



AEAMESP

MAIS TRILHOS, MAIS DESENVOLVIMENTO.



6º PRÊMIO
TECNOLOGIA &
DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS

ANP TRILHOS
Associação Nacional dos Transportadores
de Passagem por Trilhos Urbanos



CBTU
Companhia Brasileira
de Trânsito Urbano



TRILHOS: EFICIÊNCIA E NOVOS RUMOS



CONSIDERAÇÕES PARA O PROJETO- ESCOLHA DA TENSÃO: SUBESTAÇÃO RETIFICADORA, TRENS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Albert Haga - Metrô-SP

Atilio Henrique Laudanna - Metrô-SP

Massaru Saito - Metrô-SP

CONSIDERAÇÕES PARA O PROJETO – ESCOLHA DA TENSÃO: SUBESTAÇÃO RETIFICADORA, TRENS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Na sociedade de hoje, o desenvolvimento econômico e a escassez de energia estão se tornando cada vez mais significativas para o mundo. Alta eficiência, economia de energia e proteção ambiental tornam-se um tópico de interesse comum para as pessoas

Ferrovias são uma grande indústria de consumo de energia, "Eficiência" será a direção do desenvolvimento da tecnologia dos sistema de (propulsão) elétrica por muitos anos. Em uma nova era, a nova tecnologia dá um novo significado para os objetivos

“Tecnologia e redução do consumo de energia tornaram-se o consenso na indústria de transporte ferroviário”



Alta eficiência e economia de energia é o desenvolvimento tendência do transporte ferroviário

 中国中车
CRRC
China Railway Rolling
Stock Corporation (CRRC)

CONSIDERAÇÕES PARA O PROJETO – ESCOLHA DA TENSÃO:
SUBESTAÇÃO RETIFICADORA, TRENS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

QUAL A TENDÊNCIA PARA AS RAILWAYS ??

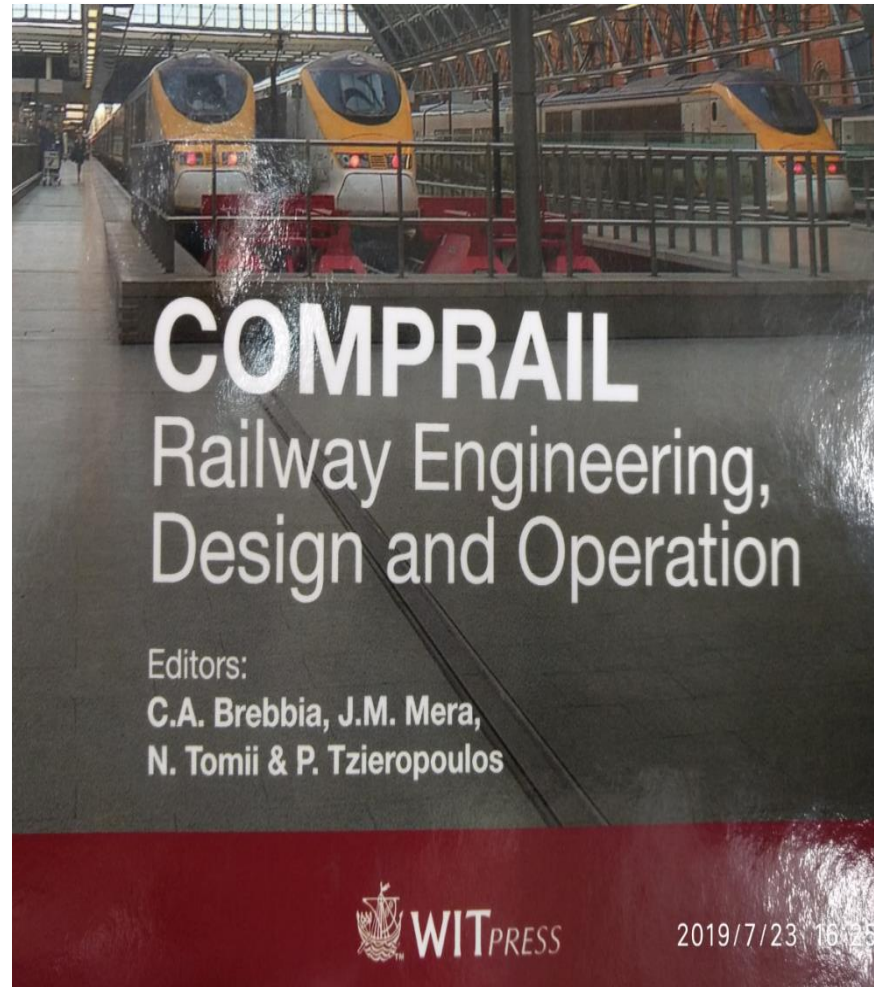
TENSÃO

HYPERLOOP



CONSIDERAÇÕES PARA O PROJETO – ESCOLHA DA TENSÃO: SUBESTAÇÃO RETIFICADORA, TRENS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

*CONFERÊNCIA INTERNACIONAL "LIVRO"
ARTIGOS DE ENGENHARIA-RAILWAYS:*



CONSIDERAÇÕES PARA O PROJETO – ESCOLHA DA TENSÃO: SUBESTAÇÃO RETIFICADORA, TRENS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

UM DOS ARTIGOS CONSIDERADOS
NO ESTUDO, DESTACA-SE:

Energy loss comparison between 750 VDC and 1500 VDC power supply systems using rail power simulation

S. Açıkbaş¹ & M. Turan Söylemez²

¹*Istanbul Ulaşım A.Ş., Istanbul Municipality, Turkey*

²*Istanbul Technical University, Electrical Engineering Department, Turkey*

Abstract

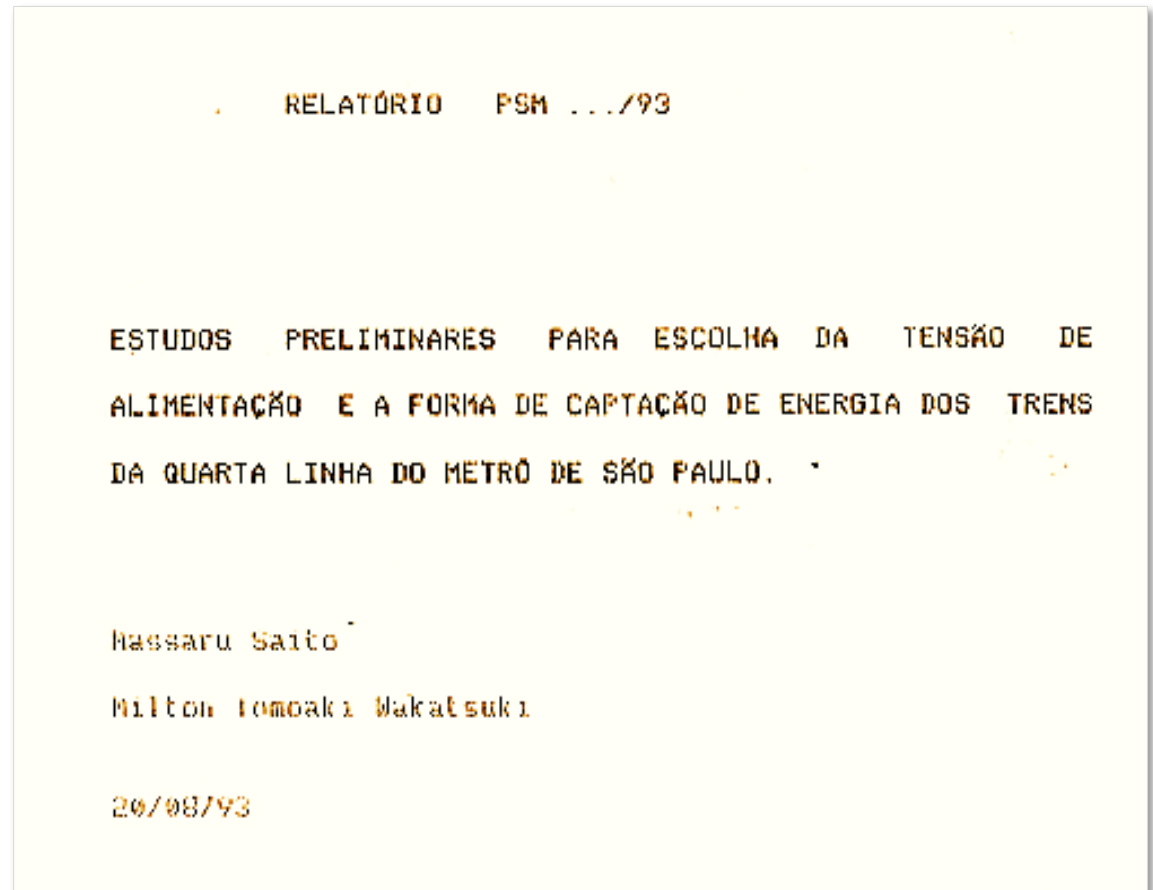
When a new transit line is to be built, apart from many other aspects, it is also necessary to study alternatives of the traction power supply system. One aspect to be studied in calculating the operational cost is the estimated level of electricity cost.

If the line capacity exceeds 22000 pphpd (Passenger Per Hour Per Direction), i.e. medium sized transport capacity, train-set configuration will consist of more than 4 vehicles, and headway time between the trains will get narrower, which results in greater traction energy demand. Energy loss in a conductor is proportional to the square of the current drawn from it. As a result, in theory, doubling the voltage level reduces the energy losses to one quarter. This might not be correct due to regenerative braking energy.

Keywords: multi-train simulation, DC rail traction systems, 1500 VDC.

CONSIDERAÇÕES PARA O PROJETO – ESCOLHA DA TENSÃO: SUBESTAÇÃO RETIFICADORA, TRENS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

*EVIDÊNCIA DO RELATÓRIO DO
METRÔ-SP DE 1993:*



RESUMO: RELATÓRIO DE 1993, COM O PANORAMA MUNDIAL DAS TENSÕES 750 Vcc e 1500Vcc APLICADO A METROS PESADOS (ACIMA DE 22000PPHPD)

CONSIDERAÇÕES PARA O PROJETO – ESCOLHA DA TENSÃO: SUBESTAÇÃO RETIFICADORA, TRENS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

NORMA: BAIXA TENSÃO

Obs: 750 VCC E 1500VCC

CLASSIFICAÇÕES DAS TENSÕES: NBR-5410 E NR10

obs:(entre as fases ou entre fase e terra CA / ou polos CC formados)

(EBT) EXTRA-BAIXA TENSÃO: tensão \leq a 50 volts (CA) ou 120 volts (CC)

(BT) BAIXA TENSÃO : tensão $>$ a 50 volts (CA) ou 120 volts (CC),
tensão \leq 1000 volts (CA) ou 1500 volts (CC)

Os valores definidos na NBR 5410 coincidem com os valores da NR10 no que se refere aos limites de tensão em suas classificações. A NR10 não se restringe a frequência de operação da rede e a NBR 5410 limita a frequência em 400Hz.

(AT) ALTA TENSÃO : tensão $>$ 1000 volts (CA) ou 1500 volts (CC)

NORMAS: EN 50163 E IEC 60850

RAILWAYS APPLICATIONS -SUPPLY VOLTAGES OF TRACTION SYSTEMS

Table 1 – Nominal voltages and their permissible limits in values and duration

| ELECTRIFICATION SYSTEM | Lowest non-permanent voltage | Lowest permanent voltage | Nominal voltage | Highest permanent voltage | Highest non-permanent voltage |
|------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------|---------------------------|-------------------------------|
| | U_{min2} V | U_{min1} V | U_n V | U_{max1} V | U_{max2} V |
| DC (mean values) | 400 | 400 | 600 ^a | 720 | 800 |
| | 500 ^c | 500 | 750 | 900 ^c | 1 000 |
| | 1 000 | 1 000 | 1 500 | 1 800 ^c | 1 950 |
| | 2 000 | 2 000 | 3 000 | 3 600 | 3 900 ^b |
| | 11 000 | 12 000 | 15 000 | 17 250 | 18 000 |
| AC (r.m.s. values) | 17 500 ^c | 19 000 ^c | 25 000 | 27 500 ^c | 29 000 |

Special national conditions for France, see Annex B.

^a Future d.c. traction systems for tramways and local railways should conform with system nominal voltage of 750 V, 1 500 V or 3 000 V.

^b Special national conditions for Belgium, see Annex B.

^c Special national conditions for United Kingdom, see Annex B.

Item 4.1. c), da mesma norma :

A tensão em vazio, no barramento da subestação, deve ser menor ou igual a U_{max1}

Para subestações DC é aceitável ter esta tensão em vazio menor ou igual a U_{max2} , ciente de que quando o trem está presente, a tensão em seus pantógrafos deverá estar em conformidade com esta tabela 1

CONSIDERAÇÕES PARA O PROJETO – ESCOLHA DA TENSÃO: SUBESTAÇÃO RETIFICADORA, TRENS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Programação:

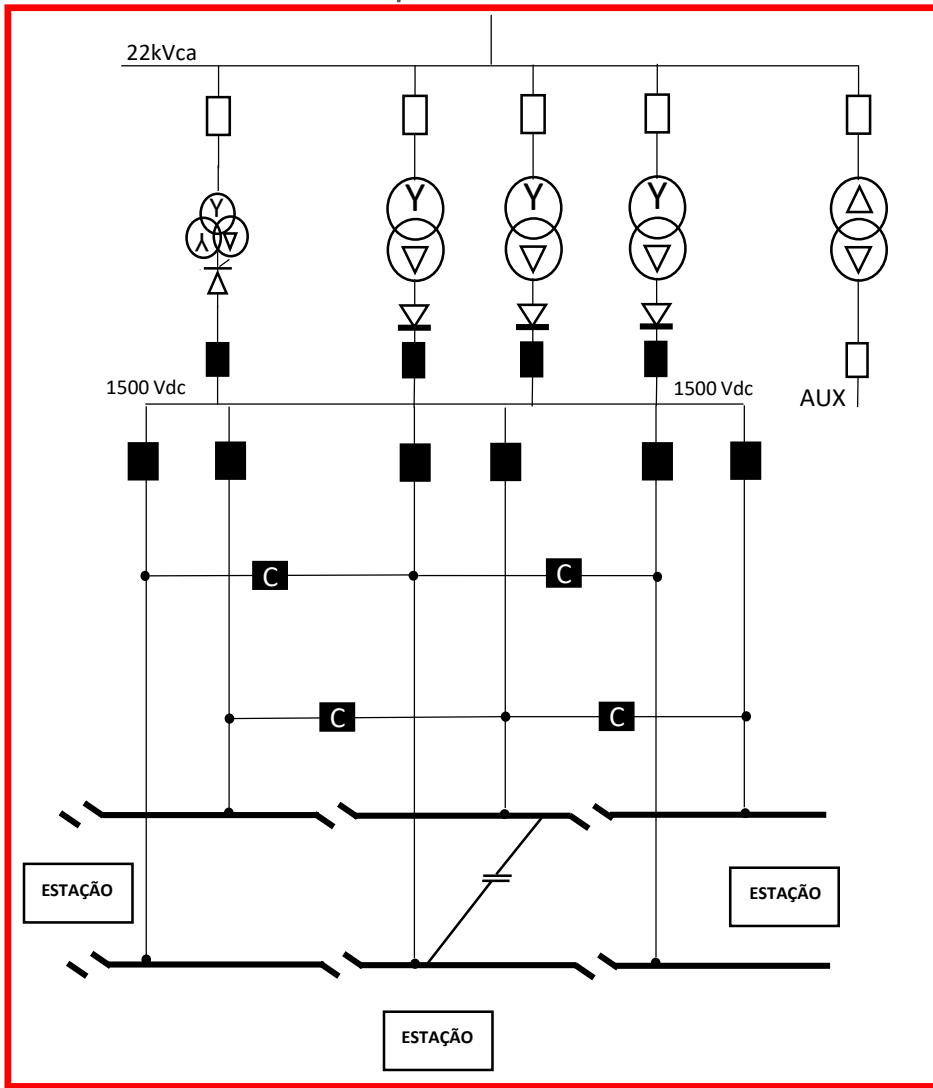
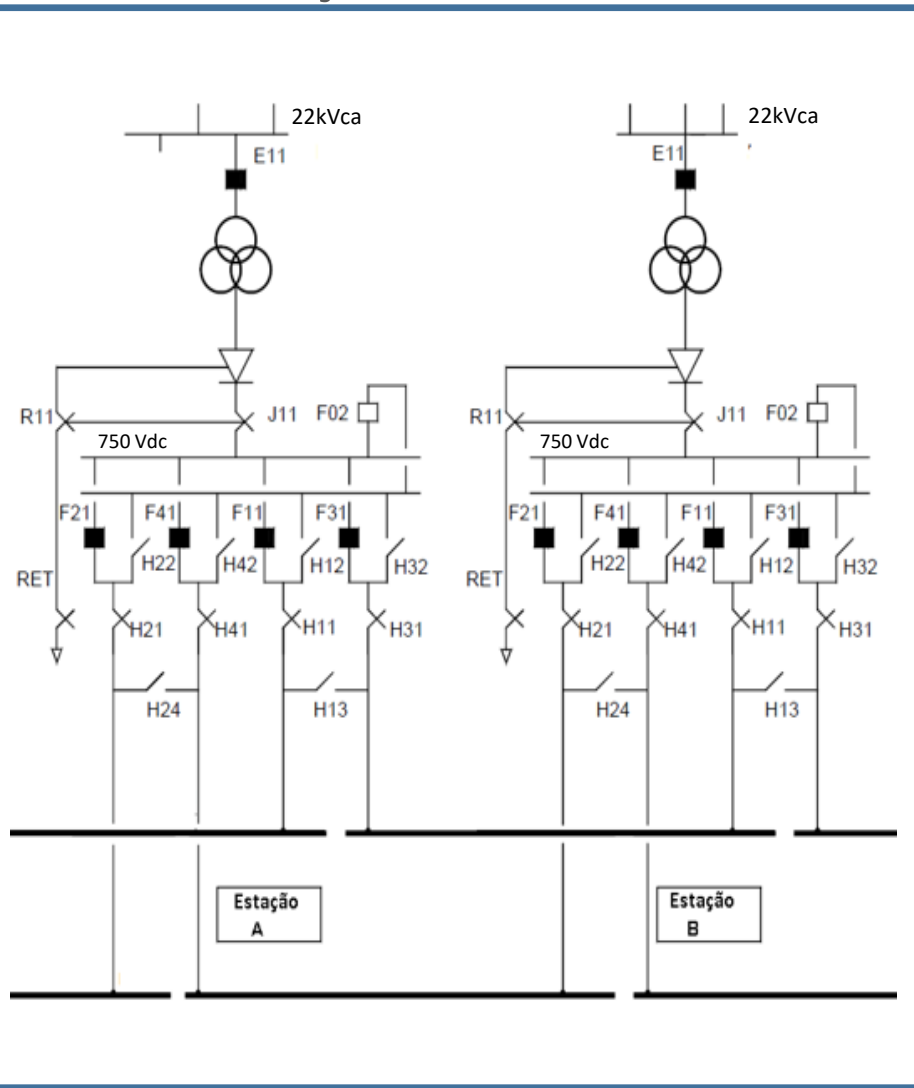
1. Fatores que podem afetar o consumo de energia elétrica
2. Subestações, vias e trens
3. Alguns aspectos e observações nos sistemas 750 Vcc e 1500 Vcc
4. Tendências mundiais, pesquisas e normas
5. Simulações e estudos em outros sistemas
6. A importância da definição da tensão em vazio das subestações
7. A dinâmica das tensões na subestação, vias e nos trens
8. Conclusões
9. Bibliografia
10. Perguntas

1. Fatores que podem influenciar no consumo de energia elétrica

| | FATOR | CRITÉRIO |
|---|--|---|
| 1 | Traçados das linhas (civil) | distâncias, rampas, curvas, túneis, etc. |
| 2 | Trens (CIRCUITO ELÉTRICO DE TRAÇÃO) | quantidades, composição, isolações, características dos motores, acionamentos, pesos, capacidade de geração da energia nas frenagens dos trens no sistema, etc. |
| 3 | Suprimento de energia-feeder's (CIRCUITO ELÉTRICO DE TRAÇÃO) | retificação (ou não), isolações, tensões, correntes , impedâncias, rendimentos, linhas de contato, trilhos-retorno . |
| 4 | Sinalizações e controles | confiabilidade, precisão, circuitos de via, simultaneidades, distâncias permitidas, alternativas de desempenho, automatismos nas acelerações, velocidades, previsão e controle do tempos de deslocamentos e paradas (headway), etc. |
| 5 | Forma de operação/ políticas de uso das alternativas disponibilizadas pelos sistemas de sinalização e controle | estratégias, desempenho imposto, uso de máximas acelerações, velocidades, mínimos tempos de deslocamento e parada (headway), número de viagens, etc. |

2. Subestações, vias e trens

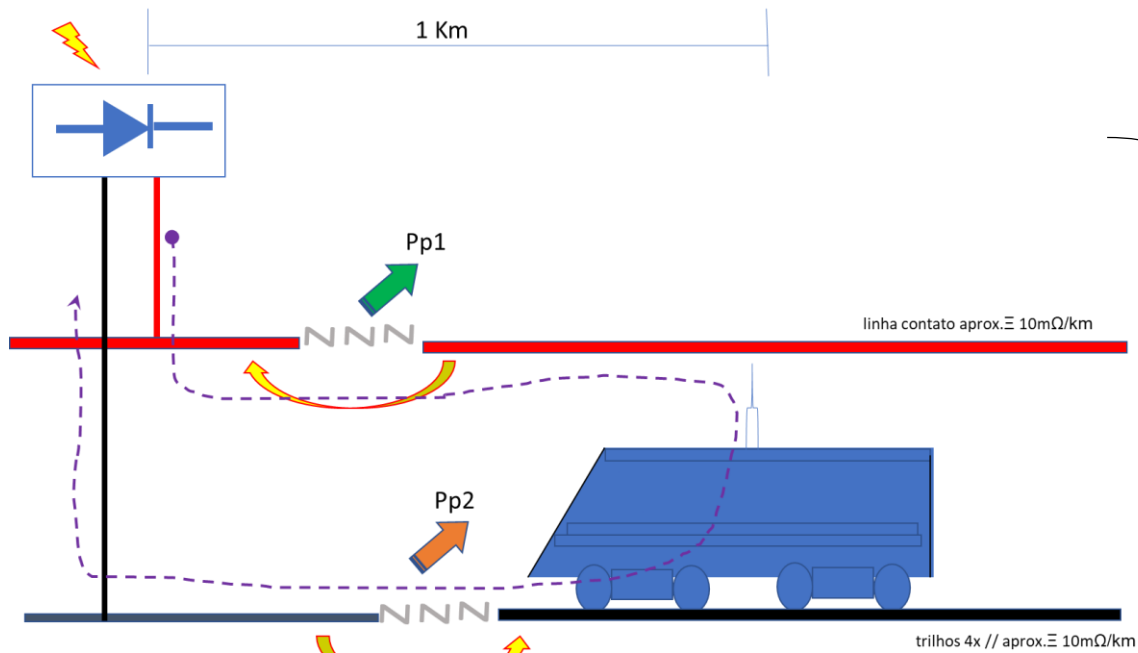
Subestações Retificadoras de uma Linha – Exemplos de Unifiliares



2. Subestações, vias e trens

$$P_{perda} = R \times I^2$$

2. Subestações, vias e trens



Exemplificando as “perdas”:

- alimentadores (+/-)
- nas linhas de contato
- elétrica do trem
- e trilhos de retorno

$$P_{perda} = R \times I^2$$

(instantânea)

$$P_{perda} = R \times I^2$$

(instantânea)

Considerando 1000 A & 1 Km:

$$\begin{aligned} P_{perda} &= Pp1 + Pp2 \\ &= 10 \text{ m}\Omega \times (1000)^2 + 10 \text{ m}\Omega \times (1000)^2 \\ &= 20 \text{ m}\Omega \times (1000)^2 \\ &= 20 \text{ m}\Omega \times 1.000.000 \end{aligned}$$

$$P_{perda} = 20 \text{ kW}$$

2 x

Considerando 2000 A & 1 Km:

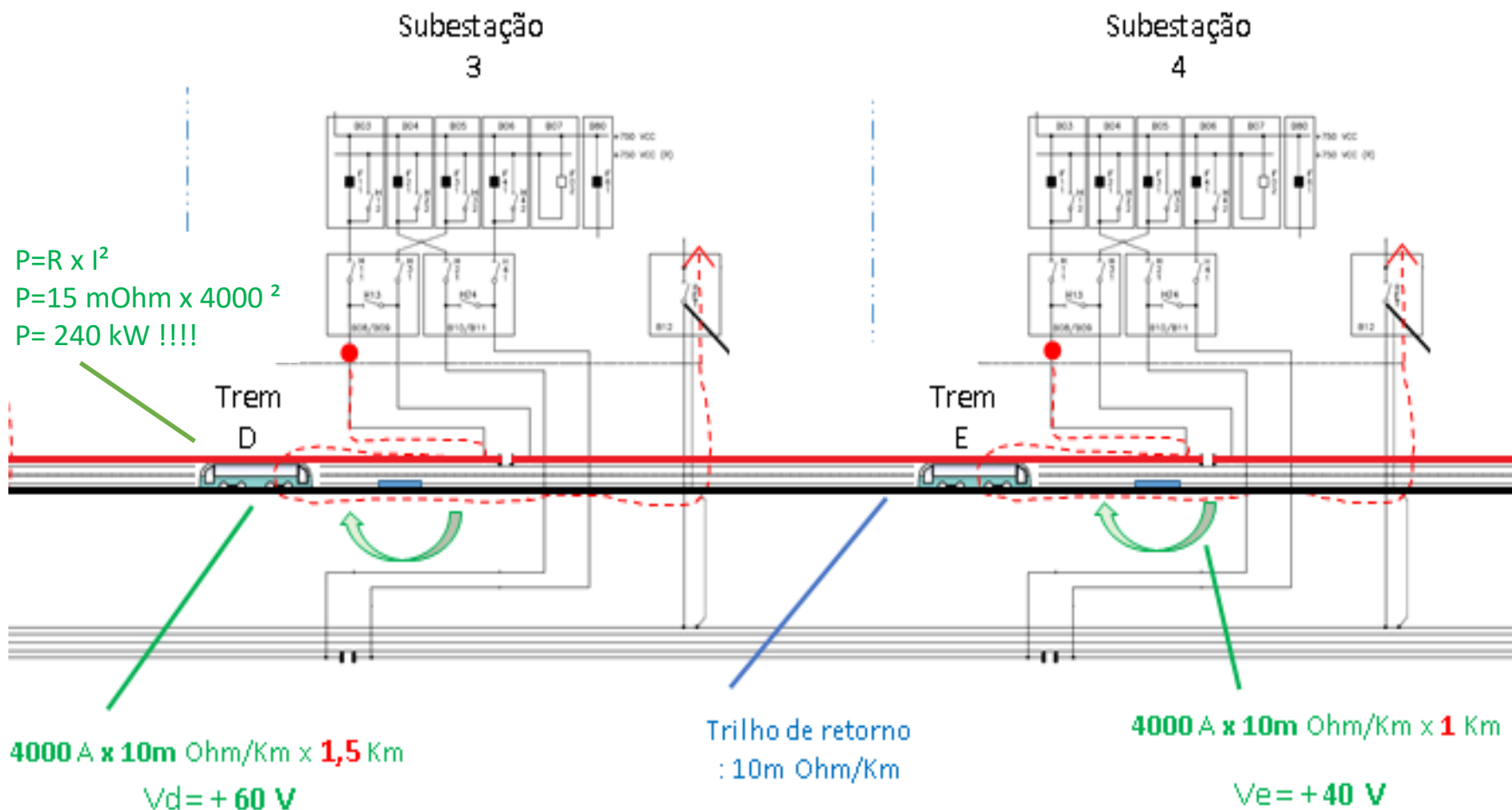
$$\begin{aligned} P_{perda} &= Pp1 + Pp2 \\ &= 10 \text{ m}\Omega \times (2000)^2 + 10 \text{ m}\Omega \times (2000)^2 \\ &= 20 \text{ m}\Omega \times (2000)^2 \\ &= 20 \text{ m}\Omega \times 4.000.000 \end{aligned}$$

$$P_{perda} = 80 \text{ kW}$$

4 x

2. Subestações, vias e trens

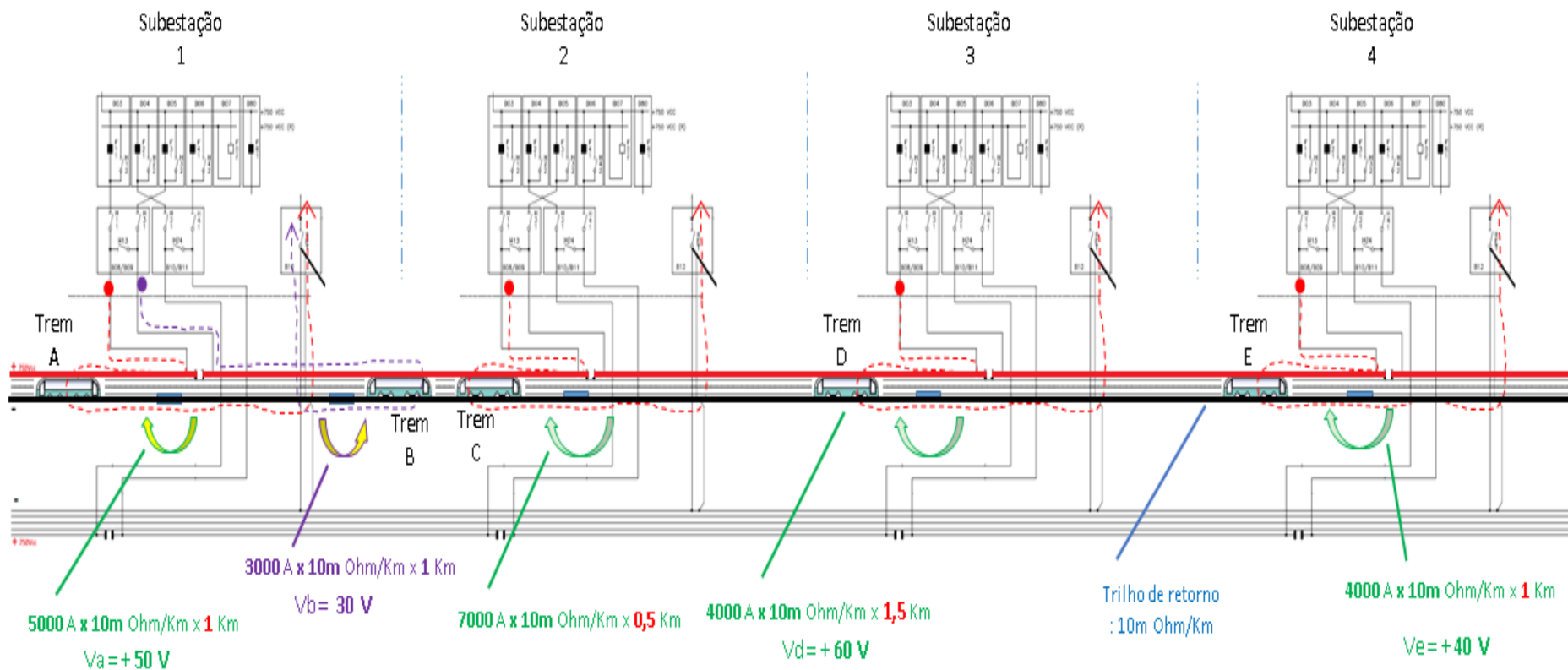
Exemplo de correntes e tensões nas vias



Exemplos de valores de correntes, distâncias, e quedas de tensão

2. Subestações, vias e trens

Exemplo de correntes e tensões nas vias



Exemplos de valores de correntes, distâncias, e quedas de tensão

3. Alguns aspectos e observações nos sistemas 750 Vcc e 1500 Vcc

| | Aspectos | 750 Vcc | 1500 Vcc | Observações |
|---|---|---------|----------|---|
| 1 | Menores correntes = menores quedas de tensão | | | Comparado o sistema de 750 Vcc, as correntes de saída, para uma mesma demanda de energia, é reduzido pela metade em 1500 VCC. Assim, serão reduzidas as “quedas de tensão” ao longo dos trilhos condutores. Isso possibilitará um “aumento na distância entre as subestações |
| 2 | Redução do número de subestações | | | Aplicações práticas mostram que 1500 a 2500 m entre as subestações, é adequado sistemas 750 Vcc. Enquanto que para sistemas 1500 Vcc, distância poderia ser aumentada para aproximadamente 4000 m |
| 3 | Menor custo de construção | | | A redução no número de subestações, diminuirá o custo de construção. |
| 4 | Menor secção transversal dos cabos | | | Para uma mesma potência, usando-se o dobro da tensão, a corrente é a metade ($P=V \times I$). Com correntes menores, será menor a seção transversal dos cabos alimentadores |
| 5 | Menor capacidade de corrente do sistema de captação de energia | | | Com correntes menores, os "trilhos condutores" do sistema de captação de energia (terceiro trilho ou catenária e sapatas coletoras) também poderá ter capacidades nominais menores |
| 6 | Redução das horas de manutenção | | | Em uma subestação, há inspeção e manutenção periódicas. Diminuir o número de subestações, consequentemente equipamentos resulta na redução de custos de manutenção |
| 7 | Aumento do uso de energia regenerada | | | O uso da energia de regeneração depende dos trens e dos locais das subestação. Com o aumento do espaço entre as SS, a possibilidade de existência de mais de um trem na mesma seção de alimentação é maior, especialmente em headways curtos. A faixa de tensão permitida (em Vcc) é maior (ver tabela da EN50163) |
| 8 | Menor perda de energia na transmissão (conversão e linhas de contato) | | | A perda de energia elétrica, ocorre em qualquer processo de transmissão. As linhas de transmissão, contato, e equipamentos das subestações, são os locais de perdas de energia. Conforme a lei de Ohm expandida: $P = R \times I^2$, a potência (no caso, da perda de energia) é proporcional para o quadrado da corrente x resistência elétrica (no caso, cabos e trilhos). De forma simplificada: Para uma mesma potência da carga, dobrar a tensão, reduziria a corrente pela metade. Circular a metade de corrente pelos condutores e "linhas de contato", reduz as perdas para 1/4. |

4. Tendências mundiais, pesquisas e normas

- Estudo comparativo realizado pelo Umraniye Metro M5, da cidade de Uskudar-Turquia.

Características principais da Linha Umraniye/ Dados de entrada

16 km de extensão.

13 estações de passageiros.

gradiente máximo de 4%

trens de 6 carros (todos motorizados).

estimado do pphpd é 25000 pphpd (passageiros/ hora/ sentido) para o ano de 2010

prevê-se que a capacidade aumentará para 35000 pphpd (passageiros/ hora/ sentido) no ano 2025

headway é calculado como 210 segundos, no início da operação

para o fluxo final futuro, o headway irá para 150 segundos

não deve haver restrição operacional, mesmo quando não há a disponibilidade de uma subestação

Catenária Rígida- considerada a resitividade de 15 m Ω / Km

Dois trilhos paralelos: 20 m Ω / Km

Os trilhos de rolamento são usados para o retorno de correntes e para minimizar as correntes de fuga, é adotada a estratégia de deixá-los flutuantes em relação ao terra

4. Tendências mundiais, pesquisas e normas

- Estudo comparativo realizado pelo Umraniye Metro M5, da cidade de Uskudar-Turquia.

Considerações

Simulações realizadas para 750 Vcc

Simulações realizadas para 1500 Vcc

Duração do ciclo 2 horas

Trens totalmente carregados (Full Load - FL)

Trens meio carregados (Half Load - HL)

Headway 150 s

Headway 300 s

5. Simulações e estudos em outros sistemas

- Estudo comparativo realizado pelo Umraniye Metro M5, da cidade de Uskudar-Turquia.

750 Vcc e 1500 Vcc - Consumo total x Perdas

| Carregamento | Hw | Tensão | | | | | | Dif. na energia Total 750 e 1500 |
|--------------|-----|--------------|--------|--------|--------------|--------|-------|-------------------------------------|
| | | 750 Vcc | | | 1500 Vcc | | | |
| | | Total | Perdas | % | Total | Perdas | % | |
| FL | 150 | 16087 | 1744 | 10,84% | 14612 | 704 | 4,82% | 9,17% |
| HL | 150 | 13978 | 1412 | 10,10% | 12562 | 570 | 4,54% | 10,13% |
| FL | 300 | 8995 | 857 | 9,53% | 7837 | 363 | 4,63% | 12,87% |
| HL | 300 | 7901 | 674 | 8,53% | 6970 | 280 | 4,02% | 11,78% |

A coluna “Total” representa a quantidade de energia em todo o sistema.

A coluna “Perdas” são valores calculados, levando-se em conta as correntes, distâncias, períodos e resistividades dos alimentadores de corrente contínua.

E perda (%) = E perdas / E consumida x 100

Conforme as simulações, para as duas horas de ciclos, a energia consumida do sistema em 750 Vcc seria de **16087 kWh**, e perdido no sistema **1744 kWh**. Neste caso, a perda de energia foi calculada como 10,84%.

Para a mesma condição, alimentado com 1500 Vcc, com aproximadamente o mesmo consumo total, a perda de energia foi de **704 kWh**, o percentual **4,82%**.

A “Diferença” no consumo da energia total (750 e 1500Vcc) é de no mínimo **9,17%**.

No caso : $(16087-14612)/14612=9,17\%$

6. A importância da definição da tensão em vazio das subestações

EN 50163

Table 1 – Nominal voltages and their permissible limits in values and duration

| Electrification system | Lowest non-permanent voltage U_{min2} V | Lowest permanent voltage U_{min1} V | Nominal voltage U_n V | Highest permanent voltage U_{max1} V | Highest non-permanent voltage U_{max2} V |
|---|---|---|-------------------------------|--|--|
| d.c. (mean values) | 400 | 400 | 600 ^a | 720 | 800 |
| | 500 ^c | 500 | 750 | 900 ^c | 1 000 |
| | 1 000 | 1 000 | 1 500 | 1 800 ^c | 1 950 |
| | 2 000 | 2 000 | 3 000 | 3 600 | 3 900 ^b |
| a.c. (r.m.s. values) | 11 000 | 12 000 | 15 000 | 17 250 | 18 000 |
| | 17 500 ^c | 19 000 ^c | 25 000 | 27 500 ^c | 29 000 |
| Special national conditions for France, see Annex B. | | | | | |
| ^a Future d.c. traction systems for tramways and local railways should conform with system nominal voltage of 750 V, 1 500 V or 3 000 V. ^b Special national conditions for Belgium, see Annex B. ^c Special national conditions for United Kingdom, see Annex B. | | | | | |

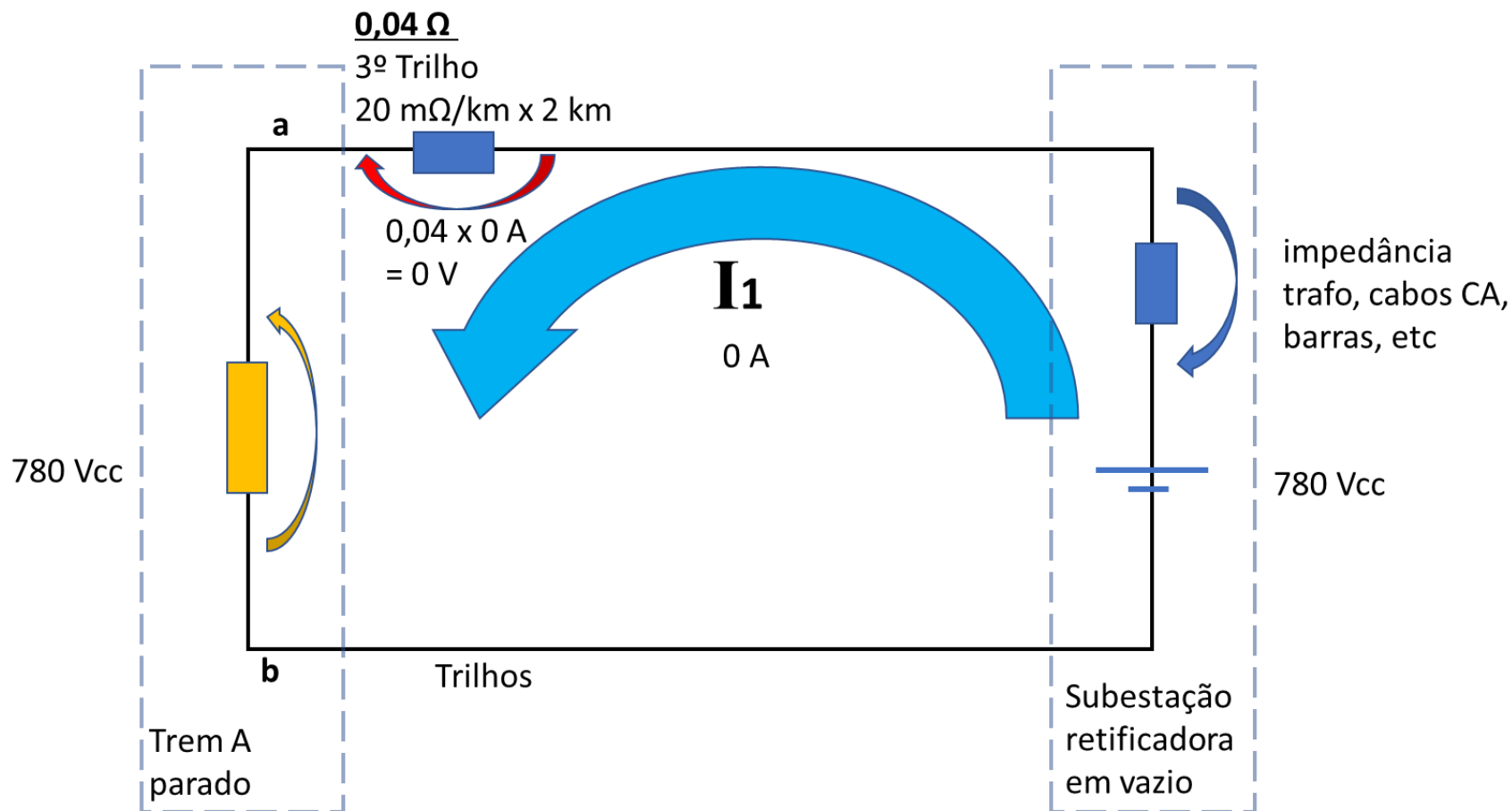
Item 4.1. c), da mesma norma :

A tensão em vazio, no barramento da subestação, deve ser menor ou igual a U_{max1}

Para subestações DC é aceitável ter esta tensão em vazio menor ou igual a U_{max2} , ciente de que quando o trem está presente, a tensão em seus pantógrafos deverá estar em conformidade com esta tabela 1

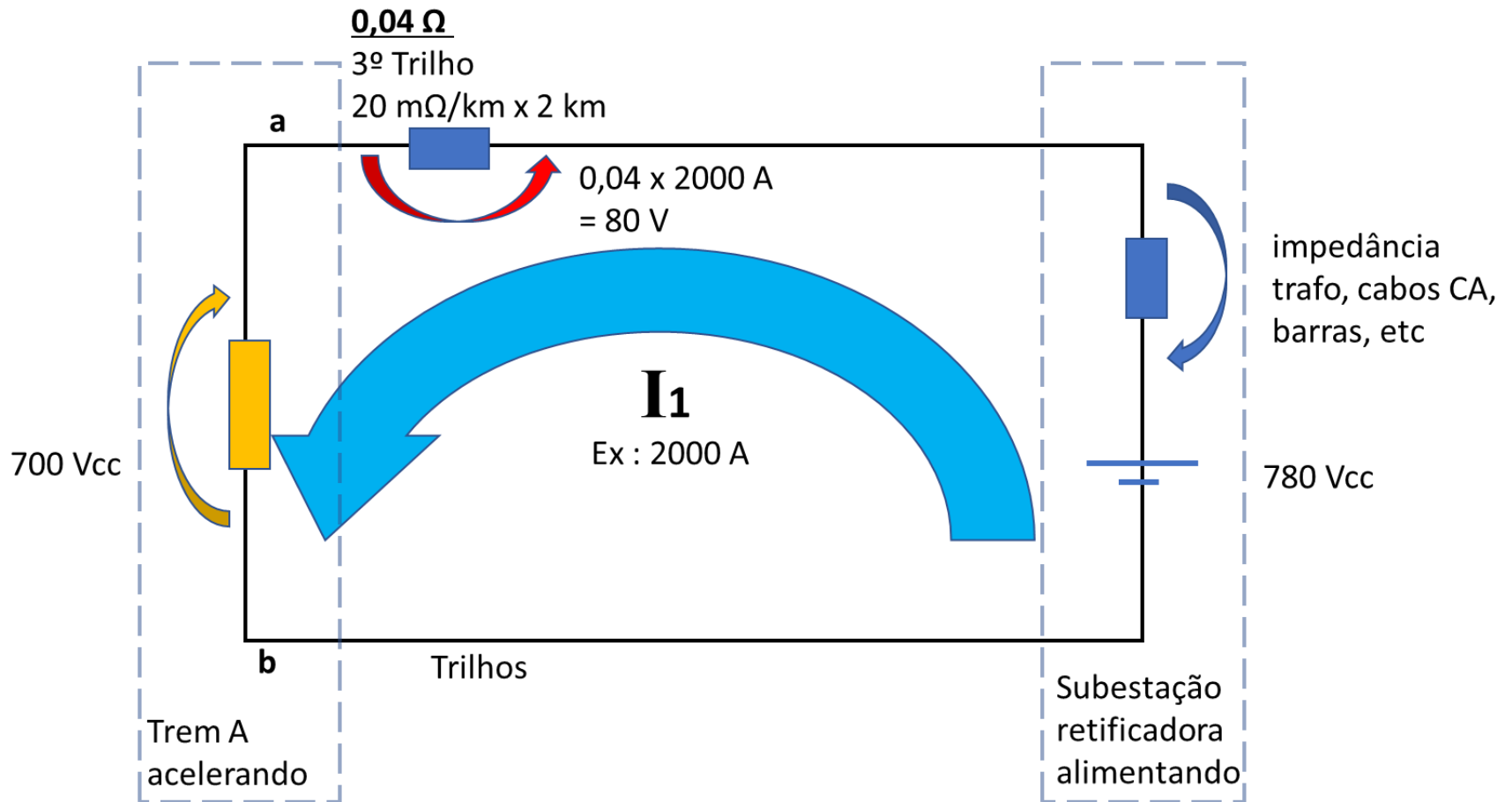
7. A dinâmica das tensões na subestação, vias e nos trens

7.1. Trem parado



7. A dinâmica das tensões na subestação, vias e nos trens

7.2. Trem acelerando

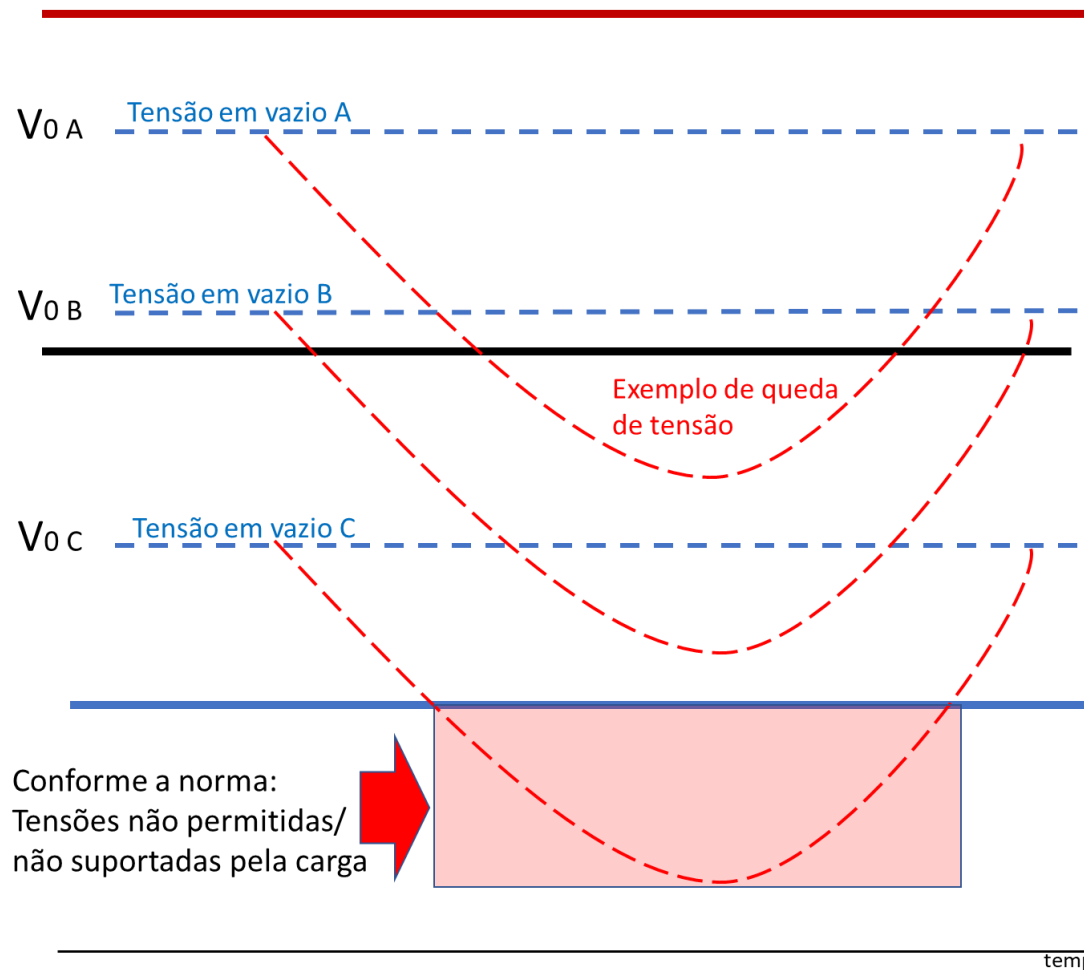


7. A dinâmica das tensões na subestação, vias e nos trens

Exemplos de tensões de linha com a carga do trem -----
(Trem acelerando)

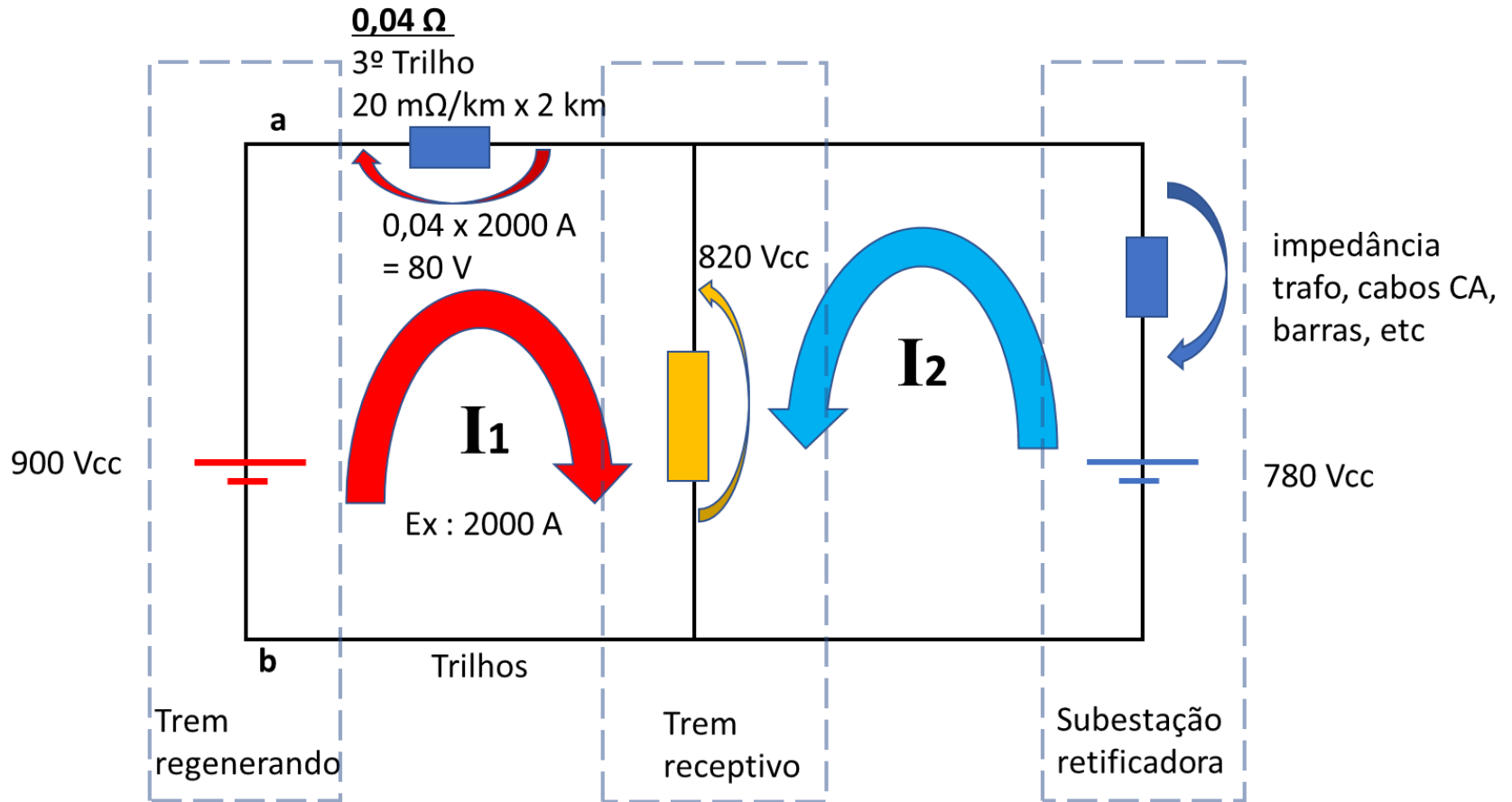
EN 50163

| | | |
|---------------------------|-----|------|
| Highest permanent voltage | 900 | 1800 |
| U_{max1} | | |
| Nominal voltage | 750 | 1500 |
| U_n | | |
| Lowest permanent voltage | 500 | 1000 |
| U_{min1} | | |



7. A dinâmica das tensões na subestação, vias e nos trens

7.3. Trem regenerando



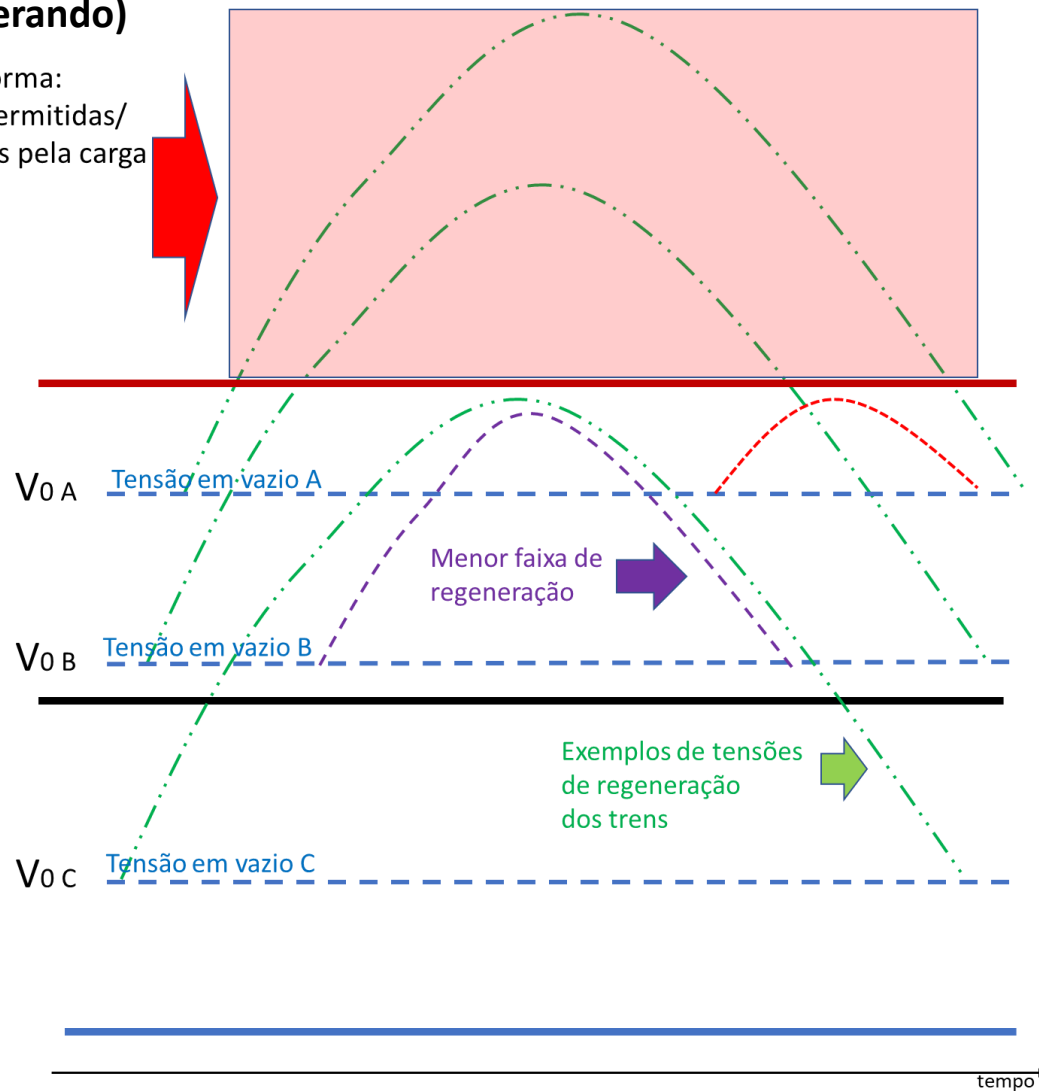
7. A dinâmica das tensões na subestação, vias e nos trens

Exemplos de Tensões de linha com a regeneração do trem (Trem regenerando)

Conforme a norma:
Tensões não permitidas/
não suportadas pela carga

EN 50163

| | | |
|---------------------------|-----|------|
| Highest permanent voltage | 900 | 1800 |
| U_{max1} | | |
| Nominal voltage | 750 | 1500 |
| U_n | | |
| Lowest permanent voltage | 500 | 1000 |
| U_{min1} | | |



8. Conclusões

8.1. Avaliação da tensão 750Vcc x 1500 Vcc

- Em sistemas metroviários do mundo, o nível da tensão de tração em 1500Vcc, apresenta uma maior tendência de utilização em relação ao 750Vcc.
- A perda de energia (por efeito Joule) em um condutor é proporcional ao quadrado da corrente circulante, como resultado dobrar o nível de tensão, reduz as perdas de energia para um quarto. Assim, as perdas elétricas nas linhas de contato (trilho de retorno e alimentador) serão menores em sistemas 1500 Vcc.
- Os custos de implantação (número de subestações) e de operação (custos de energia), podem ser menores nos sistemas 1500Vcc.

8. Conclusões

8.2. Determinação da “tensão em vazio”

- A boa escolha da “tensão em vazio” e a visão sistêmica (trens e subestações) de toda uma linha metroviária, estudos de engenharia e reajustes podem favorecer na economia de energia e eficiência energética, sem a necessidade de implantação de novos equipamentos
- A regeneração de energia dos trens deve ser favorecida pelos sistemas elétricos alimentadores, para permitir a troca de energia entre os trens.
- Tensões em vazio altas restringem a regeneração.
- Tensões em vazio baixas, restringem suportabilidade dos trens, devido às quedas de tensão nas linhas de contato em casos de contingências (falta de uma subestação)

8. Conclusões

8.3. Geral e estudos futuros

- O efeito operacional da aplicação dos critérios e políticas de economia de energia, são refletidos na diminuição dos custos mensais, que atualmente são buscados pela maioria dos estudos atuais, em várias publicações
- Como lições aprendidas, pudemos observar e constatar estes efeitos com as simulações elétricas e estudos internos do Metrô-SP
- Nas demais linhas de 1500 Vcc já implantadas devem ser observados e aferidos os efeitos
- Do ponto de vista social a situação da dependência humana de energia fóssil em curto período de tempo não mudará
- A indústria ferroviária tem o foco do desenvolvimento “eficiente” e principalmente buscando a conservação de energia para reduzir as emissões de CO₂

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. S. Açıkbaş, M. Turan Söylemez - Energy loss comparison between 750 VDC and 1500 VDC power supply systems using rail power simulation - Computers in Railways IX - 2004
2. Japan Subway Association, Subways of the World (Japanese), Tokyo, 2000.
3. Söylemez, M.T. & Açıkbaş, S., Multi-Train Simulation of DC Rail Traction Power Systems with Regenerative Braking, Submitted to COMPRAIL, 2004.
4. Popescu, Mihaela and Bitoleanu, Alexandru - A Review of the Energy Efficiency Improvement in DC Railway Systems – Energies Journal – 2019 - www.mdpi.com/journal/energies
5. IHS Janes Urban Transport Systems Yearbook – ed. 2016/2017, Surrey, HIS Global Limited, 2016, Anual
6. Brebbia, C.A.; Mera, J.M.; Tomii, N e Tzieropoulos, P. – COMPRAIL Railway Engineering, Design and Operation – WIT Press, United Kingdom; 2017
7. EN 50163:2004+A1 2007 - Railway applications. Supply voltages of traction systems
8. IEC-60850:2014 - Railway applications - Supply voltages of traction systems

10. Perguntas..



TRILHOS: EFICIÊNCIA E NOVOS RUMOS



OBRIGADO!

Albert Haga - Metrô-SP – ahaga@metrosp.com.br

Atilio Henrique Laudanna - Metrô-SP – alaudanna@metrosp.com.br

Massaru Saito - Metrô-SP – msaito@metrosp.com.br

