



11ª Semana de Tecnologia Metroferroviária - Fórum Técnico

Tema do Trabalho: O Dimensionamento Preliminar e Final de um Sistema de Tração.

1. INTRODUÇÃO

A grande interdependência entre as diversas etapas do projeto do sistema elétrico e dos outros sistemas e da obra civil de um Metrô requer a troca constante de informações obedecendo ao cronograma geral de projeto. Ao longo do desenvolvimento do projeto, não só é preciso dispor de dados relativos a outros sistemas, como também fornecê-los para o desenvolvimento de projetos de outras áreas.

Um exemplo típico disso é a necessidade de determinar o número, a localização e a área requerida para as subestações retificadoras e auxiliares, ainda que de forma aproximada, para subsidiar os projetos arquitetônico e civil, os quais muitas vezes se desenvolvem simultaneamente, ou mesmo precedem, os projetos de sistemas. Isso pode ocorrer sem que se disponha, ainda, de todos os dados de entrada requeridos para o dimensionamento do sistema elétrico, em especial os relativos ao material rodante e ao projeto geométrico das vias.

Para fazer frente a essa necessidade, deve-se não só ser capaz de fazer estimativas confiáveis de tais dados, avaliando corretamente o que pode ser aproximado ou desconsiderado num dimensionamento preliminar do sistema elétrico, como também adotar métodos e procedimentos de cálculo que sejam simples e expeditos e que permitam a obtenção de resultados com uma margem de erro aceitável.

A determinação das características básicas das subestações auxiliares é, normalmente, mais simples de ser realizada. Já o processo de determinação das subestações retificadoras ao longo da linha é mais complexo, inclusive pelas diversas alternativas que se apresentam, resumidas a seguir:

- Localização das subestações no interior das estações ou em áreas adjacentes à linha;

- Maior ou menor concentração de potência nas subestações;
- Determinação do número de grupos retificadores por subestação e sua potência nominal.

Esse será o ponto principal abordado neste trabalho, ou seja, a aplicação de um método preliminar de cálculo que permita definir as características principais de um sistema de tração e o confronto dos resultados assim obtidos com os resultados obtidos através de um programa de simulação.

2 O MÉTODO DE KORANYI DE DIMENSIONAMENTO

Trata-se de um método simples e rápido para o dimensionamento de sistemas de tração, apresentado por Laszlo De Koranyi no IEEE Transactions no ano de 1965 que será apresentado resumidamente a seguir usando a mesma nomenclatura apresentada no artigo.

2.1 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

Uma das primeiras definições diz respeito à tensão nominal da linha de contato, que no caso aqui apresentado será de 1500V c.c. O próximo passo é a determinação das correntes dos trens que será usada nos cálculos, a qual tem duas componentes: a corrente de propulsão ou motriz e a corrente dos auxiliares do trem (iluminação, ventilação ou ar condicionado)

Uma das dificuldades no cálculo dos fluxos de potência (simulação elétrica) num sistema de tração cuja carga é constituída pela potência absorvida pelos trens é a sua variação ao longo do tempo, tanto em posição como em intensidade. Nisso ela difere de um load-flow de uma rede de distribuição em corrente alternada em que as potências ($P + jQ$) são associadas a barras de carga fixas.

Tanto para as simulações elétricas como para a aplicação do Método De Koranyi, essas correntes são obtidas da simulação de marcha dos trens. Essas simulações podem ser feitas com dados de entrada mais ou menos precisos, dependendo do conhecimento que se tem dos mesmos numa determinada etapa do projeto e da precisão requerida nessa etapa. Como resultados são obtidos:

- A duração de uma corrida entre estações (incluindo o tempo de parada na estação) T;

- Os valores instantâneos da corrente e da distância em função do tempo;
- O valor da corrente média e da corrente eficaz no tempo T;
- A corrente de pico e sua duração;

Para a simulação elétrica, a partir desses resultados é estabelecida a grade horária para as condições de maior carregamento do sistema, ou seja, com o menor headway diário. No método simplificado são introduzidas algumas simplificações na determinação das correntes descritas resumidamente a seguir. No gráfico da Figura 2 do item 2.2, observa-se que o trem absorve a maior parte da sua energia enquanto ainda está próximo da estação de onde partiu. Isso permite assumir a carga total do percurso entre 2 estações como estando localizada na estação de onde o trem partiu.

A corrente média da subestação (I_{avg}) é obtida do produto do número médio de trens por subestação (N) pela corrente média do trem (i_{avg}).

A corrente eficaz da subestação (I_{rms}) por sua vez será calculada através da fórmula:

$$I_{rms} = (N + \Delta) i_{avg} , \text{ onde } \Delta = c (f - 1) \text{ é o incremento de forma.}$$

A constante c é obtida da tabela 1 seguinte.

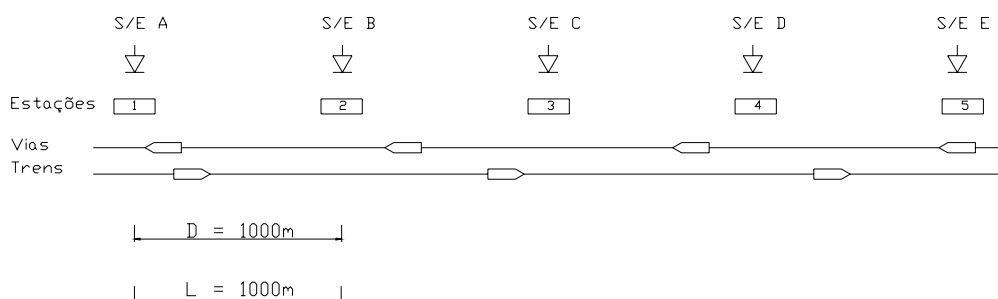
Tabela 1 : Constante c para cálculo do incremento de forma Δ

Esquema de localização das subestações	n	Constante c
Na estação	1	1,25
	2	0,90
	≥ 3	0,85
Entre estações	≥ 3	0,85
	2	0,80
	1	0,65

O método propõe também procedimentos simples para o cálculo das correntes de pico e para a determinação das quedas máximas de tensão na linha. No exemplo de cálculo a seguir é dada ênfase à questão da determinação da potência básica do grupo a partir da carga em regime.

2.2 EXEMPLO DE CÁLCULO

A linha e a configuração do sistema que serão consideradas neste exemplo de cálculo são mostradas no diagrama da figura 2, com uma subestação retificadora localizada em cada estação. Também é apresentado no artigo o esquema em que as subestações localizam-se a meio caminho entre as estações.



Ddistância entre estações

Ldistância entre subestações

Figura 1: Esquema de suprimento com subestações localizadas nas estações.

A linha considerada tem espaçamentos iguais de 1 km entre as estações. O artigo apresenta também um procedimento baseado no uso de polígonos funiculares para casos em que as distâncias entre as estações não são uniformes.

Para esse trecho típico de 1000m foi feita simulação de marcha do trem, tendo sido obtida a curva do gráfico da Figura 2. Nessa simulação não foram consideradas as resistências ao movimento devidas às rampas e às curvas do traçado, o que facilita bastante o levantamento de dados para a marcha. Essa aproximação deve ser avaliada caso a caso, dependendo da linha em estudo. Um meio termo razoável é considerar somente as rampas, visto que as curvas em Metrô modernos geralmente tem grandes raios de curvatura.

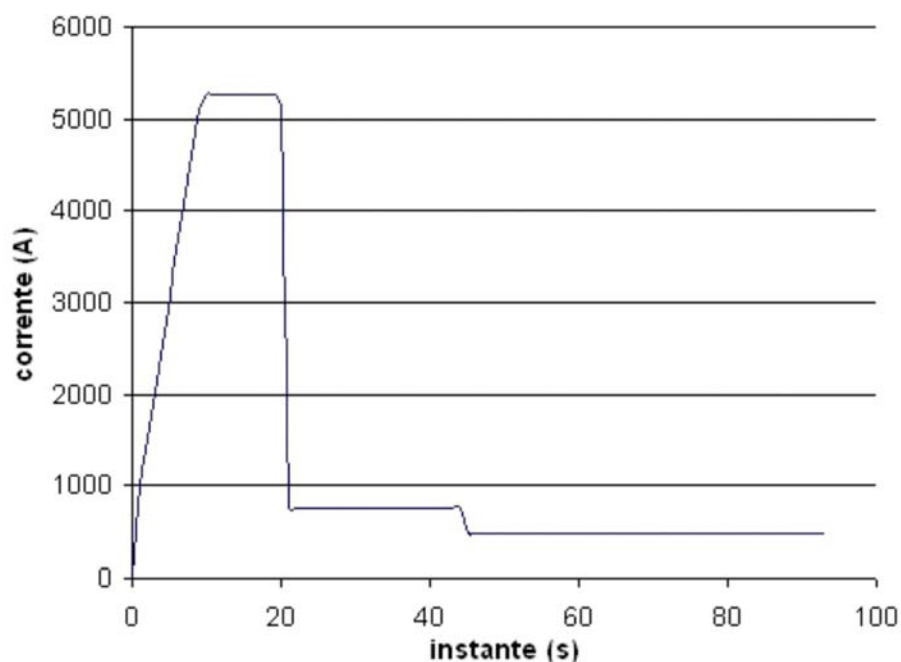


Figura 2: Correntes instantâneas do trem.

Dessas simulações foram obtidos os seguintes resultados que serão usados no dimensionamento:

- Tempo de percurso (T), incluindo parada na estação.93,4s
- Corrente média do trem (i_{avg})1320 A
- Corrente eficaz do trem (i_{rms}) 2050 A

A partir dessas correntes foi calculado o fator de forma do trem (f) igual a aproximadamente 1,55.

Da aplicação das fórmulas resultaram os seguintes valores, considerando o headway (T_h) de 110s :

- Número de trens por subestação: $N = 1,4$
- Incremento de forma, para $c = 1,25$, obtido da Tabela 1: $\Delta = 0,69$
- Corrente média da subestação: $I_{avg} = 1,85$ kA
- Corrente eficaz da subestação: $I_{rms} = 2,76$ kA

3 **VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS**

Através da rodagem de programa de simulação elétrica realizada com os dados de entrada obtidos da simulação de marcha e com grade horária feita para o headway de 110s, foi obtida um corrente eficaz da ordem de 2.200 A na subestação retificadora. Deve ser ressaltado que nas subestações das extremidades da linha foram obtidos valores um pouco inferiores aos obtidos para as outras subestações.

Confrontando esse valor com o que foi obtido através da aplicação do método, ou seja, 2760 A, verifica-se que no caso analisado o resultado obtido com o método foi conservativo, aproximadamente 25% superior ao obtido com o programa.

Essa diferença é, em parte, devida às características particulares da linha fictícia que foi considerada no estudo, que é relativamente curta. A tendência é que em linhas mais extensas ocorra a redução dessa diferença.

De qualquer forma, pode-se sempre esperar por resultados um pouco conservativos da aplicação de métodos simplificados, o que está do lado da segurança no que se refere ao dimensionamento do sistema. Isso também ressalta a necessidade de um dimensionamento mais acurado com programas de simulação, com dados também mais precisos, numa fase posterior do projeto.

4 **DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA**

A partir da corrente eficaz calculada pode ser igual a até 150% da corrente nominal (I_r) do grupo retificador. Os grupos são dimensionados para suportar até 150% da corrente nominal por um período de 2 horas, o que coincide aproximadamente com a duração dos períodos de pico diários dos horários de “rush”. Assim sendo, a capacidade básica da subestação (I_b) deve satisfazer a equação:

$$I_b \geq 2/3 I_{rms}$$

O dimensionamento da subestação depende ainda da carga de pico prevista. Conforme já referido, o método apresenta um procedimento simplificado para a sua determinação, baseado na simultaneidade de partidas de trens. Conforme a classe de carregamento escolhida, os grupos suportarão as sobrecargas especificadas em norma durante períodos de curta duração. Assim por exemplo se for adotada a classe “extra heavy traction”, conforme exemplificado no artigo pela norma NEMA, os grupos deverão suportar a sobrecarga de 450% durante 15s. A capacidade básica nesse caso deve ser:

$$I_b \geq I_p / 4,5$$

O valor a ser escolhido para I_b será o maior dentre os 2 calculados, para as condições de regime e de pico. A capacidade básica da subestação em kW será igual ao produto de I_b pela tensão E_s .

Atualmente tem sido usada a norma IEC 146 para a escolha da classe de sobrecarga, eventualmente com a opção pela classe “Heavy Traction” que especifica sobrecarga de 300% com duração de 1 minuto, num ciclo de carregamento especificado na norma.

Outro aspecto que também é abordado é a determinação das quedas de tensão na linha de contato, que pode ser o terceiro ou a rede aérea, e que deverá ser levada em conta na determinação das tensões mínimas para o trem, que deverão ficar dentro da faixa de operação especificada.

Atualmente, com o desenvolvimento da tecnologia da rede aérea rígida, a tendência é a escolha de tensões superiores a 1000V, como o 1500 Vcc e mesmo o 3000Vcc, que permitem um maior espaçamento entre as subestações. Essa utilização era em muitos casos limitada pelo custo adicional da obra civil com o uso da catenária convencional. No caso do exemplo fictício aqui apresentado, não houve a preocupação com a otimização da distância entre subestações para a tensão de 1500 Vcc. Num dimensionamento completo, outros aspectos devem, também, ser levados em conta como as tensões máximas no retorno, cujos valores e tempo de ocorrência são especificados em norma e a questão das correntes de fuga provenientes do sistema de tração, também relacionadas com o espaçamento entre as subestações retificadoras.

5 **CONCLUSÕES**

Resumindo as observações dos itens anteriores, o uso de um método simplificado como o que foi aqui apresentado tem a utilidade de permitir uma primeira avaliação do sistema elétrico e estabelecer uma concepção que será desenvolvida com mais detalhes em etapas posteriores do projeto. A utilidade da aplicação de um método simplificado também se faz sentir quando existe a necessidade de contratar a simulação elétrica do sistema com terceiros, evitando essa contratação já numa fase inicial do projeto, com uma redução de custo, ficando as simulações para uma etapa posterior do projeto.

Devem, contudo, ser tomados alguns cuidados na análise dos resultados assim obtidos, levando em conta que os mesmos são conservativos e que, em alguns casos, podem apresentar distorções.

Uma alternativa interessante, desde que se disponha dos programas de simulação necessários, é fazer simulações preliminares com dados simplificados, visto que isso reduz o trabalho de preparação dos arquivos de dados.

Uma consideração final importante refere-se aos casos de contingência para o dimensionamento do sistema, que devem ser estabelecidos a partir critérios técnico-econômicos relacionados com a aceitação de restrições operacionais ao tráfego dos trens na perda de um elemento do sistema como uma subestação ou grupo retificador. Sob esse aspecto, a utilização de programas facilita bastante o trabalho, permitindo a análise de grande número de situações num tempo relativamente curto.

Curriculum

Vito Labate Neto

Engenheiro eletricitista formado pela Escola de Engenharia Mackenzie no ano de 1967. Funcionário da Companhia do Metropolitano de São Paulo de 1970 a 1974, acompanhou o projeto e a implantação da Linha 1 Azul. Desde então tem atuado em diversas empresas de consultoria, principalmente em projetos de sistemas elétricos metroferroviários. É consultor da empresa TRENDS desde o ano de 1998.

O Dimensionamento Preliminar e Final de um Sistema de Tração Metroferroviário.

Eng. VITO LABATE NETO

A Importância do Dimensionamento Preliminar do Sistema Elétrico:

- **A necessidade de transmitir informações para a obra civil nas etapas iniciais do cronograma de projeto**
- **As informações de outros sistemas e do empreendimento como um todo, requeridas para o dimensionamento preliminar do sistema elétrico.**
- **O valor de um cronograma geral de projeto do empreendimento que leve em conta todas essas interfaces.**

Principais informações requeridas pelo projeto civil e arquitetônico

- **Localização das subestações retificadoras ao longo da linha: no interior das estações ou em áreas adjacentes;**
- **Nº de subestações retificadoras e área aproximada requerida para a sua instalação;**
- **Localização das subestações de serviços auxiliares no interior das estações de passageiros e no Pátio: determinação da área aproximada requerida;**
- **Acesso dos equipamentos de grande porte;**
- **Grandes passagens de cabos.**

O Dimensionamento do Sistema Elétrico:

- Métodos simplificados para o dimensionamento preliminar do sistema elétrico com base em dados estimados;
- Programas de simulação:
 - Simulação de marcha do trem;
 - Determinação da grade horária;
 - Simulação elétrica;

O MÉTODO DE KORANYI

- Método simples e expedito para o dimensionamento de sistemas de tração;
- Apresentado por Laszlo De Koranyi no IEEE Transactions on Industry and General Applications, no ano de 1965;
- Parte do princípio de que o requisito fundamental para um sistema de fornecimento de energia metroviário é disponibilizar, durante todo o tempo, a potência requerida pelos trens dentro de uma faixa de tensão especificada.
- Utiliza alguns resultados da simulação de marcha para fazer o dimensionamento, a partir de procedimentos simplificados para a determinação das correntes e quedas de tensão;

Principais Premissas do Método De Koranyi para o cálculo das correntes nas subestações:

- **Concentra a carga do trem na estação de onde ele partiu, com base na curva típica do consumo de corrente no percurso entre 2 estações. Essas curvas mostram que o trem absorve a maior parte da sua energia enquanto ainda está próximo da estação de onde partiu;**
- **Determina um número médio de trens por subestação que será usado no cálculo das correntes médias e eficazes das subestações**

Dados e informações requeridos para determinação das cargas de tração para as simulações de marcha do trem:

- **Material rodante:**
 - Número de carros/trem;
 - Peso do carro carregado;
 - Curva do motor;
 - Número de motores/carro;
 - Taxas de aceleração e frenagem.
- **Equações da resistência ao movimento dos trens (Davis) .**
- **Perfil da linha:**
 - Rampas;
 - Curvas;
 - Localização das estações.
- **Tempos de parada nas estações e de reversão nos terminais**

Premissas simplificadoras assumidas na maior parte dos programas de simulação:

- **Tensão constante para o trem ao longo da linha;**
- **Todos os trens completamente carregados;**
- **Não é considerada a regeneração (premissa conservativa do ponto de vista do dimensionamento do sistema elétrico)**

Principais Resultados Obtidos das Simulações de Marcha do trem, utilizados no dimensionamento do sistema elétrico:

- **A duração das corridas entre estações (T), incluindo o tempo de parada;**
- **Os valores instantâneos da corrente e da distância em função do tempo;**
- **O valor médio da corrente no tempo T;**
- **O valor eficaz da corrente no tempo T;**
- **O valor da corrente de pico e sua duração.**

Determinação das correntes das subestações retificadoras:

- **A corrente média I_{avg} ;**

$$I_{avg} = N \times i_{avg}$$

onde:

i_{avg} é a corrente média do trem.

N é o número médio de trens por subestação

- **A corrente eficaz I_{rms} ;**

$$I_{rms} = (N + \Delta) i_{avg}$$

Δ é o incremento de forma obtido da equação:

$$\Delta = c (f - 1)$$

onde:

f é o fator de forma do trem

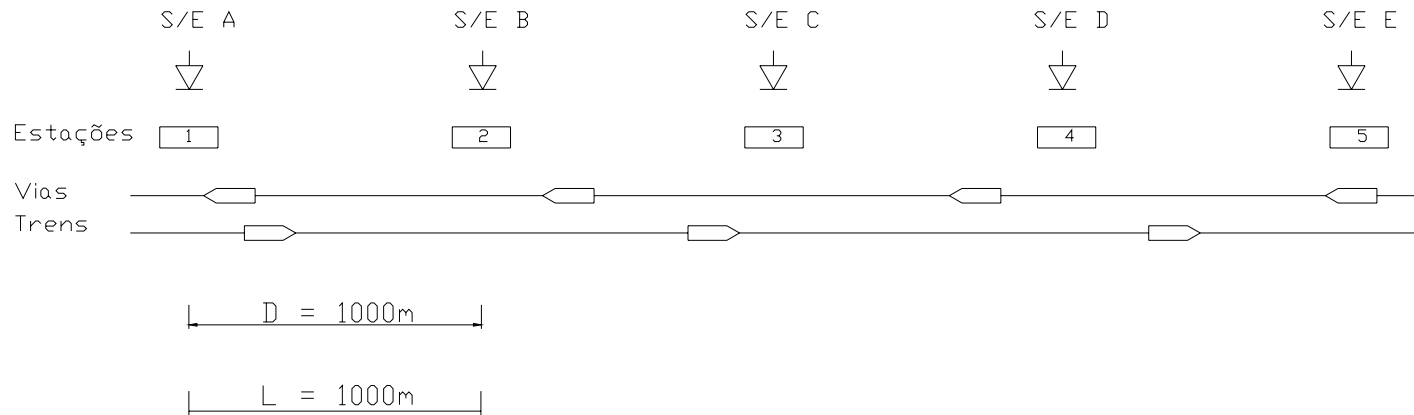
c é uma constante

Determinação da constante c

Tabela 1 : Constante c para cálculo do incremento de forma

Esquema de localização das subestações	n	Constante c
Na estação	1	1,25
	2	0,90
	≥ 3	0,85
Entre estações	≥ 3	0,85
	2	0,80
	1	0,65

Exemplo de Cálculo



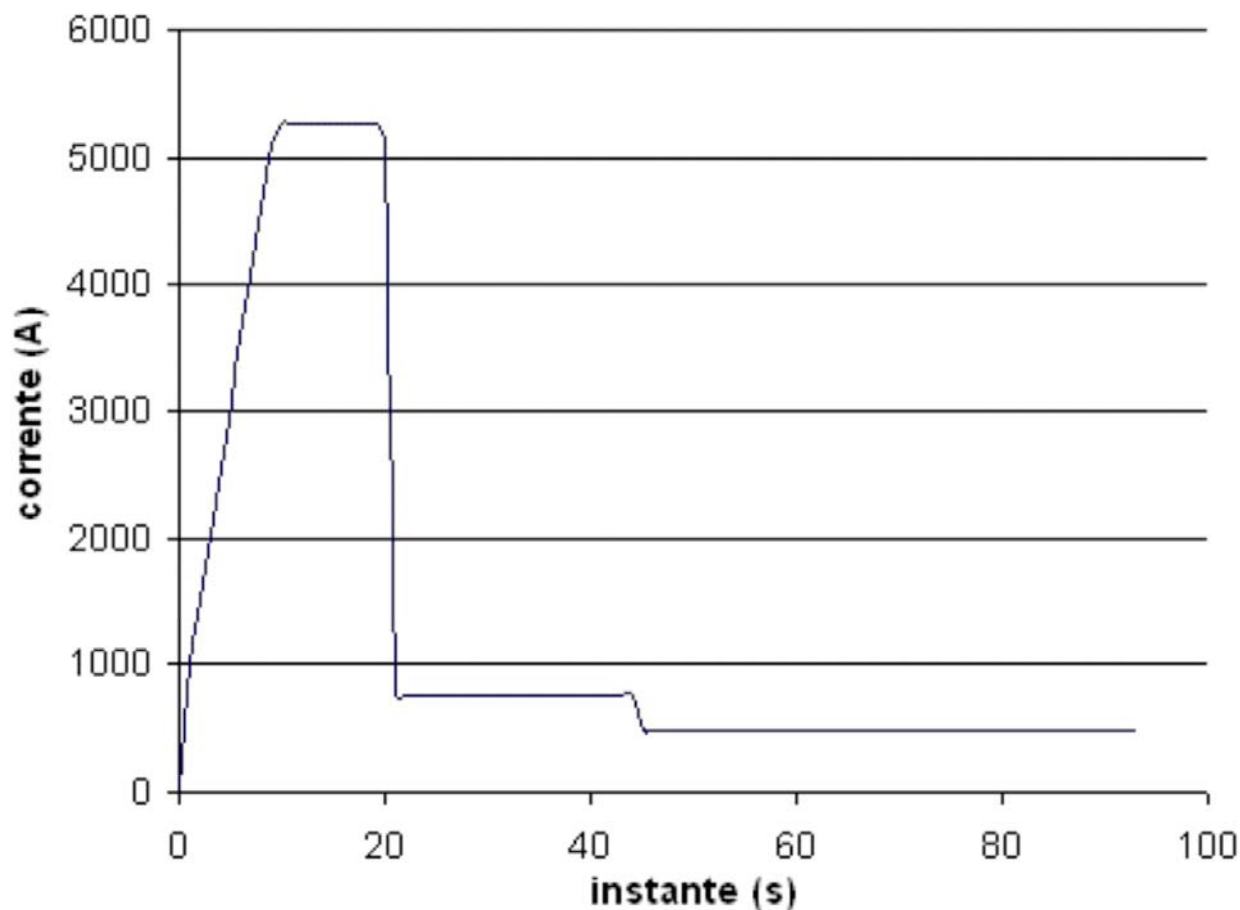
Ddistância entre estações

Ldistância entre subestações

Características da linha fictícia e do sistema de tração a serem dimensionados:

- **Esquema de suprimento de suprimento com subestações localizadas nas estações (o método também considera o esquema com subestações a meio caminho entre as estações);**
- **Linha com espaçamentos iguais de 1000 m entre as estações (o método também pode ser aplicado para linhas com espaçamentos não uniformes, com o uso de polígonos funiculares)**
- **Uma retificadora por estação**

Curva corrente x tempo para a corrida entre estações, incluindo a parada.



- Na simulação de marcha foi considerado um traçado simples, sem rampas e curvas;
- Resultados da simulação de Marcha:
 - Tempo de percurso (T), com parada na estação: 93,4s;
 - Corrente média do trem: 1320 A;
 - Corrente eficaz do trem: 2050 A

Resultados obtidos com a aplicação do Método para a linha do exemplo:

- Número de trens por subestação: $N = 1,4$
- Incremento de forma, para $c = 1,25$, obtido da tabela: $\Delta = 0,69$;
- Corrente média da subestação: $I_{avg} = 1,85 \text{ kA}$
- Corrente eficaz da subestação: $I_{rms} = 2,76 \text{ kA}$

Resultado obtido da simulação elétrica, com os mesmos dados da marcha e com grade preparada para o headway de 110s:

- Corrente eficaz da subestação: $I_{rms} = 2,2 \text{ kA}$

Diferença aproximada: 25 %

Dimensionamento do Sistema:

- **Capacidade básica da subestação – deve ser escolhido o maior dentre os dois valores abaixo:**
 - Em regime (150% de sobrecarga): $I_b \geq 2/3 I_{rms}$
 - Pico (com 450% de sobrecarga): $I_b \geq I_p / 4,5$
- **Norma IEC 146:**
 - “Extra Heavy Traction”: (450% de sobrecarga)
 - “Heavy Traction”: (300% de sobrecarga)

Outros critérios de dimensionamento – quedas de tensão na rede aérea ou terceiro trilho e no retorno:

- **Tensão mínima no trem;**
- **Tensão máxima no retorno**

Conclusão:

- **Uso de métodos simplificados**

- Resultados conservativos;

Deve ser feita análise dos resultados para evitar distorções em casos particulares;

- **Alternativa: Simulações com dados de entrada simplificados (redução do trabalho na preparação dos arquivos de dados de entrada);**
- **Simulações possibilitam a análise completa e rápida dos casos de contingência admitidos.**

Muito Obrigado!!!

Eng. VITO LABATE NETO
vito.labate@trendseng.com.br