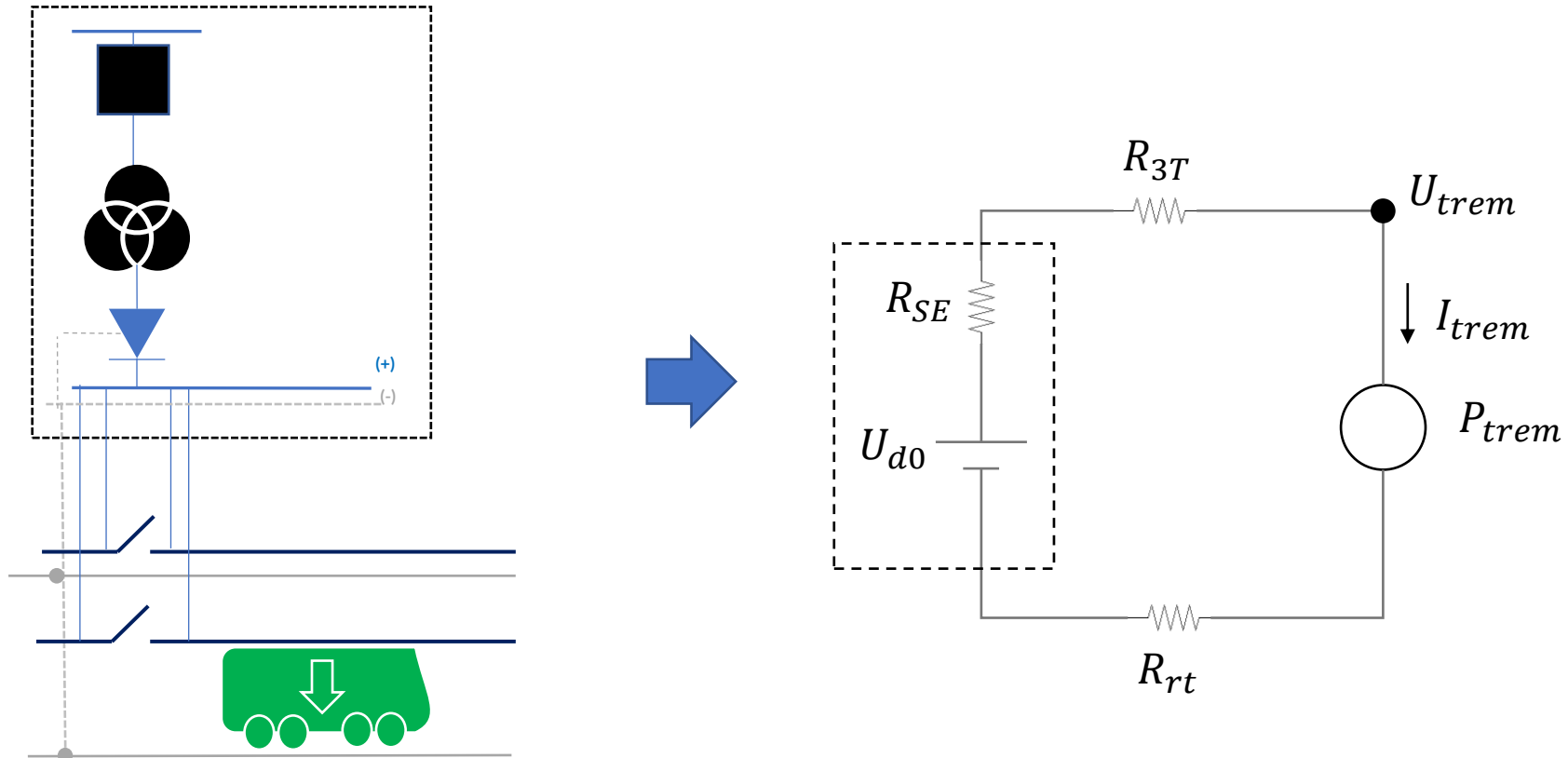


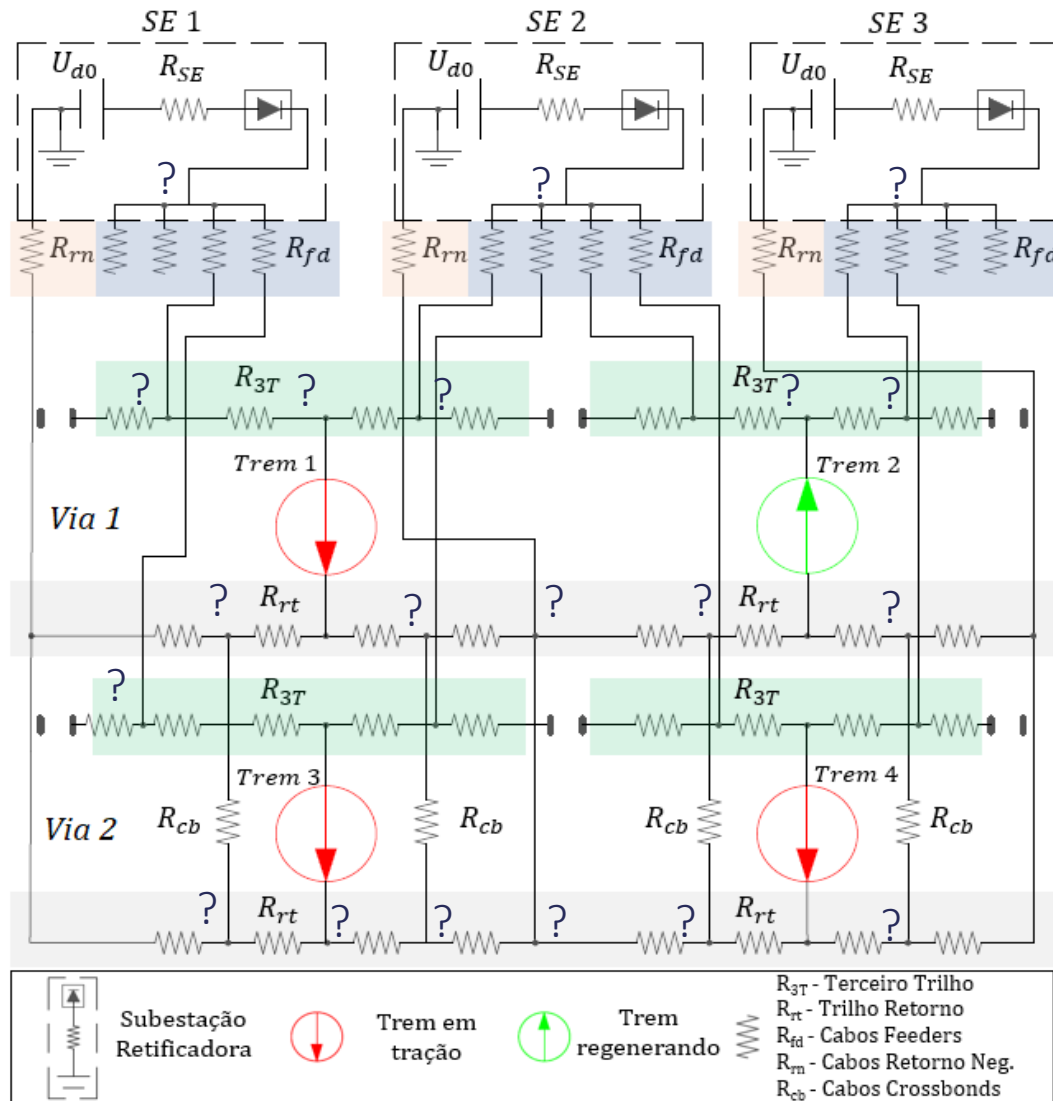
$$U_{inv} = U_{trig} - I_{inv} * R_{inv}$$



Fonte: (TIAN, ZHANG, *et al.*, 2018)

Modelamento da rede elétrica

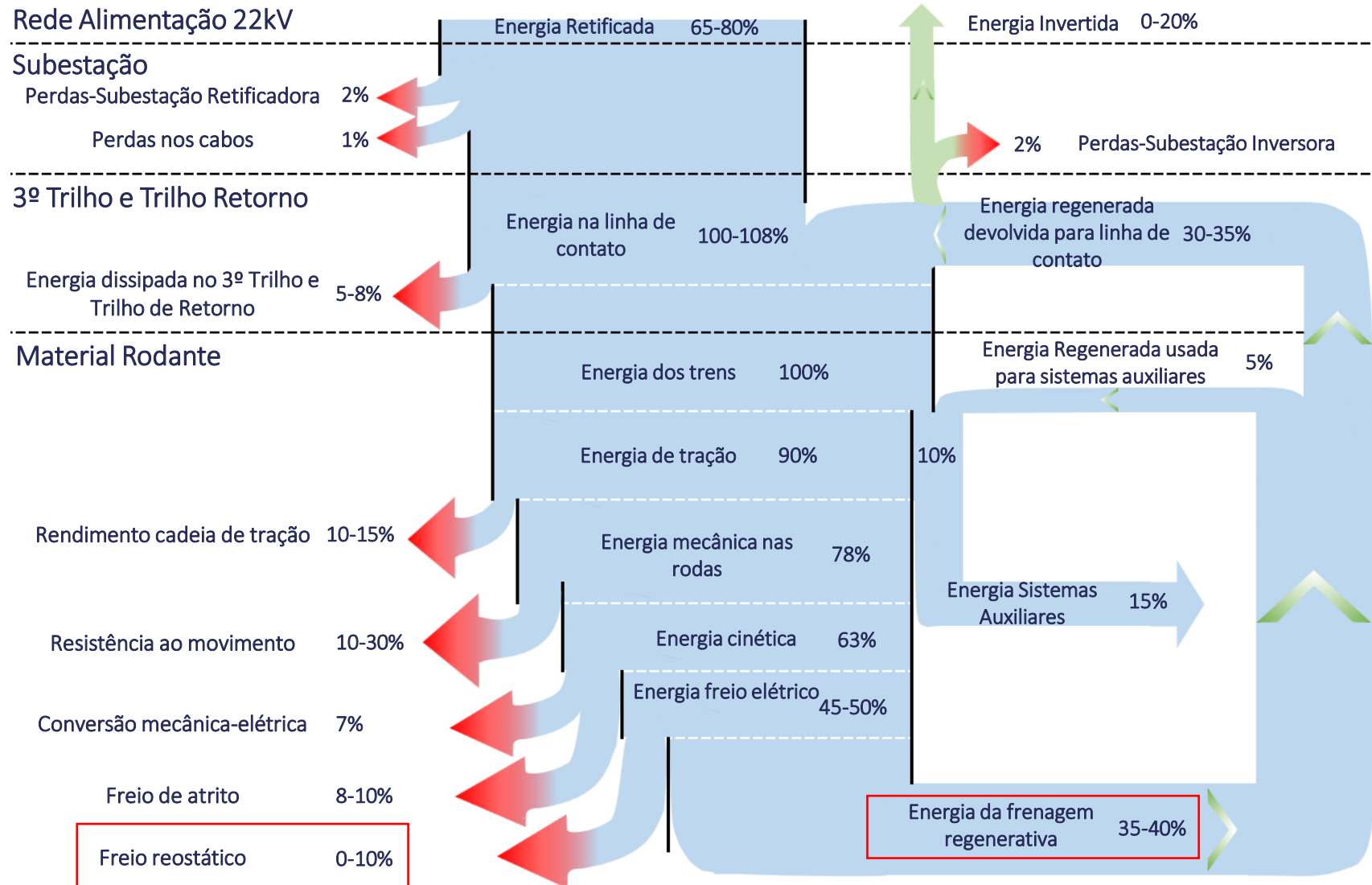




Solução do Fluxo de Potência

- Fontes de Corrente e Condutâncias
- Construção da Matriz de Condutâncias G
- Análise nodal
 $[U] = [G]^{-1} * [I]$
- Algoritmos (Métodos Numéricos)
 Bi-fatorização de Zollenkopf
 Cholesky
 Newton Raphson
 Point-Jacob
 Gauss, Gauss-Seidel
 ICCG

Fluxo de Energia Tração



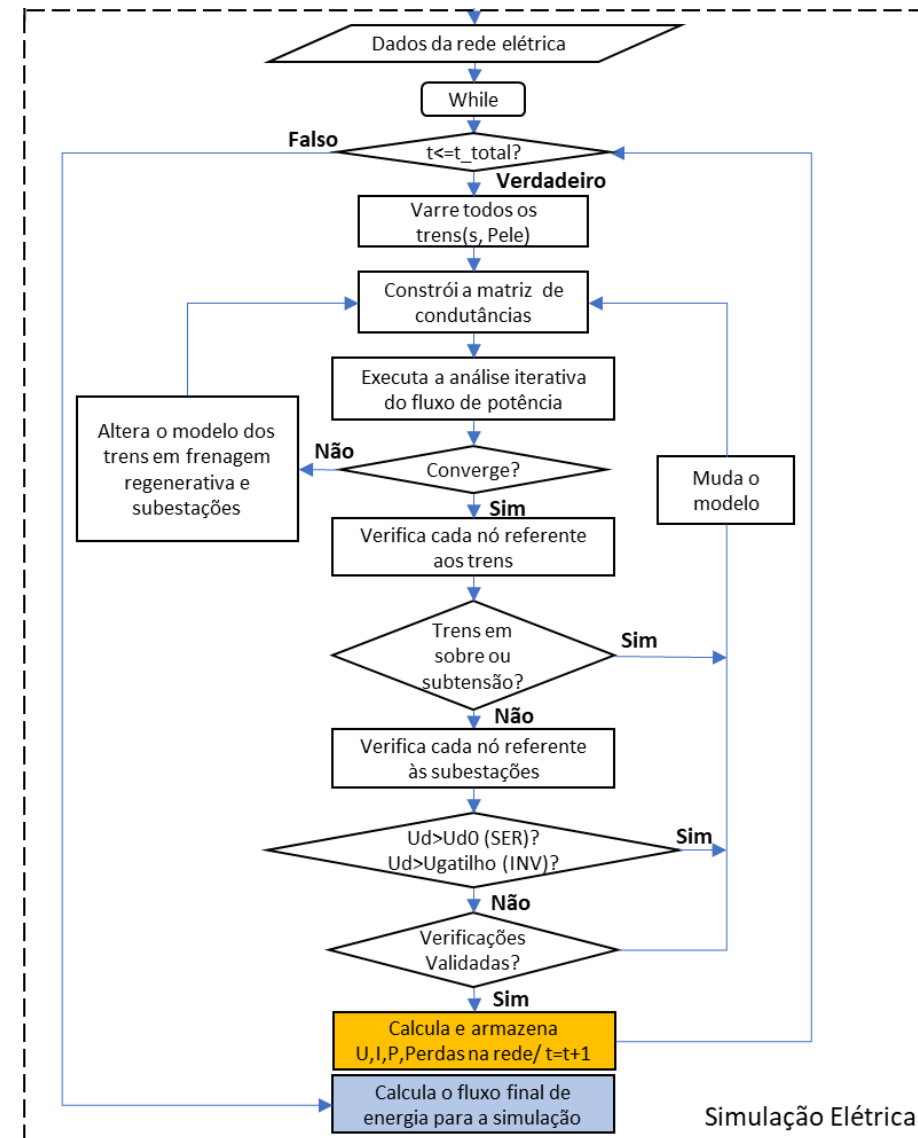
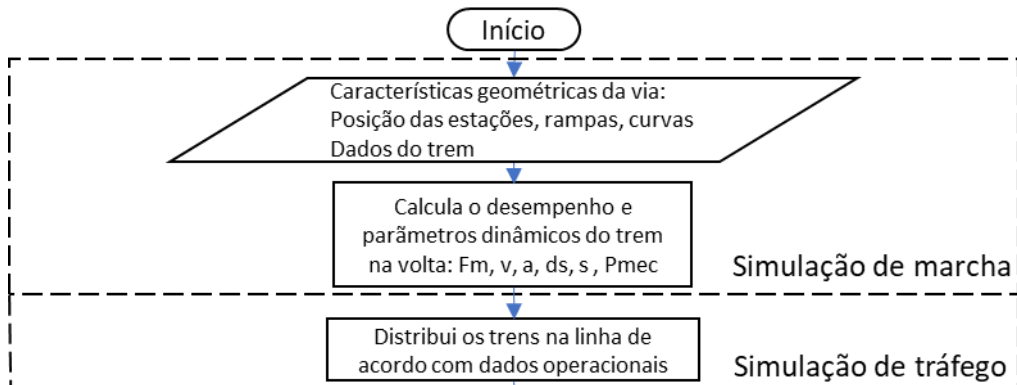
➤ RECEPTIVIDADE

$$\eta_{reg} = \frac{E_{regen}}{E_{regen} + E_{res_fe}}$$

Fonte: (DOUGLAS, ROBERTS, *et al.*, 2015), (GONZÁLEZ, PALACIN, *et al.*, 2014), (TIAN, 2017) e (TIAN, WESTON, *et al.*, 2017)

Ferramenta de simulação

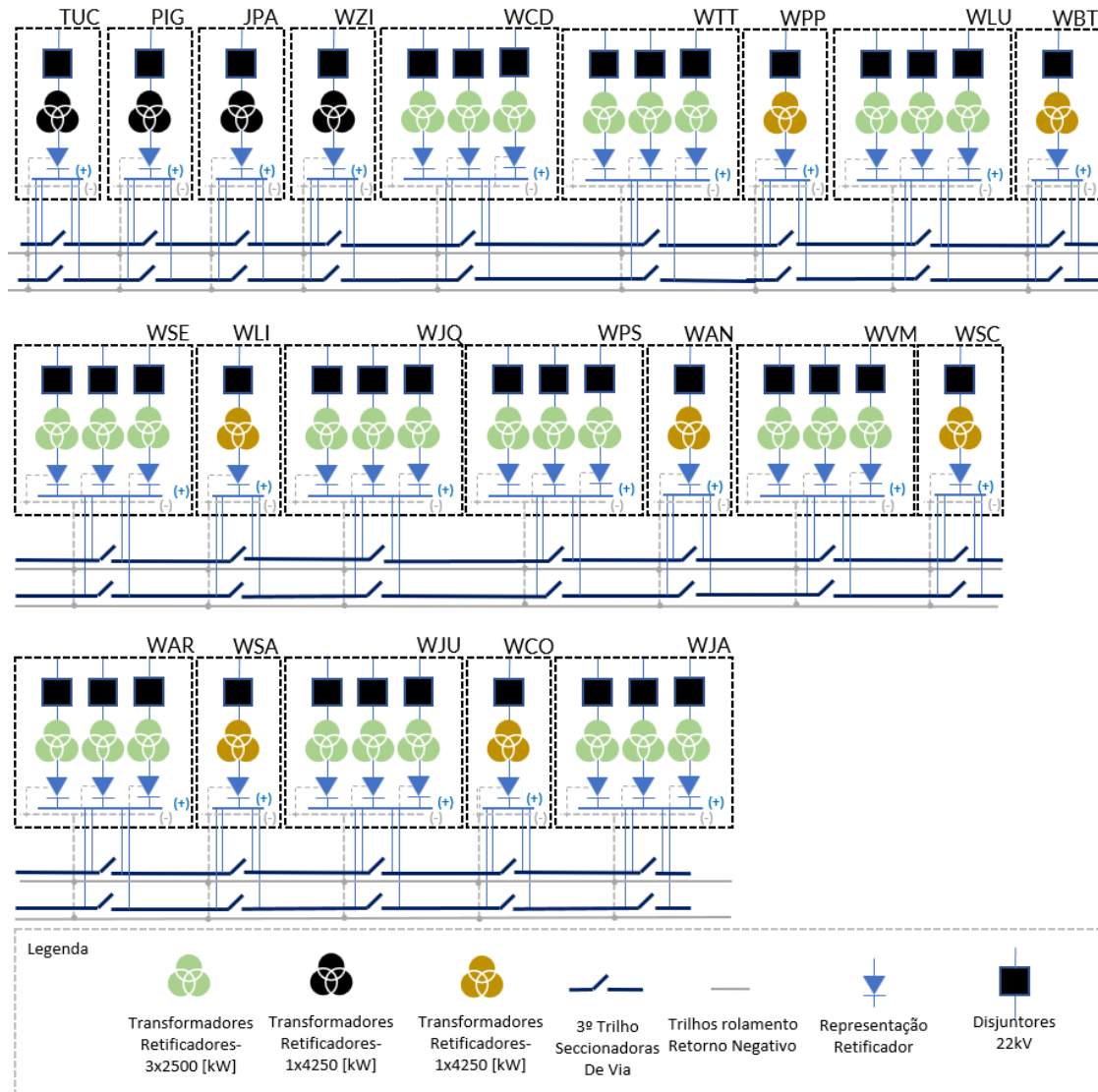
- Desenvolvida em MATLAB®
- Fluxograma:



Três estudos de caso

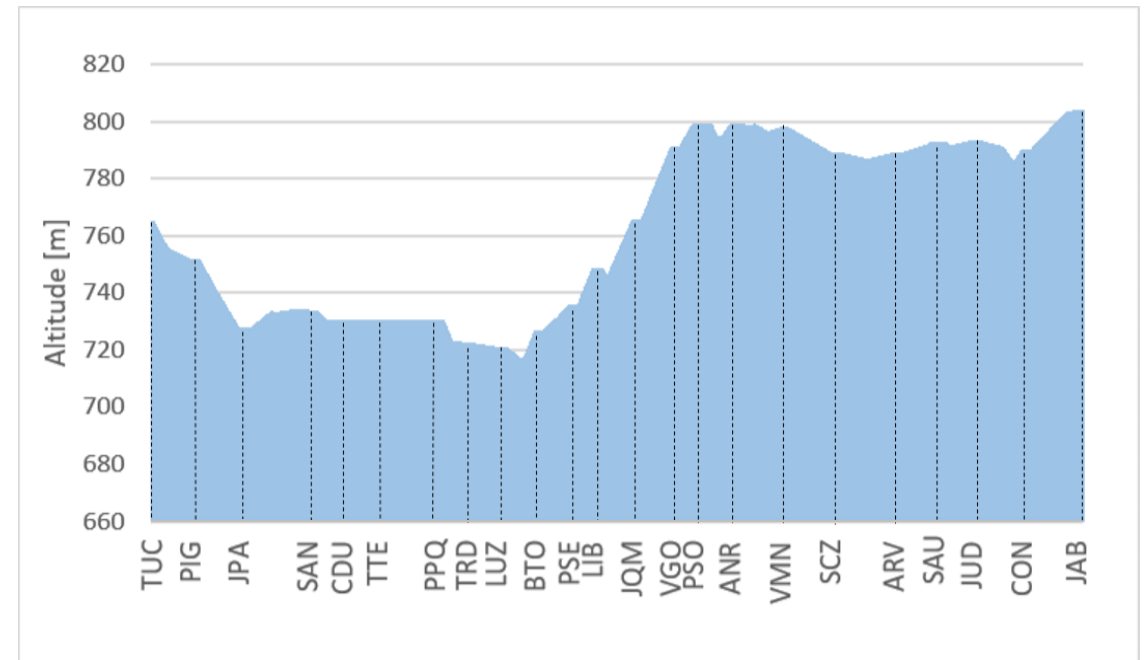
1. Avaliação da situação atual da Linha 1-Azul para diferentes cenários operacionais;
2. Avaliação dos maiores potenciais de reaproveitamento na linha;
3. Aplicação de um Inversor em uma subestação, avaliação do potencial energético e avaliação técnico econômica;

OBS.: Todos os resultados foram obtidos com tempo de simulação =01:00:00

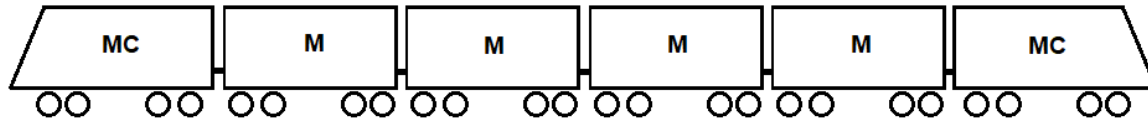


➤ Modelamento- Linha 1- Azul

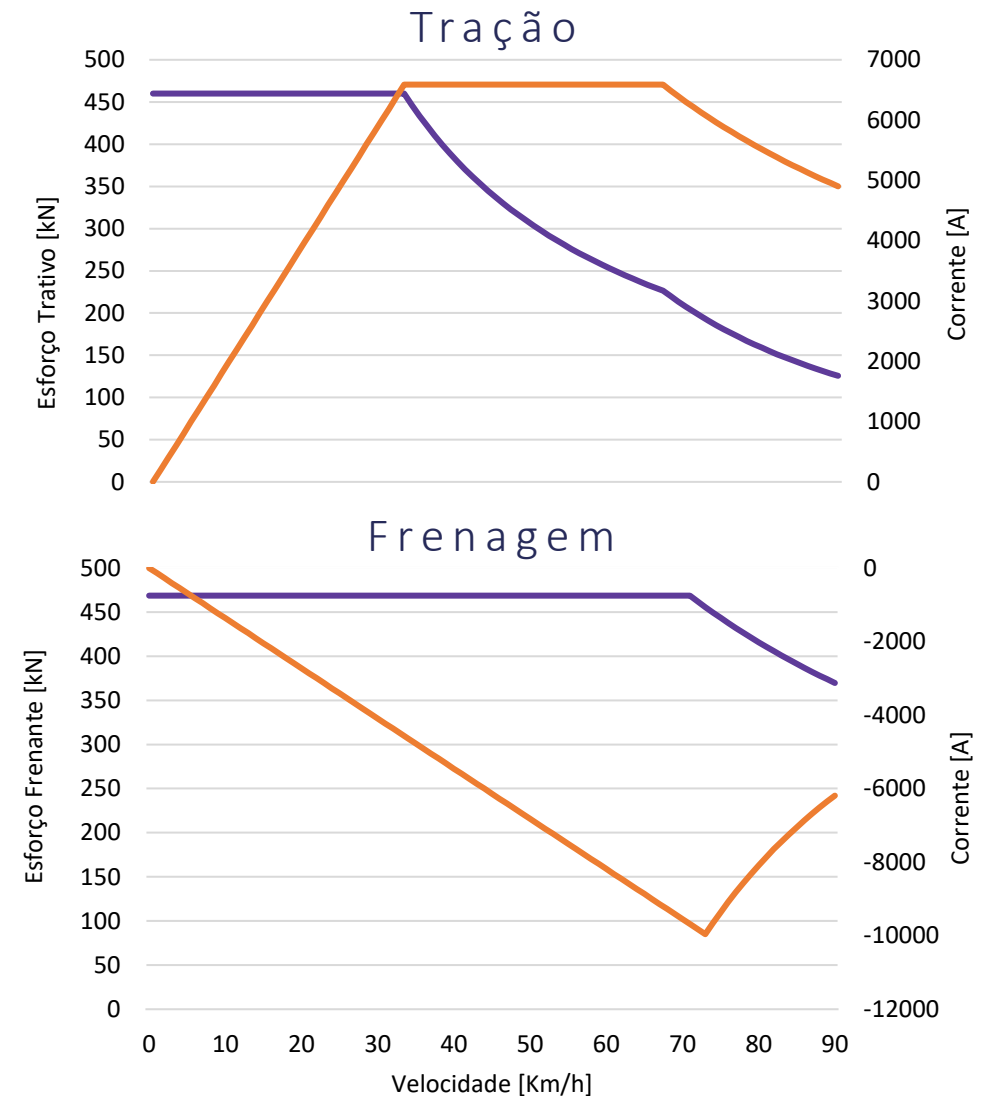
- 23 estações de passageiros
- 21 subestações retificadoras



Modelamento do Trem



Carro	MC	M	Total
Tara Vazio	40,92	39,345	239,22
Tara Passageiros- Carga Máxima	21,276	22,138	131,104
Trem Carregado- 8 pass/m ²			370,324
Fator de inércia das massas girantes- ξ			1,1 [1]
Comprimento do trem			132 [m]
Área da máscara frontal			9,6 [m ²]
Máxima aceleração			1,12 [m/s ²]
Máxima desaceleração			1,2 [m/s ²]
Máximo solavanco			1,0 [m/s ³]
Velocidade máxima			90 [km/h]
Tensão nominal- Un			750 [V]
Maior tensão de frenagem não-permanente -Umax2			900 [V]
Maior tensão de frenagem permanente -Umax1			860 [V]
Menor tensão permanente- Umin1			650 [V]
Menor tensão não permanente- Umin2			500 [V]
Potência serviços auxiliares- Paux			150 [kW]



Simulação situação atual Linha 1- Azul

- Cenários Operacionais

	Período	Carregamento passageiros	Headway	Nº Trens
Cenário 1	Dia Útil - Pico	80%	107	41
Cenário 2	Dia Útil - Vale	30%	122	35
Cenário 3	Sábado - Dia	30%	148	29
Cenário 4	Sábado - Noite	20%	285	15
Cenário 5	Domingo - Dia	30%	215	20
Cenário 6	Domingo - Noite	20%	267	16

Dia útil

Fim de semana e Feriados



RESULTADOS- 1º Estudo de Caso

Resultados obtidos – Situação Atual Linha 1- Azul

	Período	Carregamento passageiros	Headway	Nº Trens
Cenário 1	Dia Útil - Pico	80%	107	41
Cenário 2	Dia Útil - Vale	30%	122	35
Cenário 3	Sábado - Dia	30%	148	29
Cenário 4	Sábado - Noite	20%	285	15
Cenário 5	Domingo - Dia	30%	215	20
Cenário 6	Domingo - Noite	20%	267	16

- Cenário 1, maior consumo- nº de trens e carregamento
- Receptividade bem alta no cenários 1, 2 e 3
- Cenário 4 pior receptividade, poucos trens

Simulação	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Energia total subestação	28,85	21,55	21,55	21,55
Energia retificada (E_{ser}) [Mwh]	28,85	21,55	21,55	21,55
Energia invertida (E_{inv}) [Mwh]	0,00	0,00	0,00	0,00
Perdas na subestação [Mwh]	0,94	0,94	0,94	0,94
Perdas na rede [Mwh]	2,72	1,94	1,94	1,94
Energia dos trens (E_{trem}) [Mwh]	25,19	19,55	19,55	19,55
Energia tração dos trens ($E_{tração}$) [Mwh]	42,40	32,52	32,52	32,52
Energia sistemas auxiliares dos trens (E_{aux}) [Mwh]	6,06	5,31	5,31	5,31
Energia freio elétrico disponível ($E_{freio_ele_disp}$) [Mwh]	26,71	19,55	19,55	19,55
Energia regenerada (E_{regen}) [Mwh]	23,28	18,50	18,50	18,50
Eficiência da regeneração (η_{reg}) [%]	87,14%	93,24%	93,24%	93,24%
Total percorrido pelos trens [km]	1372,90	1211,50	1099,50	1099,50
Consumo Específico [kwh/km]	18,35	15,95	15,95	15,95

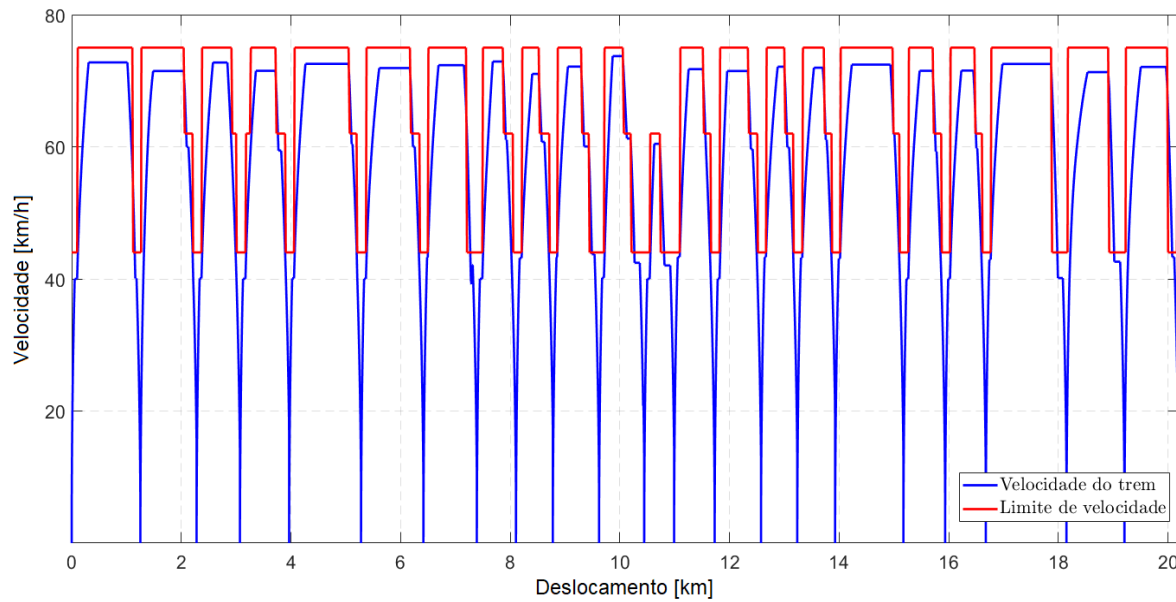
Consumo específico e eficiência dos trens pelo carregamento e pelo percurso

Energia dos trens = Energia de tração + Energia Auxiliares - Energia regenerada

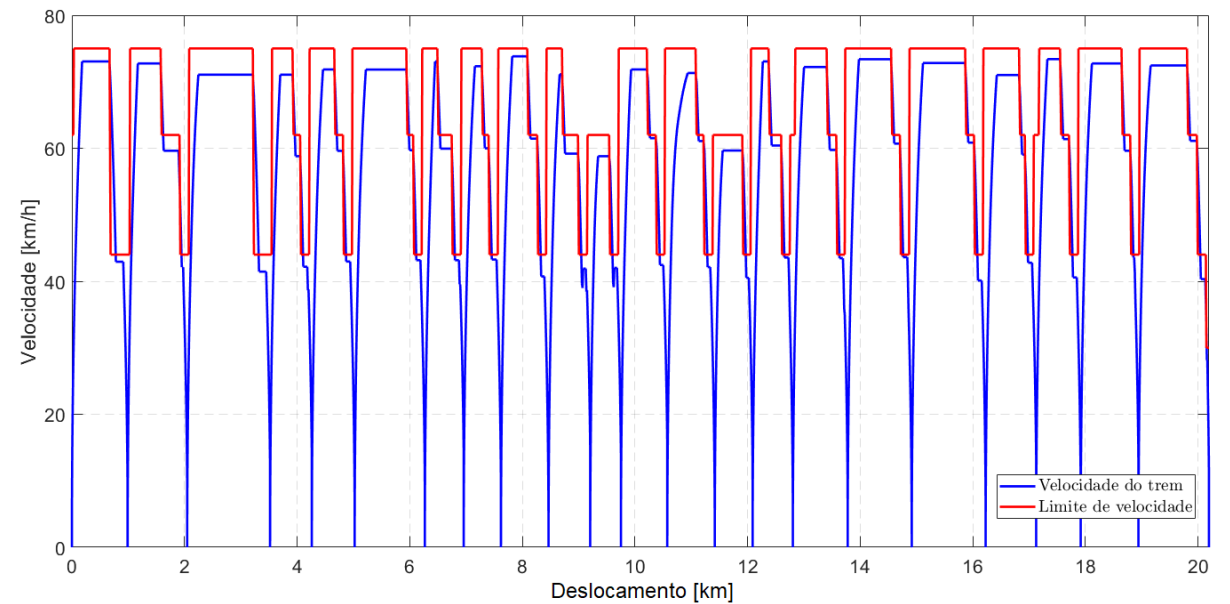


Trajetoória do Trem- Via 1 e 2

JAB-TUC

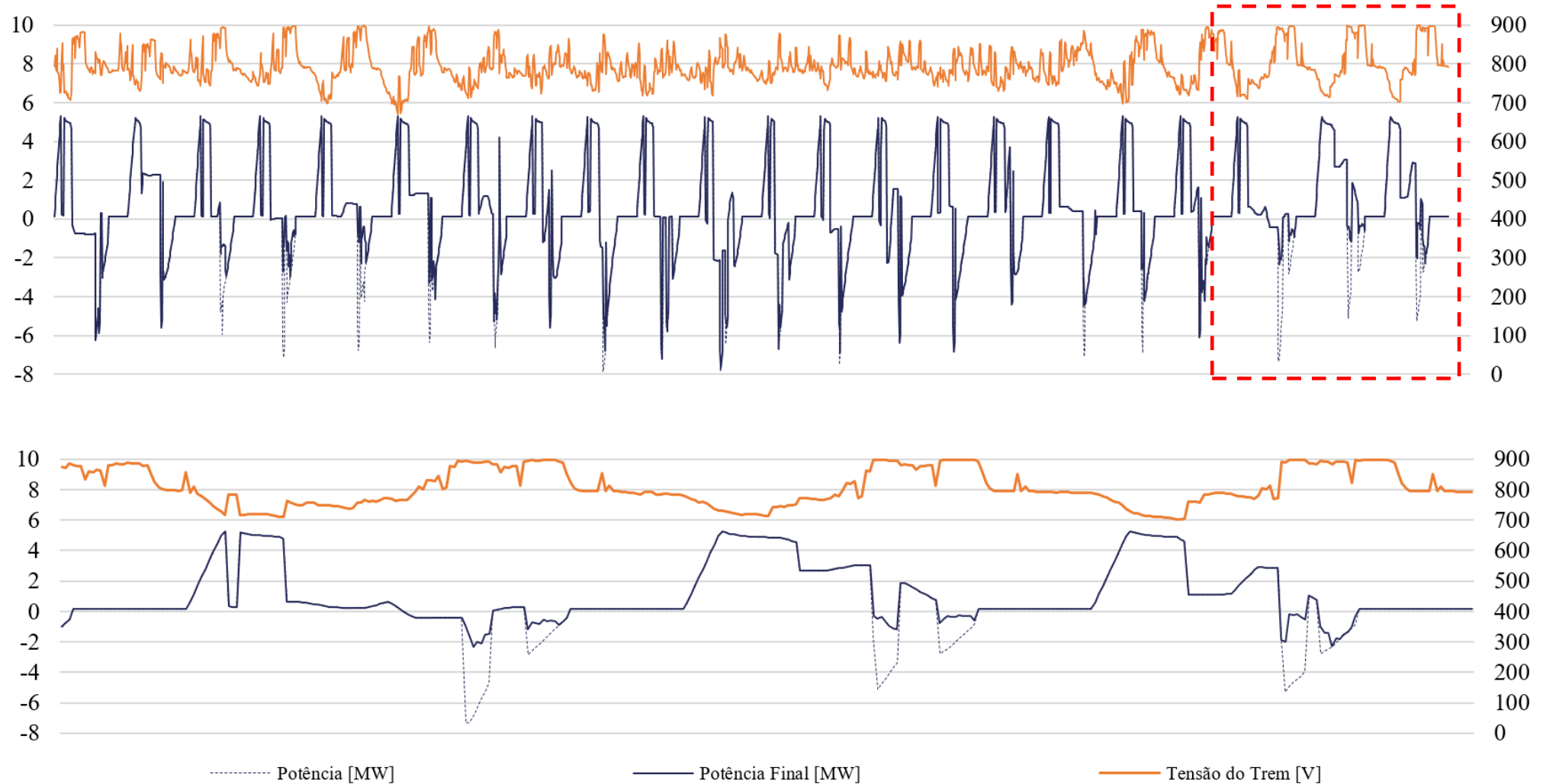


TUC-JAB



RESULTADOS- 1º Estudo de Caso

Potência Elétrica do Trem x Tensão do 3º Trilho – Cenário 1

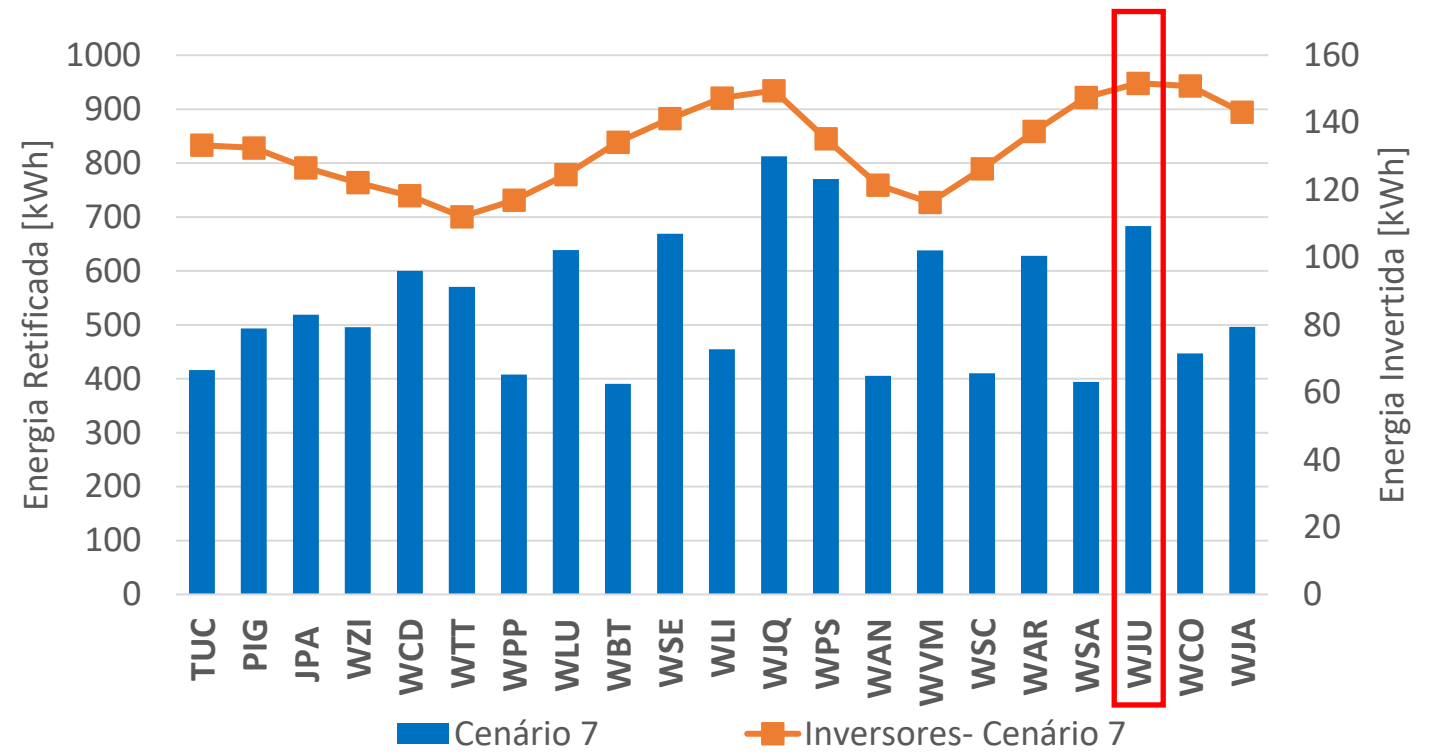


RESULTADOS- 2º Estudo de Caso

Avaliação do potencial nas subestações da Linha 1-Azul

Simulação	Cenário 4	Cenário 7
Energia total subestação	10,75	8,55
Energia retificada (E_{ser}) [Mwh]	10,75	11,61
Energia invertida (E_{inv}) [Mwh]	0,00	2,79
Perdas na subestação [Mwh]	0,17	0,27
Perdas na rede [Mwh]	0,73	0,75
Energia dos trens (E_{trem}) [Mwh]	9,86	7,80
Energia tração dos trens ($E_{tração}$) [Mwh]	13,65	13,65
Energia sistemas auxiliares dos trens (E_{aux}) [Mwh]	2,31	2,31
Energia freio elétrico disponível ($E_{freio_ele_disp}$) [Mwh]	8,29	8,29
Energia regenerada (E_{regen}) [Mwh]	6,10	8,15
Eficiência da regeneração (η_{reg}) [%]	73,56%	98,36%
Total percorrido pelos trens [km]	524,95	524,95
Consumo Específico [kwh/km]	18,77	14,86

- Cenário 4 – Pior caso de Receptividade
- Inversor em todas subestações



RESULTADOS- 3º Estudo de Caso

- Aplicação e avaliação na subestação WJU
- Inversor de 1,125MW

Cenários com poucos trens/Baixa receptividade

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Energia Retificada [kWh]	1655,00	1026,40	1055,40	664,50	801,20	541,30
Energia Invertida [kWh]	171,67	97,47	149,06	274,93	210,33	177,94
% total do consumo da SE	10,37%	9,50%	14,12%	41,37%	26,25%	32,87%

	Dia Útil	Sábado	Domingo/ Feriado	Anual	% total do consumo da SE
Energia Retificada [kWh]	24299,6	19153,5	14724,5	8041975,3	---
Energia Invertida [kWh]	2394,57	3610,475	4044,625	1040293,035	12,94%

RESULTADOS- 3º Estudo de Caso

➤ Análise viabilidade técnico-econômica- 2 cenários custo de energia

Potência Nominal do Inversor [kW]	1.125
Economia de energia obtida [kWh/ano]	1.040.293
Economia média obtida [R\$/ano]	400.000,00 a 600.000,00
Custo do equipamento [R\$]	3.500.000,00
Custo estimado instalação [R\$]	500.000,00

Custo Energia-2024

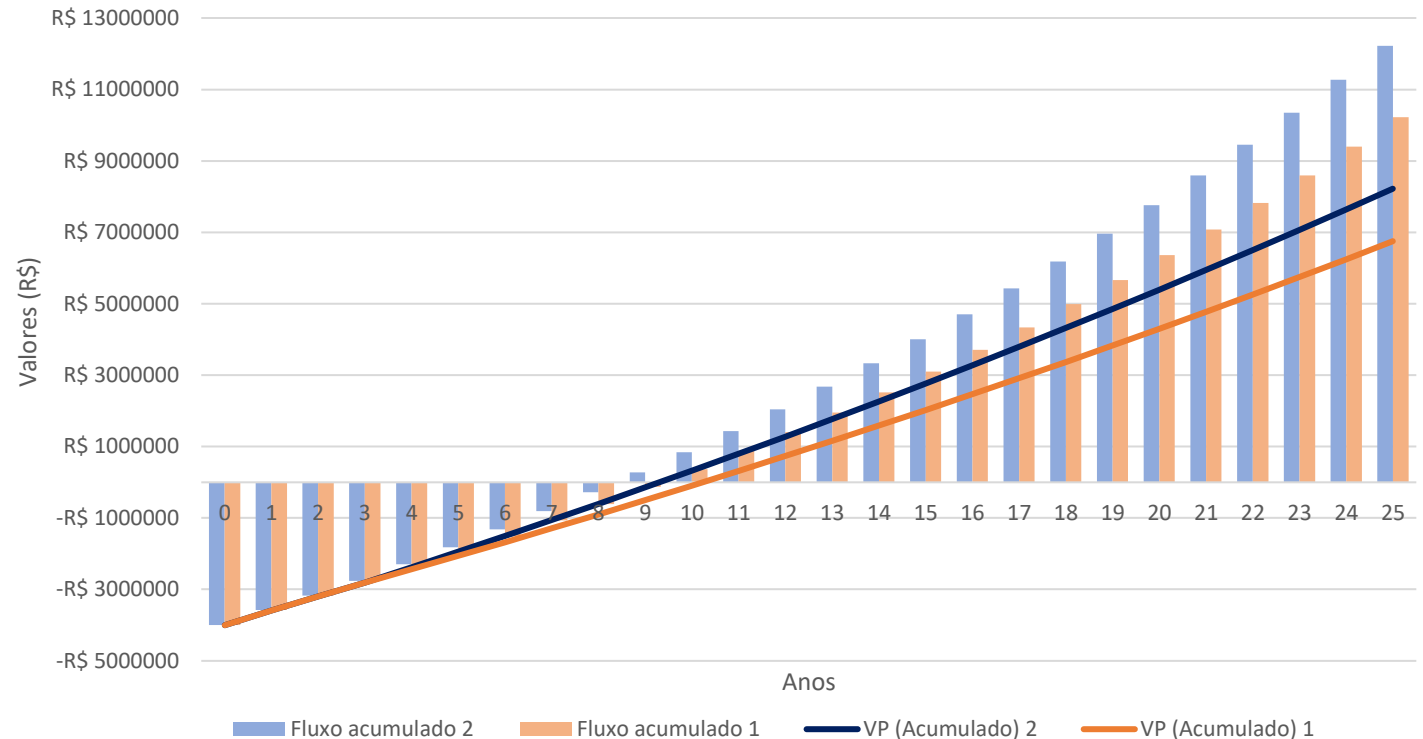


R\$ 230,00



R\$ 150,00

Payback descontado do projeto



Em ambos os casos, demonstra que é **Payback em até 9 anos** uma solução viável, vida útil de 15-20 anos. **Payback em no máximo 10 anos e 4 meses**

- Desenvolvimento de ferramenta de simulação, entender o comportamento da energia no Sistema e atingir os objetivos propostos;
- Identificação dos locais com maior potencial para aplicação;
- Mesmo adotando parâmetros conservadores conforme apresentado, foram obtidos:
 - Estimativa **9,5% e 41,37%** da energia consumida pela subestação estudada pode ser recuperada dependendo do cenário;
 - Estimativa anual de **12,94%** da energia consumida pela subestação estudada;
 - Dependendo do custo futuro da energia, economia anual de **R\$400.000 a R\$600.000**;
 - Com payback descontado de **9 anos** no melhor caso para o projeto (tarifa mais alta), e **10 anos e 4 meses** no pior caso (tarifa mais baixa);



