



11ª Semana de Tecnologia Metroferroviária – Fórum Técnico

Simulação digital do sistema de tração elétrica: conceituação, métodos e evolução

Cassiano Lobo Pires, Silvio Ikuyo Nabeta e José Roberto Cardoso

Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LMAG) do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas (PEA) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Lista de símbolos

F_{freio}	esforço produzido pelo freio mecânico	[kN]
F_{motor}	esforço produzido pelos motores de tração	[kN]
$\mathbf{G}$	matriz das condutâncias nodais	[S]
hdw	headway (tempo entre trens)	[s]
$\mathbf{I}$	vetor das fontes de corrente equivalentes	[A]
m	massa do trem	[t]
n_T	número de trens	[1]
R_C	resistência devido às curvas	[kN]
R_i	resistência devido às rampas	[kN]
R_{MPT}	resistência ao movimento em nível e tangente	[kN]
s	posição	[m]
t	tempo	[s]
t_C	tempo de ciclo veicular	[s]
$\mathbf{U}$	vetor das tensões nodais	[V]
V	velocidade	[km/h]
ξ	fator de inércia das massas girantes	[1]

1. Introdução

As características de operação do sistema de tração elétrica podem ser pré-determinadas através de sua simulação a partir de modelos matemáticos. A simulação digital é uma importante ferramenta de apoio ao projeto e permite um ensaio das alternativas a custo reduzido, viabilizando uma posterior comparação das mesmas.

A simulação do sistema de tração elétrica compreende, basicamente, três simulações: simulação de marcha, simulação de tráfego e simulação elétrica. A partir da geometria da via e das características da composição é feita primeiramente uma simulação de marcha para que sejam determinadas as características elétricas e cinemáticas do movimento de um trem. Após a simulação de marcha, dada as características operacionais da linha, é feita uma simulação de tráfego obtendo-

se um diagrama horário que corresponde à operação simultânea das composições necessárias ao sistema. A simulação elétrica então distribui as composições ao longo da linha de acordo com o diagrama horário juntamente com outros elementos como subestações retificadoras e calcula as correntes e tensões neste sistema de alimentação em cada instante de tempo [1, 2]

A simulação do sistema de tração elétrica não é uma idéia nova. Desde as primeiras instalações de bondes elétricos no final do século XIX, um projeto de tração tinha a finalidade de determinar a marcha dos veículos sobre as linhas eletrificadas e a energia que estes veículos necessitavam. Além da energia e da potência consumidas, um projeto de tração contemplava também um estudo sobre a circulação dos vários veículos na linha e o estabelecimento de um gráfico horário.

As primeiras simulações envolviam cálculos analíticos bastante simplificados. Não demorou muito até que os métodos gráficos surgissem. Métodos gráficos como o de Kopniaeff e o do Prof. Antonio Carlos Cardoso foram bastante empregados no Brasil para a simulação de marcha. A associação entre tensão elétrica e momento fletor também fez com que desde cedo a grafo-estática fosse aplicada na simulação elétrica.

O processo trabalhoso da simulação de marcha deu espaço para o surgimento de soluções automatizadas e mais rápidas de resolver o problema. Apesar da utilização bem sucedida de métodos analógicos no início da década de 50, o surgimento dos computadores digitais fez com que, no final da mesma década, as primeiras simulações digitais fossem realizadas. As técnicas digitais só foram empregadas à simulação elétrica depois da década de 60, quando os métodos de fluxo de potência das redes elétricas em corrente alternada foram amplamente estudados.

2. Simulação de marcha

2.1. Equação do movimento

O movimento de um trem, submetido às leis gerais da Mecânica. Quando se trata de um estudo de tração elétrica basta examinar o movimento progressivo do trem reduzido a um ponto material dotado de um certo grau de liberdade ao longo da via. O equacionamento do movimento de um trem de massa m constante durante a sua trajetória entre duas estações pode ser dado através da Segunda Lei de Newton do movimento. Assim, durante o regime de tração é válida a seguinte equação [3, 4]:

$$F_{motor} - (R_{MPT} \pm R_i + R_C) = \xi \cdot m \cdot \frac{dV}{dt} \cdot \frac{1}{3,6} \quad (1)$$

Durante o regime de freagem, a eq.(1) é modificada para:

$$F_{motor} - F_{freio} - (R_{MPT} \pm R_i + R_C) = \xi \cdot m \cdot \frac{dV}{dt} \cdot \frac{1}{3,6} \quad (2)$$

Cada membro da eq.(1) e da eq.(2) devem ser detalhados.

O fator ξ leva em conta o efeito da inércia rotacional de peças girantes como eixos montados, rodas, rotores dos motores e mecanismos de transmissão na massa m . Seu valor varia entre 1,06 e 1,30, sendo que 1,10 é o mais usual [1].

A resistência ao movimento R_{MPT} são aquelas resistências elementares da toda natureza que, em nível e tangente, se opõem ao movimento do trem e são absolutamente inevitáveis [5]. Estas resistências elementares são agrupadas em uma resistência global e calculadas através de fórmulas empíricas que são sempre um trinômio em função da velocidade V . As fórmulas mais conhecidas [3, 4, 5] são dadas por W. J. Davis Jr. [6] e por G. Strahl [7].

A resistência devido às rampas R_i é causada pela componente tangencial do peso do trem paralela à rampa. Seu valor é positivo em um aclave e negativo em um declive, sendo este o único caso de resistência negativa. Por sua vez, a resistência ao movimento R_C aparece quando o trem percorre uma curva. Sua causa é a solidariedade de rodas e eixos, paralelismo dos eixos e força centrífuga. Nota-se que valor destas duas resistências depende da posição s do trem.

Quando um trem entra em uma rampa ou uma curva, irá demorar algum tempo até que o mesmo encontre-se totalmente neste perfil. Deste modo, três modelos para os trens são possíveis: trem pontual, massa volumétrica homogênea e massa volumétrica heterogênea [8]. No modelo pontual, este efeito de entrada não é levado em conta pois é considerado que toda a massa do trem está concentrada no seu centro de gravidade. Já no modelo de massa volumétrica homogênea e de massa volumétrica heterogênea este efeito é levado em conta. O primeiro considera que o trem possui sua massa uniformemente distribuída ao longo do seu comprimento e o segundo considera que o trem possui seções de mesma densidade que, normalmente, são os diversos veículos que compõem este trem.

O esforço motor F_{motor} provém do conjugado que os motores de tração produzem em seus pinhões e que chegam às rodas através de um conjunto de engrenagens conhecido como transmissão. O valor deste esforço é positivo durante o regime de tração e negativo durante o regime de freagem. Diretamente relacionado a este esforço está a corrente consumida pelo trem.

Há, basicamente, dois modelos para a representação do esforço motor e da corrente consumida pelo trem: o modelo físico e o modelo através de diagramas em função da velocidade [9]. O modelo através de diagramas, é proveniente do modelo físico e trata o acionamento do trem como uma função de transferência na qual para uma dada velocidade desenvolvida pelo trem, há um esforço motor e uma corrente associada (ou uma potência elétrica). Nota-se então que o ponto forte deste modelo é a simplicidade. Por sua vez, o modelo físico é mais complicado pois requer informações detalhadas a respeito dos motores de tração, do chaveamento dos tiristores e de outros componentes que possam influenciar no movimento do trem. Como vantagem, o modelo físico fornece tensões e correntes nos vários pontos do circuito do acionamento além de possibilitar o estudo do aquecimento dos vários componentes.

Por fim, durante a freagem, há um acréscimo de esforço F_{freio} devido ao uso de freios mecânicos que complementam a freagem elétrica fornecida pelos motores de tração.

2.2. Resolução da equação do movimento

Através da eq.(1) e da eq.(2) pode-se notar a complexidade onde os resultados de aceleração, velocidade e posição s no instante t são também variáveis. Nota-se que a solução analítica, mesmo através de computadores, é um processo trabalhoso pois os esforços motor e resistente dependem da velocidade e da posição na qual se encontra o trem. Deste modo várias simplificações foram adotadas ao longo do tempo. As mais antigas ajustam F_{motor} a uma função (reta e depois hipérbole) e consideram as resistências como uma constante através da utilização do conceito de perfil equivalente encontrado em [1, 5]. Em [8] são apresentadas outros tipos de simplificações, já adaptadas à solução por computadores. Por exemplo, em um intervalo de tempo os cálculos podem ser feitos levando-se em conta uma velocidade ou uma aceleração constante. Pode-se também fazer com que a aceleração seja uma função da velocidade ou do tempo através de relações definidas ou empíricas.

Entretanto, os métodos numéricos de resolução de equações diferenciais são os mais precisos. Métodos como o de Euler, os métodos de Runge-Kutta e o método de Heun fazem com que seja possível, a cada passo, a avaliação precisa das resistências e do esforço motor utilizando-se as variáveis s e V calculadas no passo anterior.

3. Simulação de tráfego

Um dos resultados fornecidos pela simulação de marcha é a trajetória do trem ou seja, uma representação gráfica de $s(t)$ no plano (s, t) . É fornecido também o tempo de ciclo veicular t_C ou

seja, o tempo que o trem leva para sair de uma base de operacional, percorrer a linha inteira parando em todas as estações até a última delas, reverter e retornar à origem.

Com esta informação pode-se dimensionar o número de trens que compõem a frota de uma linha ou então estabelecer um headway (tempo entre trens) através da equação:

$$hdw = \frac{t_c}{n_T} \quad (3)$$

É importante observar que a simulação de tráfego aqui tratada é uma simulação que pode-se dizer simples pois leva em conta apenas um tipo de trem e também um headway uniforme. Entretanto, estas considerações são válidas para o transporte urbano de passageiros.

4. Simulação elétrica

A simulação elétrica da rede de alimentação nada mais é que a solução do circuito equivalente do sistema de tração montado a cada instante de tempo cujas posições e potências desenvolvidas por cada trem neste instante de tempo são dadas pela simulação de tráfego.

Este circuito elétrico equivalente envolvendo modelos para trens, subestações retificadoras, cabines de paralelismo, linha de contato e sistema de aterramento é um circuito complexo cuja solução depende da montagem das equações que permitem a sua análise. Esta montagem pode ser feita através da análise de malhas ou da análise nodal e suas variantes.

Na análise nodal todos os elementos são modelados em termos de fontes de corrente e condutâncias. Assim, a representação dos trens pode ser feita através de uma fonte de corrente ideal. As subestações podem ser representadas através de uma fonte de tensão de valor constante igual à tensão em vazio ligada em série com sua resistência interna que são depois convertidas em um gerador de Norton [1,2].

Os circuitos equivalentes do sistema de tração mais simples analisam a linha inteira (normalmente composta por duas vias) como um único circuito no qual as resistências da rede de alimentação e do circuito de retorno são consideradas como uma única resistência em série. Um refinamento deste circuito é a separação das resistências do circuito de alimentação e do circuito de retorno e a separação entre os circuitos das vias. A complexidade do circuito pode ser ainda maior se forem incluídos as células finitas que incorporam os modelos de aterramento do tipo dois ou três terras, desenvolvidos em [10].

Após a montagem do circuito, o resultado é um sistema linear do tipo:

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{I} \quad (4)$$

Entretanto, o modelo de um trem e da subestação através de fontes de corrente não contempla os casos de receptividade parcial da linha no caso da freagem regenerativa, nem o caso da corrente fluir do sistema para dentro da subestação retificadora. O primeiro caso pode ser resolvido através da substituição do modelo de fonte ideal de corrente por um modelo de fonte de tensão, de valor igual à tensão máxima permitida pelo sistema [11]. O segundo, pode ser também a substituição da fonte de corrente por uma fonte de tensão ideal de valor igual à tensão em vazio da subestação.

A inclusão destas fontes de tensão traz uma complicação pois não se pode aplicar a Lei das Correntes de Kirchhoff aos nós conectados a fontes de tensão. O que se pode fazer é considerar as correntes nas fontes como incógnitas suplementares, acrescentando-se no sistema linear da eq.(4) uma equação por fonte em um processo conhecido como análise nodal modificada.

A resolução numérica do sistema linear da eq.(4) pode ser feita através de métodos diretos ou através de métodos iterativos. Historicamente, os métodos diretos como a Eliminação de Gauss, a Bi-Fatorização de Zollenkopf e o Método de Cholesky têm sido muito utilizados na resolução de redes de tração [12, 13]. Já os métodos iterativos como o Método de Gauss (ou método de Jacobi) e o Método de Gauss-Seidel apresentados em [1] não são tão aplicados à tração elétrica pela sua falta de robustez. Entretanto, uma outra categoria de métodos iterativos baseados na teoria dos gradientes conjugados, como o ICCG, tem apresentado resultados muito bons tanto em termos de tempo de solução como em termos de aproximação da solução exata do sistema linear. A tabela mostra uma comparação feita entre os métodos citados para um circuito de tração de 9,815 km de duas vias, contendo 8 trens, 4 subestações e 217 nós.

	Iterações	Tempo (segundos)	Erro relativo
Eliminação de Gauss	217	15,125	0 %
Bi-Fatorização de Zollenkopf	217	26,688	0 %
Método de Cholesky	217	8,187	0 %
Método de Gauss	217	30,875	0,872 %
Método de Gauss-Seidel	217	30,891	0,690 %
ICCG	82	4,265	0 %

Tabela 1- Comparação entre os métodos de resolução de sistemas lineares

Em relação à Tabela 1 vale notar que a mesma estimativa inicial foi adotada para os três métodos iterativos. Deve-se observar também que um número máximo de iterações foi estabelecido (217) sendo que o Método de Gauss e o Método de Gauss-Seidel atingiram este limite e não apresentaram uma solução exata .

Tanto durante o regime de tração quanto durante o regime de freagem, as relações entre tensões e correntes na rede de alimentação não são lineares. Esta dificuldade foi resolvida, como foi visto, através da utilização de modelos lineares para os trens. No entanto, a não linearidade do problema requer técnicas de natureza iterativa. Tais técnicas são baseadas na solução do circuito equivalente e atualização do modelo dos trens de acordo com as tensões calculadas, considerando-se constante a potência elétrica desenvolvida pelo trem no instante de tempo estudado. O processo de solução do circuito equivalente e atualizações do modelo dos trens são feitos até que uma tolerância desejada de tensão sobre o trem seja atingida. Nota-se que esta técnica iterativa altera apenas os vetores $\mathbf{I}$ e $\mathbf{U}$ da eq.(4), sendo que a matriz $\mathbf{G}$ permanece inalterada [11].

É claro que estas restrições de tensão e potência podem ser atendidas com a utilização de modelos não lineares através da adaptação dos métodos de fluxo de potência em corrente alternada. No entanto, este tipo de adaptação não é comum visto que o Método de Newton-Raphson necessita do cálculo da matriz Jacobiana além da alteração de seus elementos a cada passo em um único instante de tempo, o que não ocorre com a técnica iterativa anteriormente descrita. Se for considerado ainda que uma simulação elétrica é feita para vários instantes de tempo, o processo de cálculo pode-se tornar bastante lento [11].

Bibliografia

- [1] MARTINS, R. W. C. *Sistemas de tração elétrica: análise e dimensionamento*. 1986. 311 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1986.
- [2] TOLEDO, E. D. et al. *Tração elétrica*. 1.ed. São Paulo: Nobel, 1988. v.2. 309 p.
- [3] FILIPOVIĆ, Ž. *Elektrische Bahnen: Grundlagen, Triebfahrzeuge, Stromversorgung*. 3.ed. Heidelberg: Springer, 1995. 277 p.
- [4] KALLER, R., ALLENBACH, J. -M. *Traction électrique*. 1.ed. Lausanne: Presses Universitaires Romandes, 1995. v.1. 292 p.
- [5] TOLEDO, E. D. et al. *Tração elétrica*. 1.ed. São Paulo: Nobel, 1987. v.1. 371 p.



- [6] DAVIS JR., W. J. The tractive resistance of electric locomotives and cars. *General Electric Review*, v. 29, n. 10, p. 685 – 707, October 1926.
- [7] STRAHL, G. Verfahren zur Bestimmung der Belastungsgrenzen der Dampflokomotiven. *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*, Band 57, p. 521-257, Februar 1913, p. 326-332, März 1913, p. 421-424, März 1913.
- [8] WENDE, D. *Fahrdynamik des Schienenverkehrs*. 1. ed. Wiesbaden: Teubner, 2003. 358 p.
- [9] HOFMANN, G.; LÖSEL, T.; RÖHLIG, S. Simulationssystem für die Auslegung der Bahnenergieversorgungsanlage sowie von Triebfahrzeugen und Triebfahrzeugkomponenten. *VDI Berichte*, n. 1219, p. 331-351, 1995.
- [10] DA SILVA, J. A. P. *Uma nova metodologia para a avaliação dos sistemas de aterramento metro-ferroviários*. 1997. 71 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1997.
- [11] CAI, Y; IRVING, M. R.; CASE, S. H. Iterative techniques for the solution of complex DC-rail-traction systems including regenerative braking. *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*. v. 142, n. 5, p. 445-452, September 1995.
- [12] RAMBUKWELLA, N. B. et al. Traction equipment modelling and the power network solution for DC supplied rapid transit power system studies. In: *International Conference on Electric Railway Systems for a New Century*, London, 1987. Anais. London: IEE, 1987. p. 218-224.
- [13] CAI, Y; IRVING, M. R.; CASE, S. H. Modelling and numerical solution of multibranch DC rail traction power systems. *IEE Proceedings on Electric Power Applications*, v. 142, n. 5, p. 323-328, September 1995.
- [14] PIRES, C. L. *Simulação de marcha de composição ferroviária acionada por motores de indução e PWM*. 2002. 151 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-02052002-201047/>>



Simulação digital do sistema de tração elétrica: conceituação, métodos e evolução

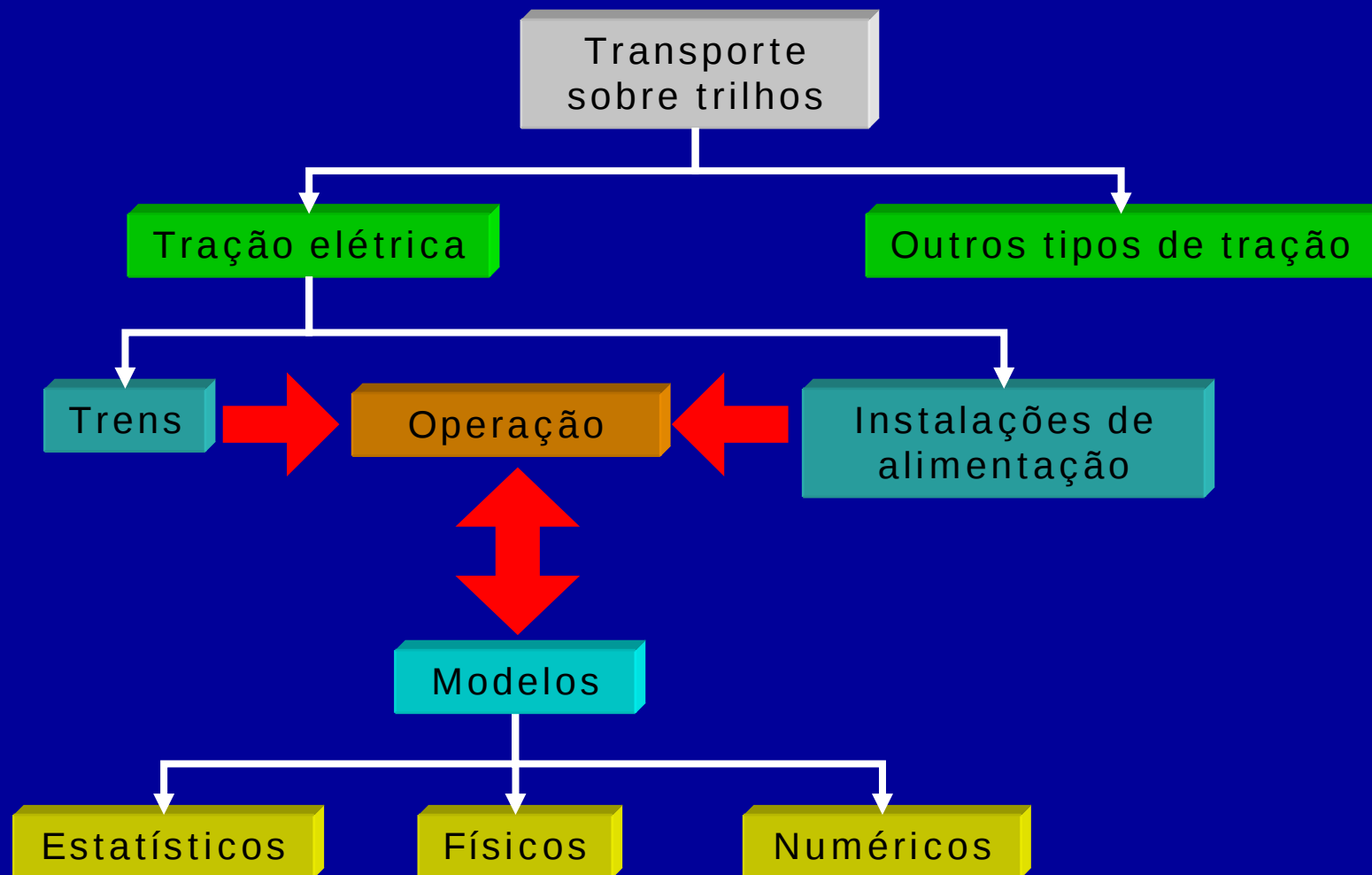
**Cassiano Lobo Pires, Silvio Ikuyo Nabeta
José Roberto Cardoso**

Por que simular ?



- Ferramenta de trabalho para apoio ao projeto.
- Ensaio de alternativas de um projeto de modo rápido e a custo reduzido.
- Previsão dos resultados do projeto.
- Análise comparativa das alternativas:
 - Viabilidade técnica;
 - Viabilidade econômica;
 - Impacto ambiental e
 - Repercussão social.

Introdução



Dados de entrada



Trem

Massa total

Curva esforço
f (velocidade)

Tipo de
acionamento

Via

Velocidade
máxima

Geometria

Posição das
estações

Operacional

Tempo de parada
nas estações

Headway ou
número de trens

Tempo de parada
nas estações
terminais

Subestações

Cabines de
paralelismo

Track bonds

Tipo de
aterramento

Linha de
contato

Tensão
nominal

Trilhos

Dados elétricos

Dados de entrada



EBahn 2.0

File Edit View Simulation Misoperation Graphics Help

Train data Line data

Physical

☒ Multiple-unit train

Tractive resistance model :

☐ Strahl Formula

☐ Davis Formula (basic)

Number of vehicles: 0

☐ User defined coefficients

Total weight : 241 [t]

Locomotive weight : 0 [t]

Train length (optional) : 0 [m]

Number of axes (loco or M.U.) : 16 [1]

Number of motor axes : 8 [1]

Coefficient of adhesion (null speed) : 0.16 [1]

Jerk limit : 1 [m/s³]

Auxiliary current : 0 [A]

Traction drive

☐ VSI induction motor

☒ VSI + mechanical braking

☐ DC series motor

☐ DC Chopper (field weakening)

☐ DC Chopper

Validate

File loaded:
C:\EBahn2.0\LinhaC.ebh
Complete simulation selected.

Ready

NUM

Dados de entrada



EBahn 2.0

File Edit View Simulation Misoperation Graphics Help

Train data Line data

☐ One track simulation ☐ Electric data after TPS !!!

☐ Same profile for up and down tracks

☐ Subway line

Subway settings

☐ Single track tunnel

☐ Double track tunnel

Length and gauge

Initial position : 0 [m]

Final position : 28350 [m]

Line gauge : 1.600 [m]

Electric settings

Nominal voltage : 3000 [V]

Number of substations : 4 [1]

Number of cross bonds : 0 [1]

Number of paralleling stations : 0 [1]

Contact line divisions : 1 [1]

Earthing divisions : 1 [1]

Validate

Number of paralleling stations: 0
Number of contact line divisions: 1
Number of earthing divisions: 1

Ready NUM

Dados de entrada



Set the substation properties [X]

Substation number:

Position: [m]

Internal voltage: [V]

Internal resistance: [Ohm]

Total reactance (secondary): [Ohm]

Earthing conductance (opcional): [S]

Converter configuration:

- ☐ Six-phase
- ☐ Double-star six-phase
- ☒ Three-phase bridge (Graëtz Bridge)
- ☐ Twelve-pulse, series connection (Double Graëtz Bridge)
- ☐ Twelve-pulse, parallel connction (Double Graëtz Bridge)

Fast internal resistance calculator

Using transformer reactance

Transformer reactance (secondary): [Ohm]

Number of parallel rectifier groups: [1]

Using substation power

Substation power: [kW]

Set track profile [X]

Begin of the track section: [m]

End of the track section: [m]

Type of track section:

- ☒ Plain
- ☐ Curve
- ☐ Gradient
- ☐ Curve and gradient

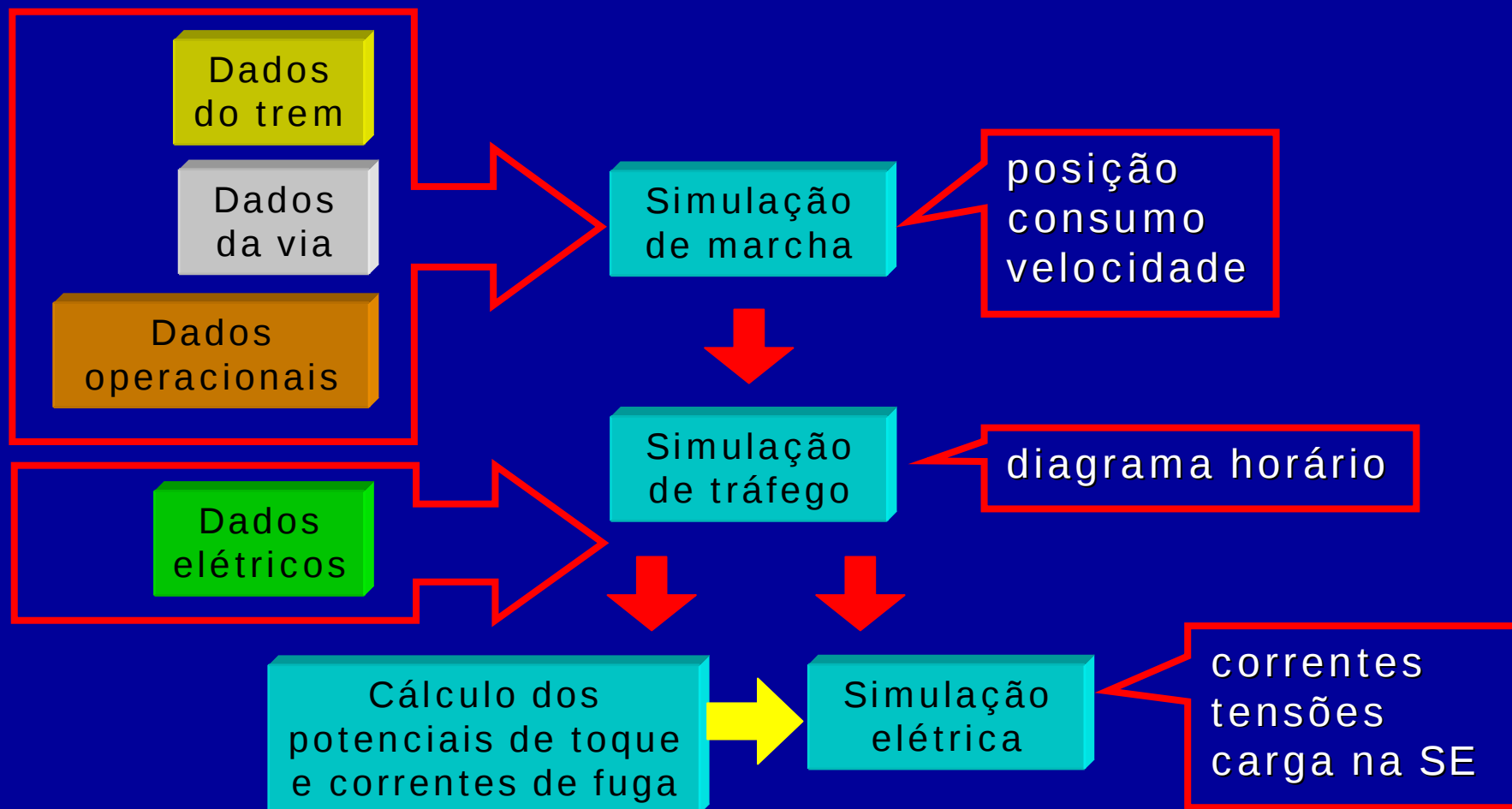
Curve radius: [m]

Gradient: [0/00]

Tunnel conditions:

- ☒ No tunnel
- ☐ Single tunnel
- ☐ Double tunnel

Visão geral



Simulação de marcha



Movimento
do trem

Movimento de um ponto
material ao longo da via

2ª Lei de
Newton

Motores de tração
Função da velocidade

Resistência do trem
Função da velocidade

$$\frac{dV}{dt} \cdot \frac{1}{3,6} = \frac{F_{MOTOR}(V) - [R_{MPT}(V) + R_{IC}(s)]}{\xi \cdot m}$$

Aceleração

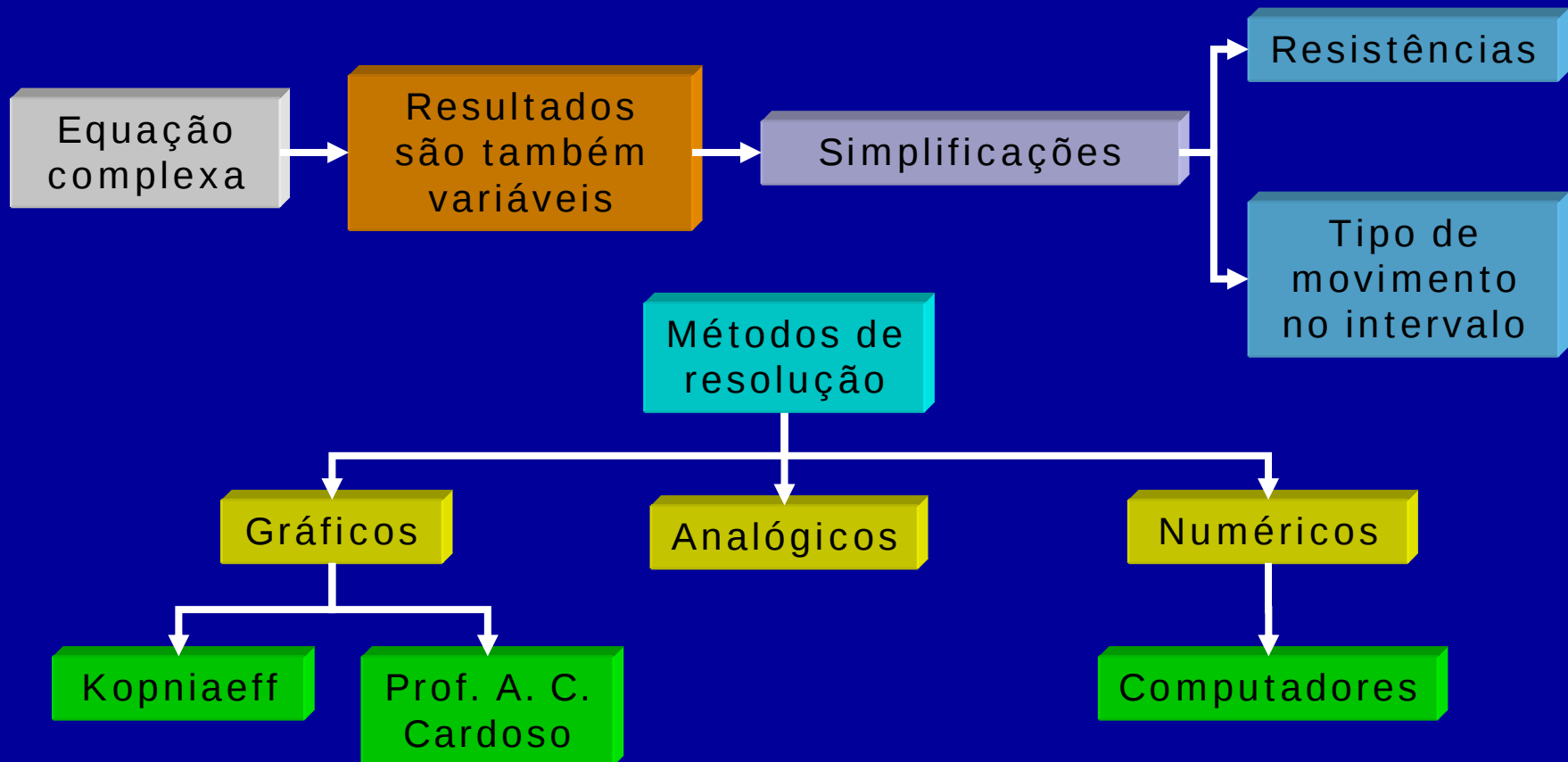
Massa do trem
Fator de massas girantes

Resistência da via
Função da posição

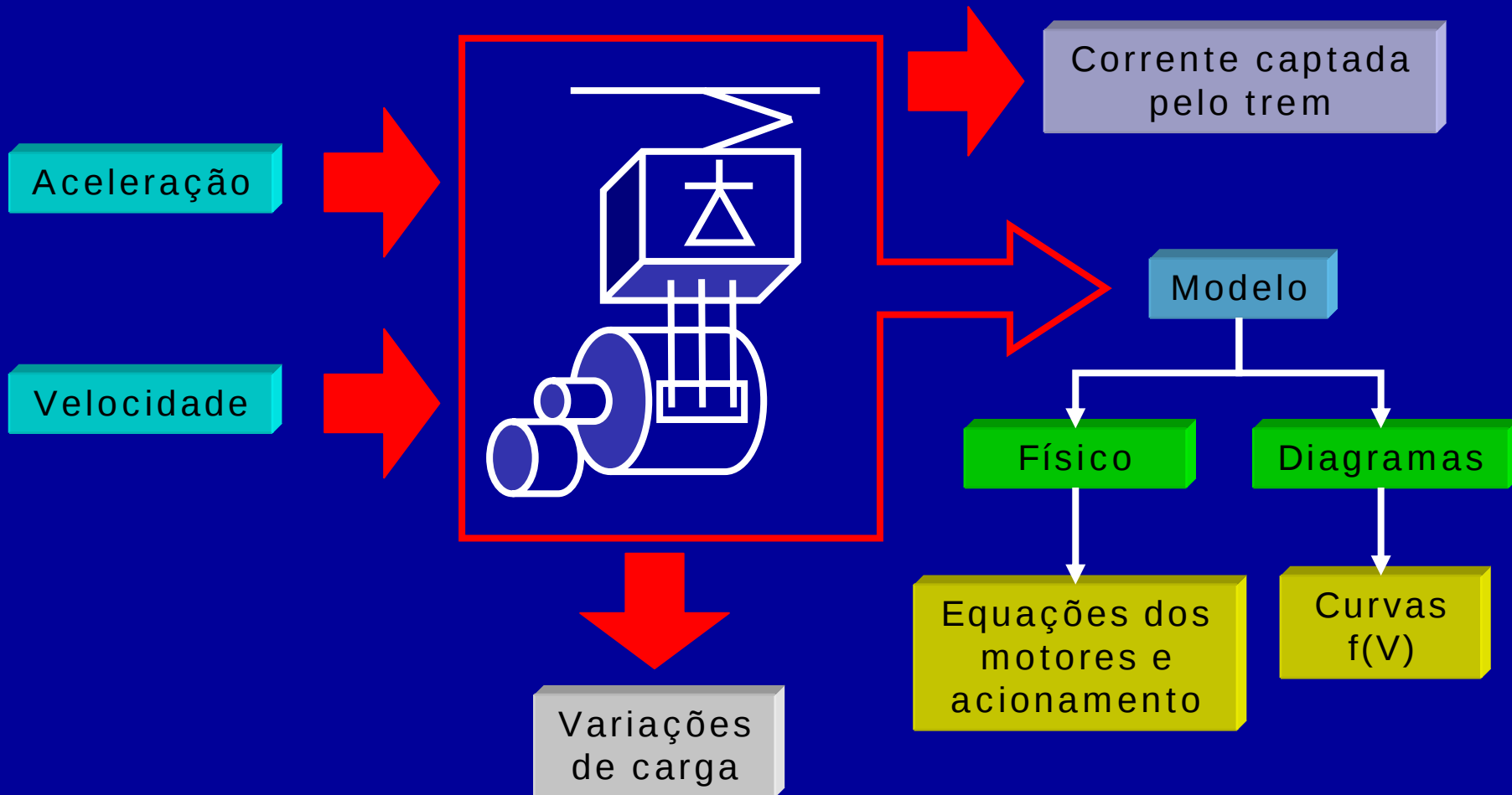
Simulação de marcha



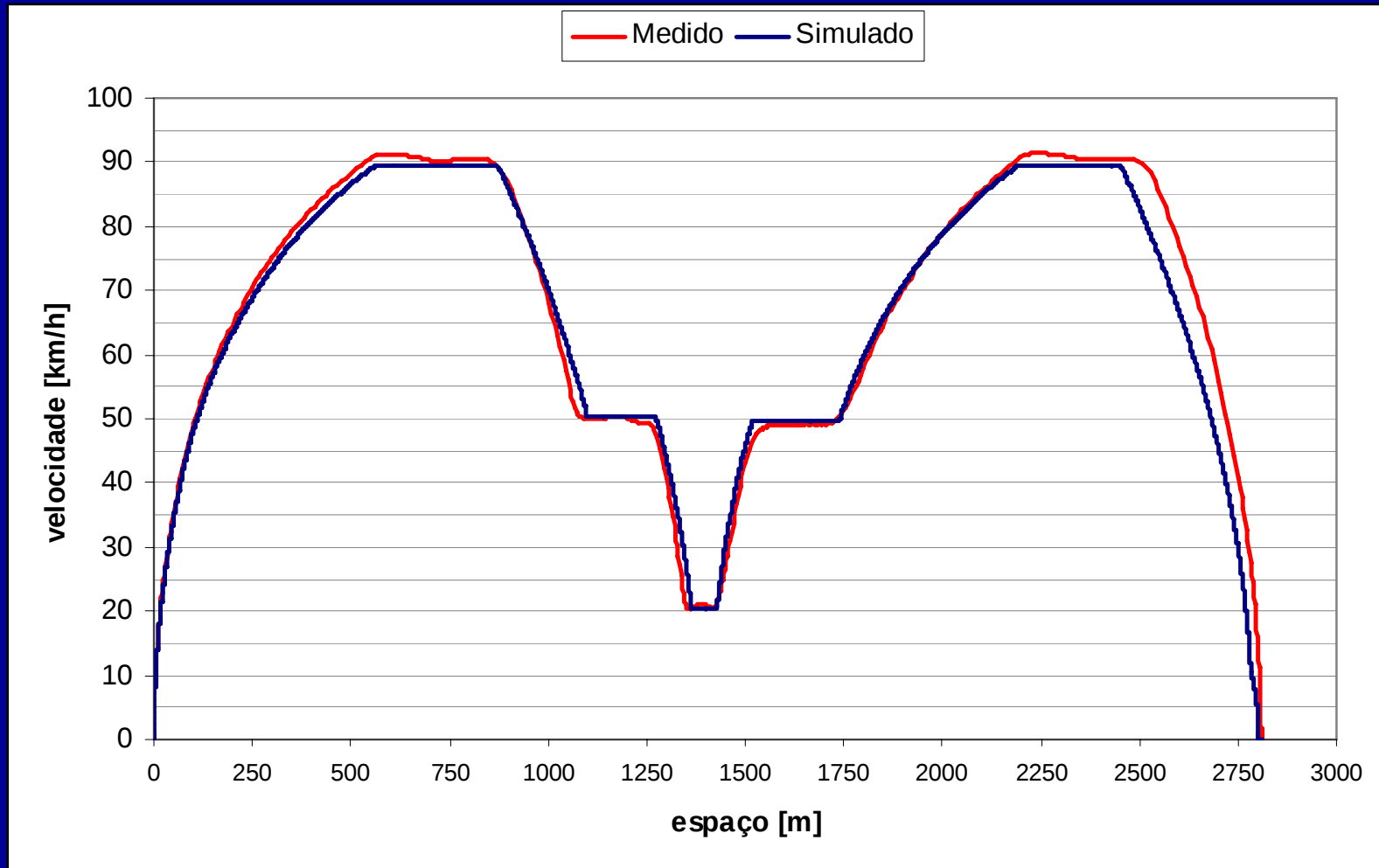
$$\frac{dV}{dt} \cdot \frac{1}{3,6} = \frac{F_{MOTOR}(V) - [R_{MPT}(V) + R_{IC}(s)]}{\xi \cdot m}$$



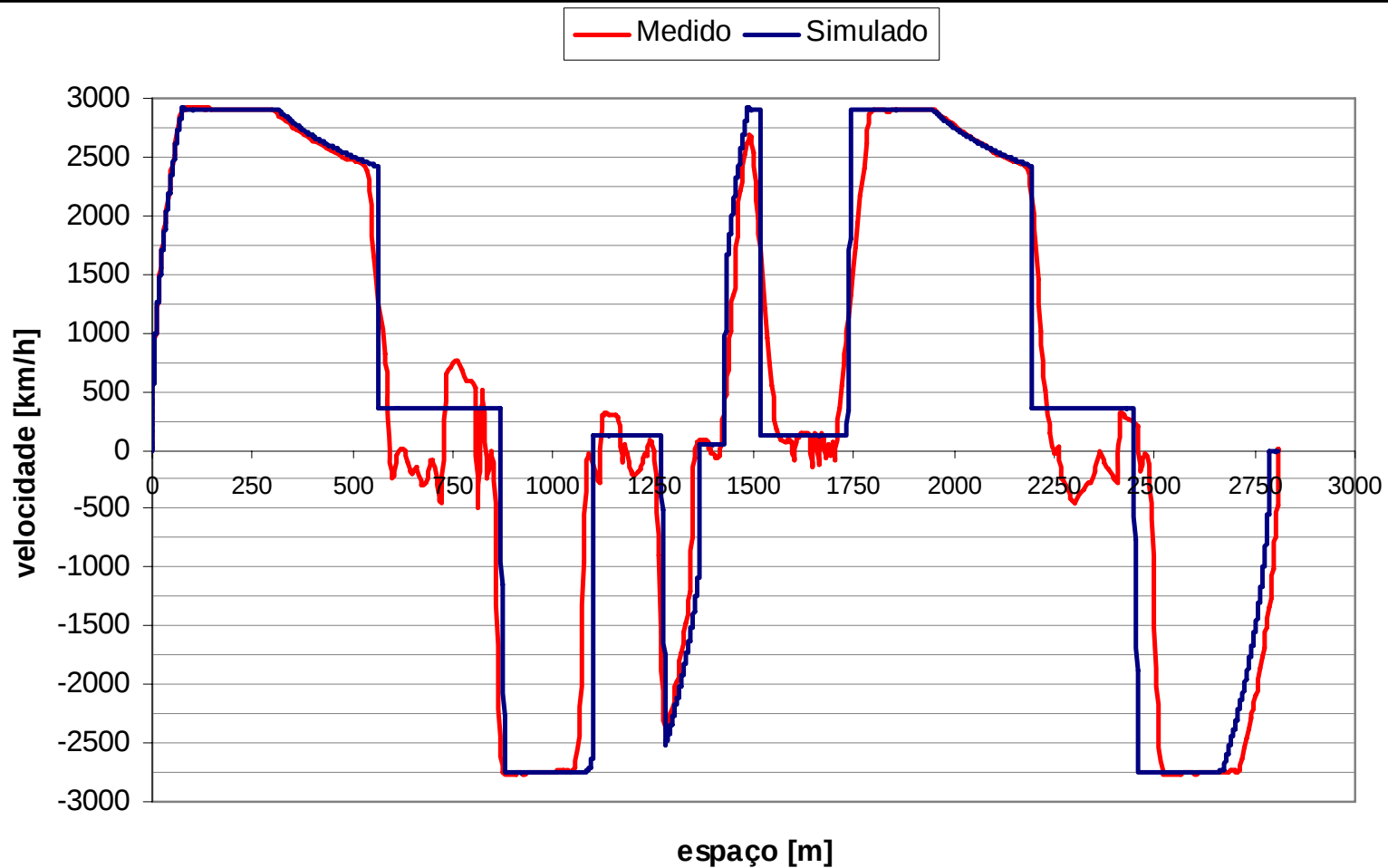
Simulação de marcha



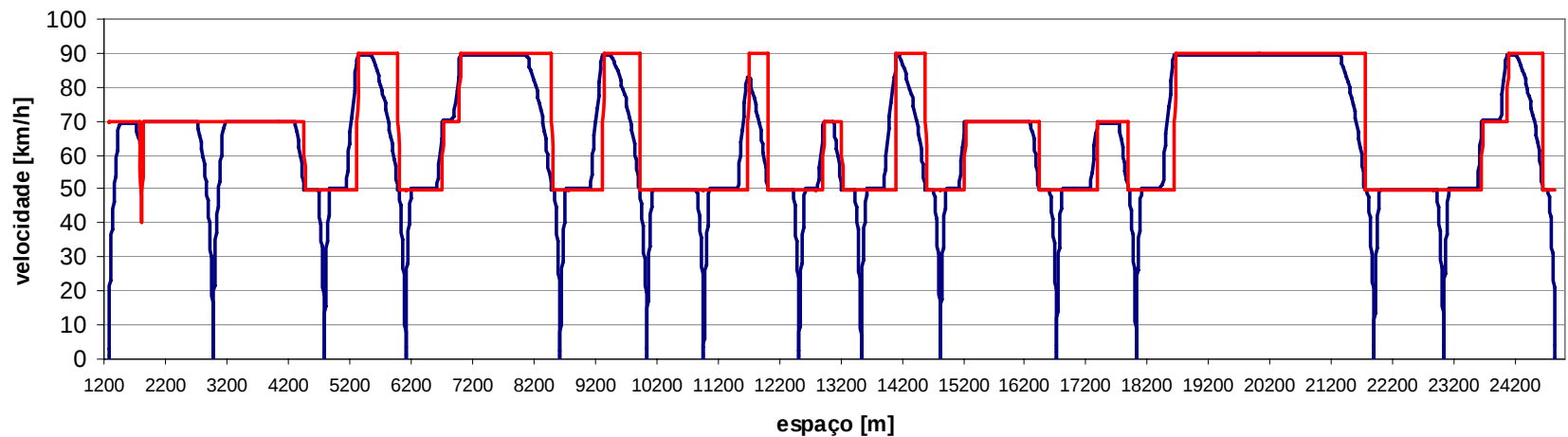
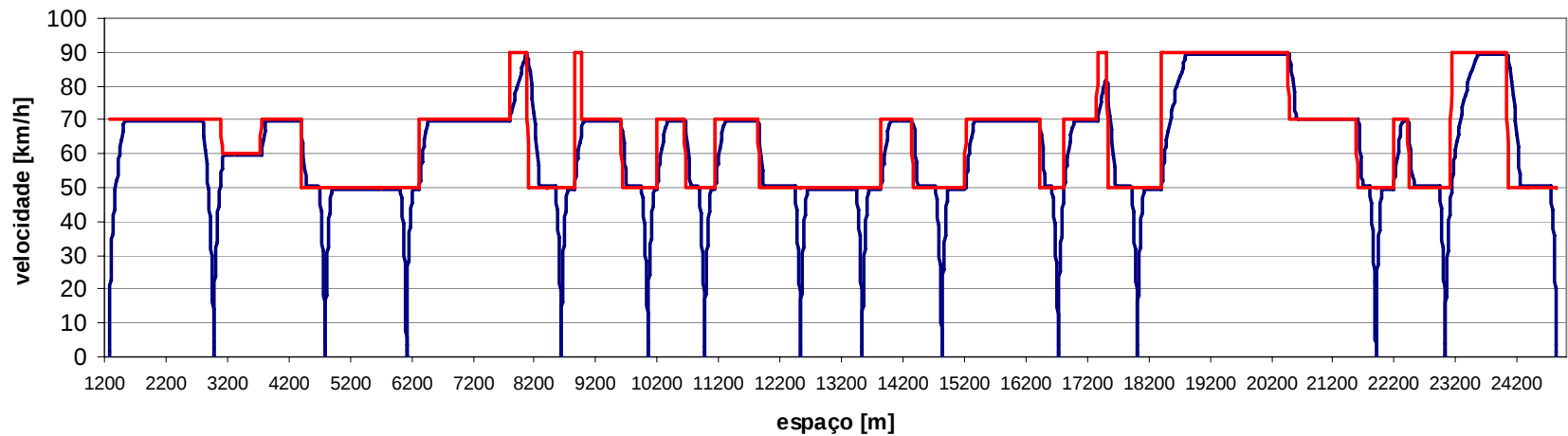
Simulação de marcha



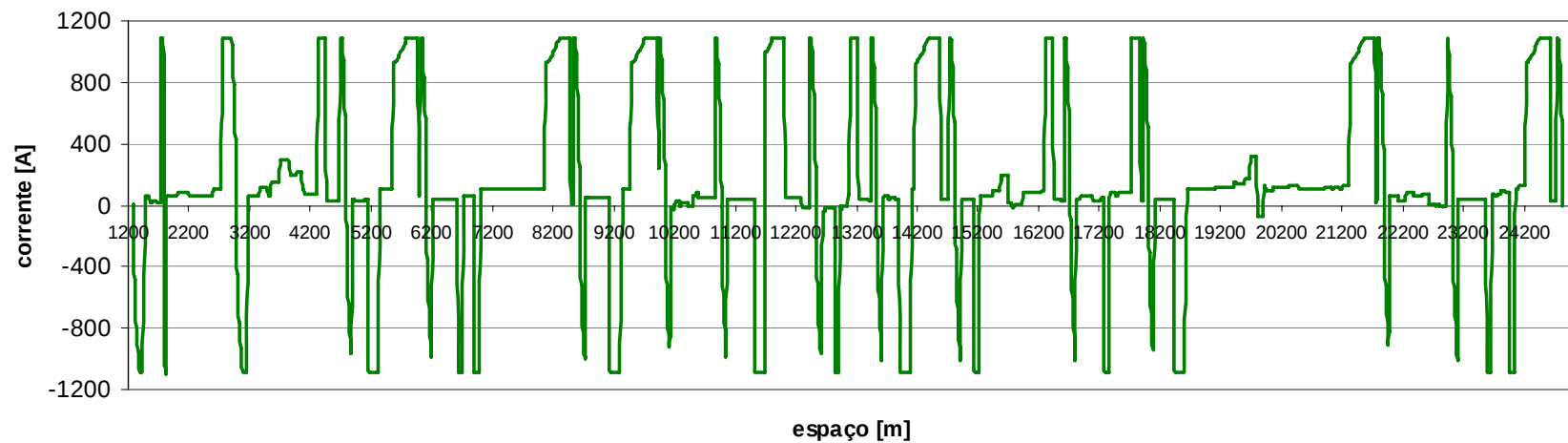
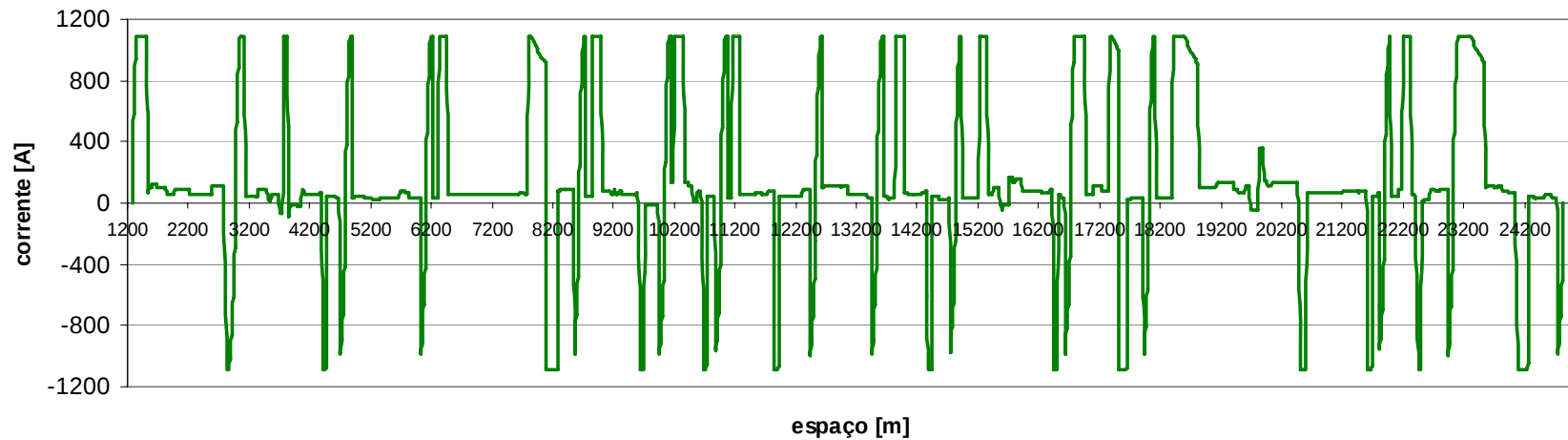
Simulação de marcha



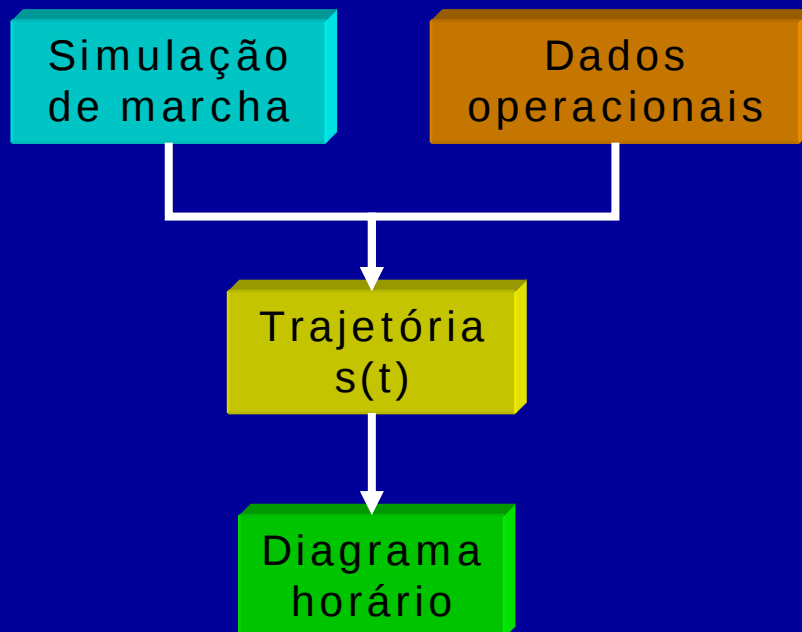
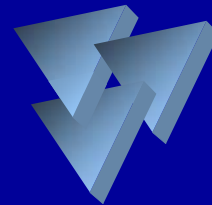
Simulação de marcha



Simulação de marcha



Simulação de tráfego



The screenshot shows a software window titled 'Set traffic conditions' with a close button (X) in the top right corner. The window is divided into two main sections: 'Stop times' and 'Time schedule'.

Stop times section:

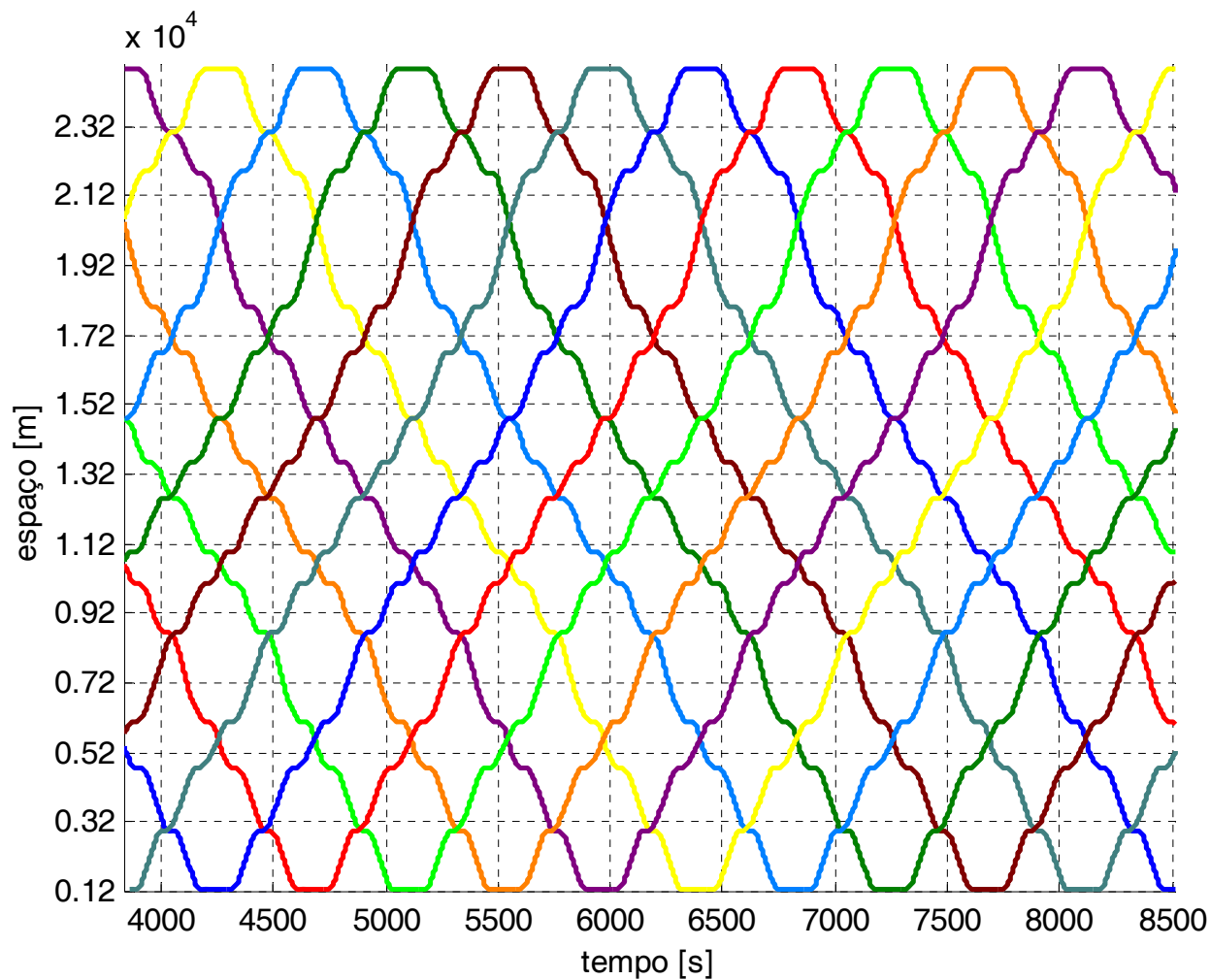
- A dropdown menu shows 'Line 1'.
- 'Station stop time :': A text input field with '30' and a unit label '[s]'.
- 'Reversing time (up track) :': A text input field with '90' and a unit label '[s]'.
- 'Reversing time (down track) :': A text input field with '90' and a unit label '[s]'.

Time schedule section:

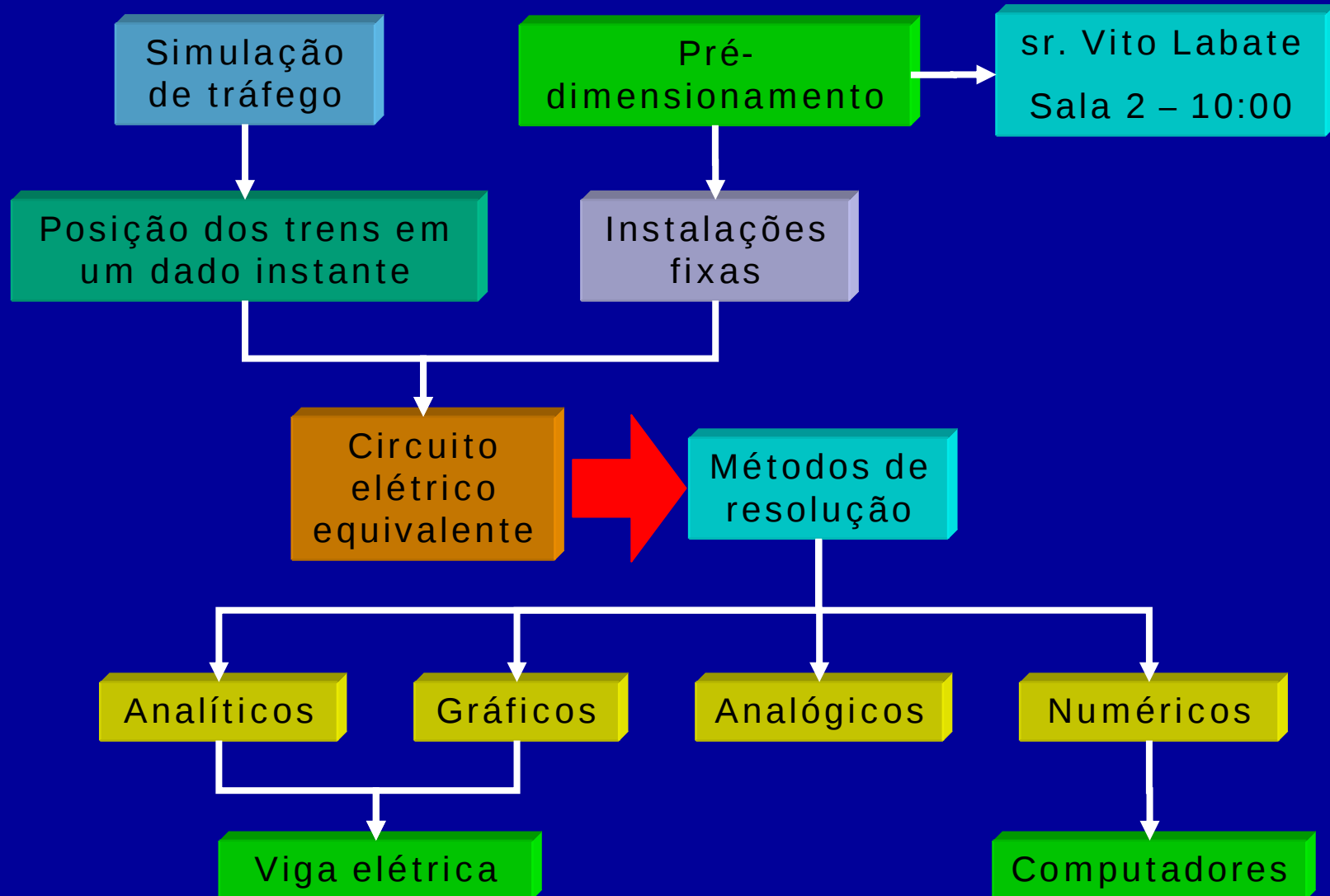
- 'Number of trains :': An unchecked checkbox.
- 'Headway :': A checked checkbox.
- Below 'Number of trains': A dropdown menu showing '0' and a unit label '[1]'.
- Below 'Headway': A text input field with '450' and a unit label '[s]'.

At the bottom of the window are two buttons: 'OK' and 'Cancel'.

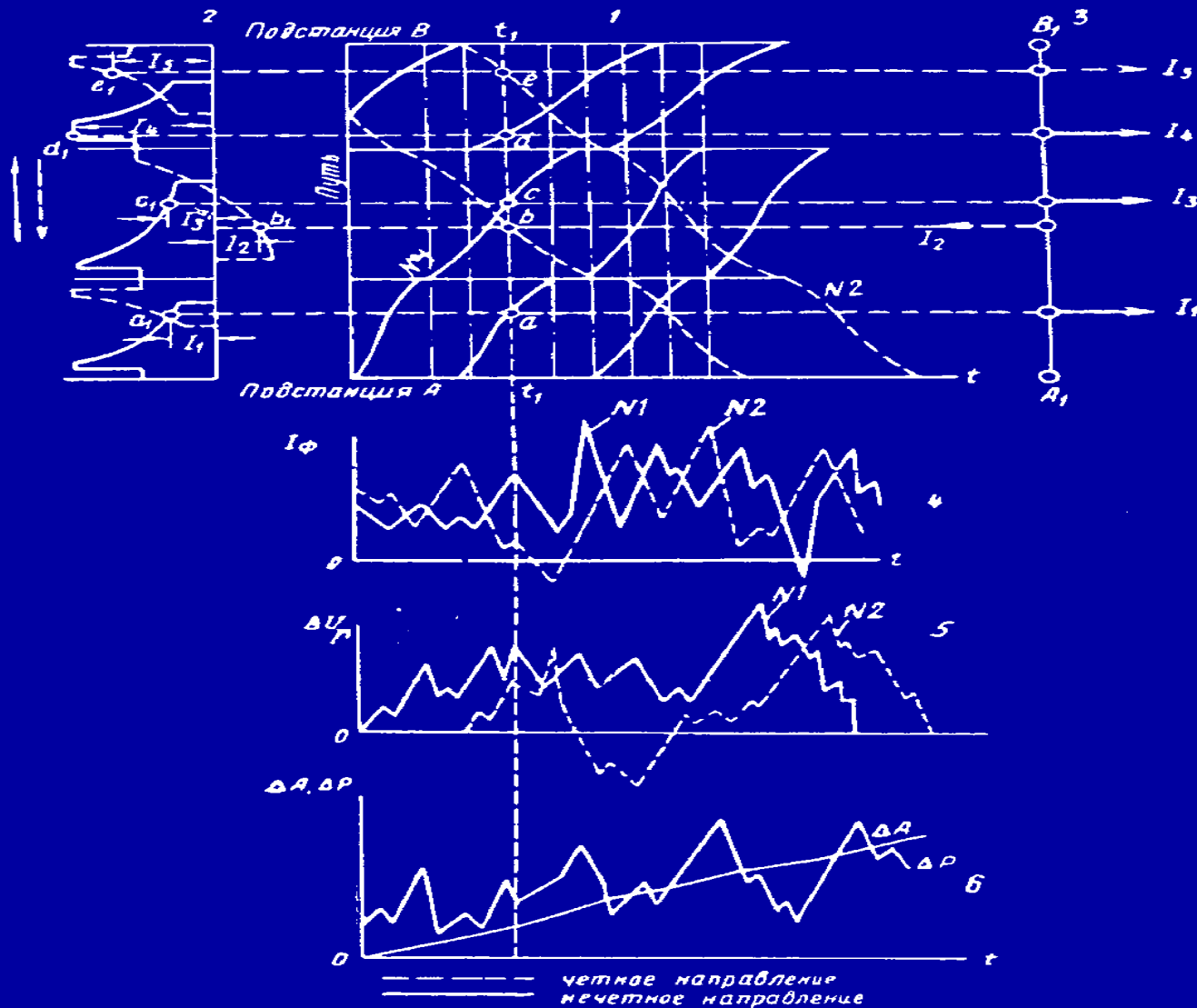
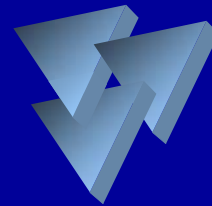
Simulação de tráfego



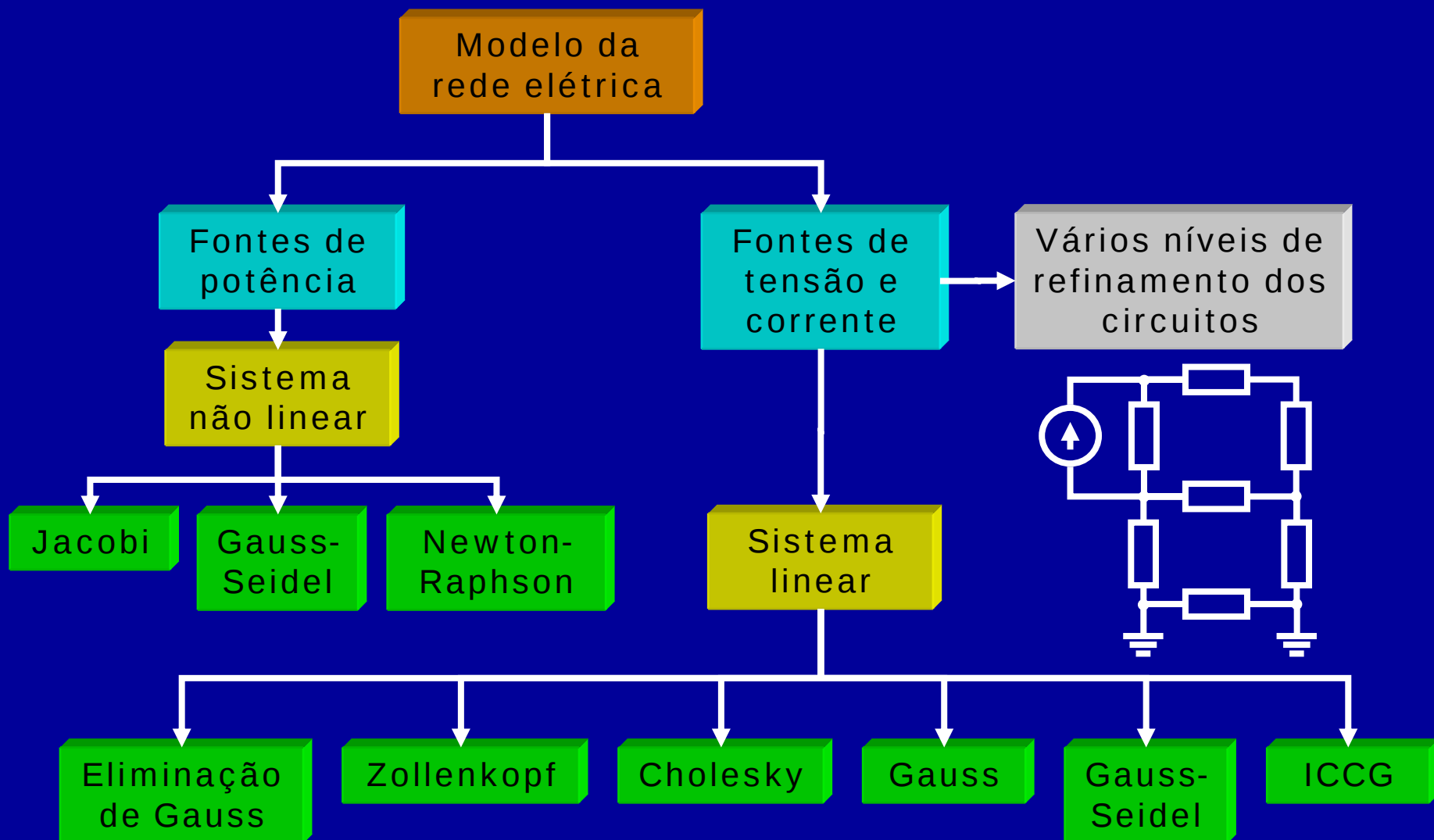
Simulação elétrica



Simulação elétrica



Simulação elétrica

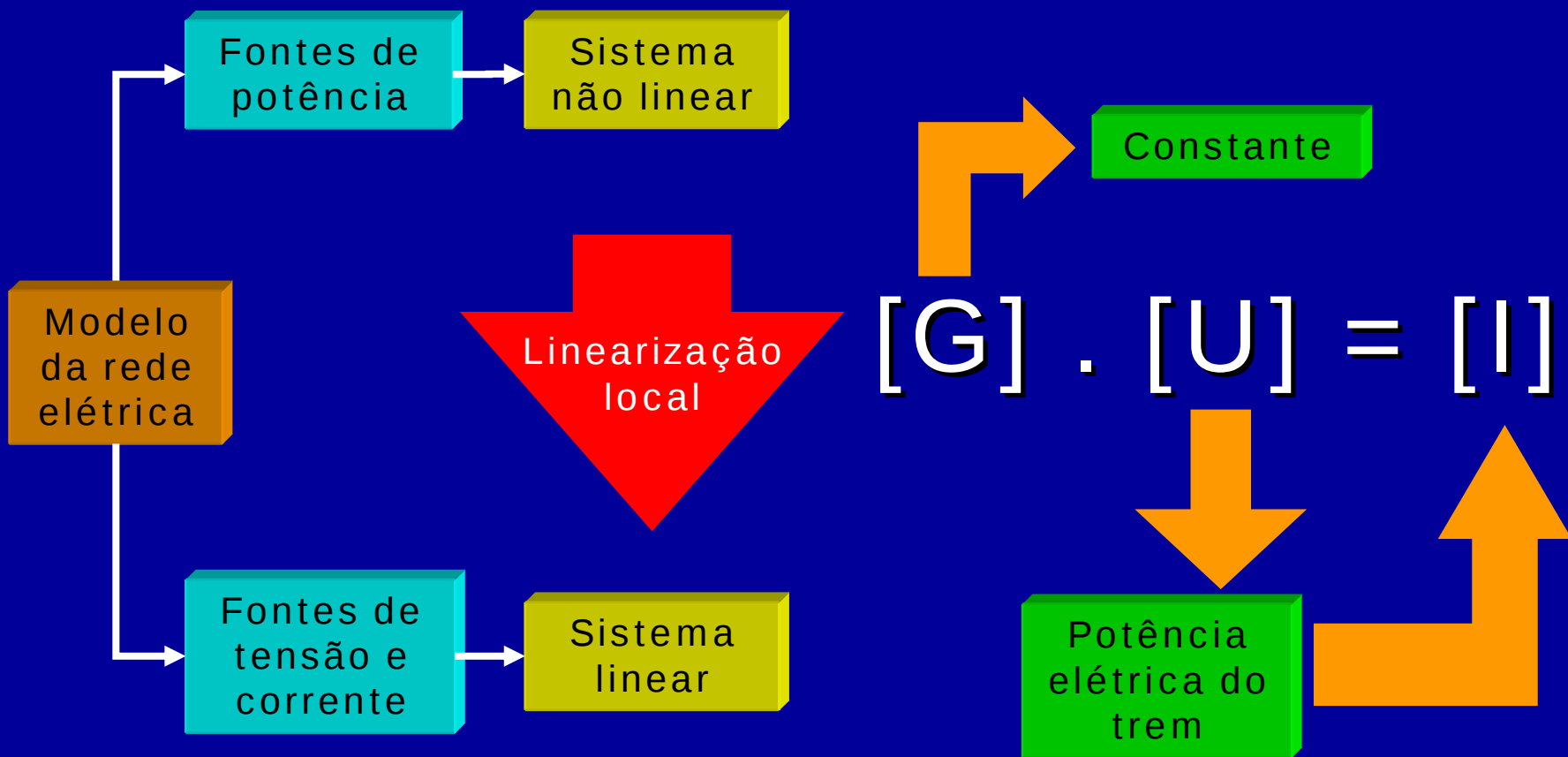


Simulação elétrica

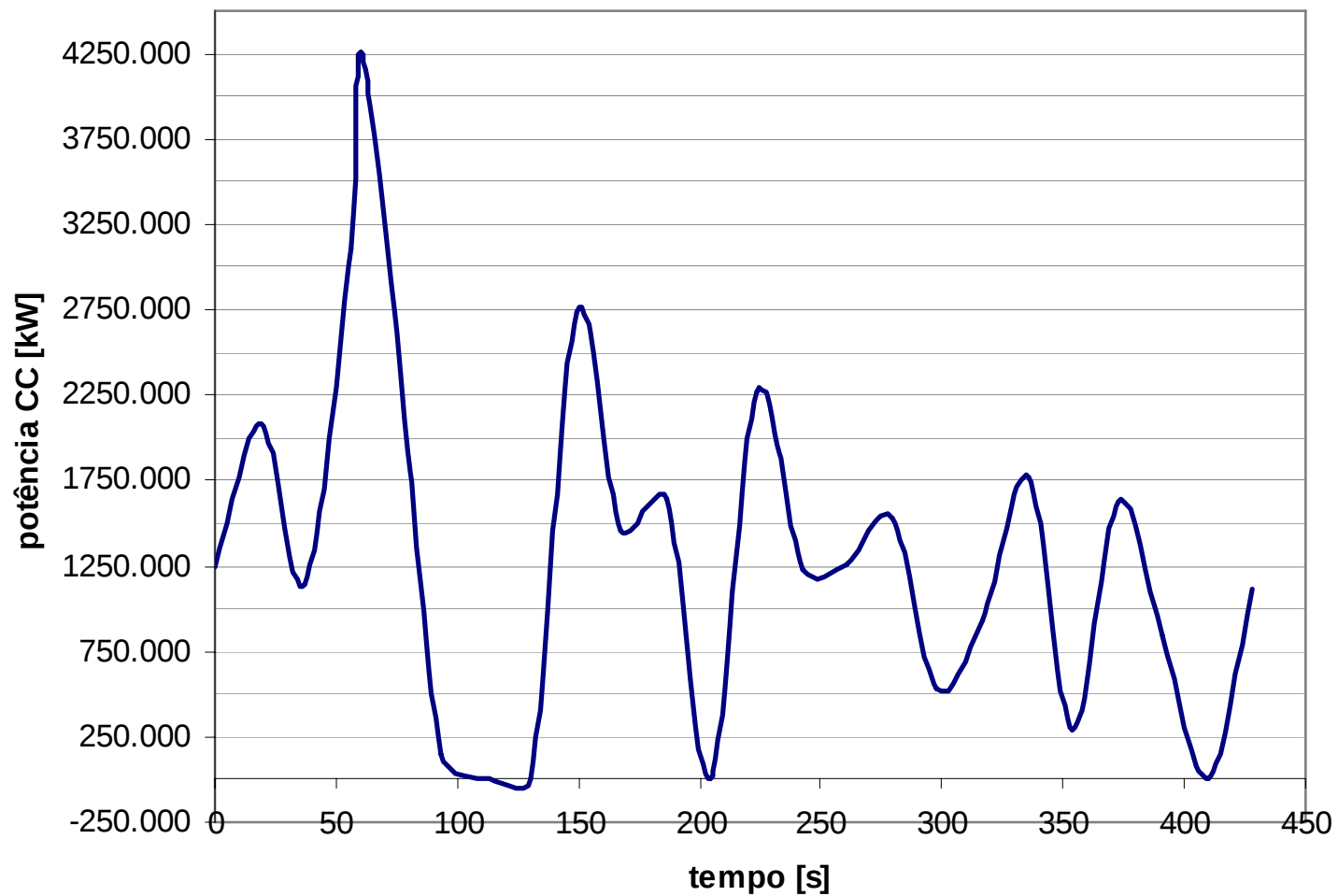
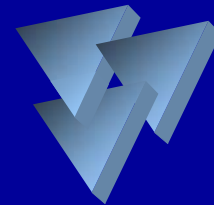


217 nós	Iterações	Tempo [s]	Erro relativo
Eliminação de Gauss	217	15,125	0 %
Zollenfopf	217	26,688	0 %
Método de Cholesky	217	8,187	0 %
Método de Gauss	217	30,875	0,872 %
Método de Gauss-Seidel	217	30,891	0,690 %
ICCG	82	4,265	0 %

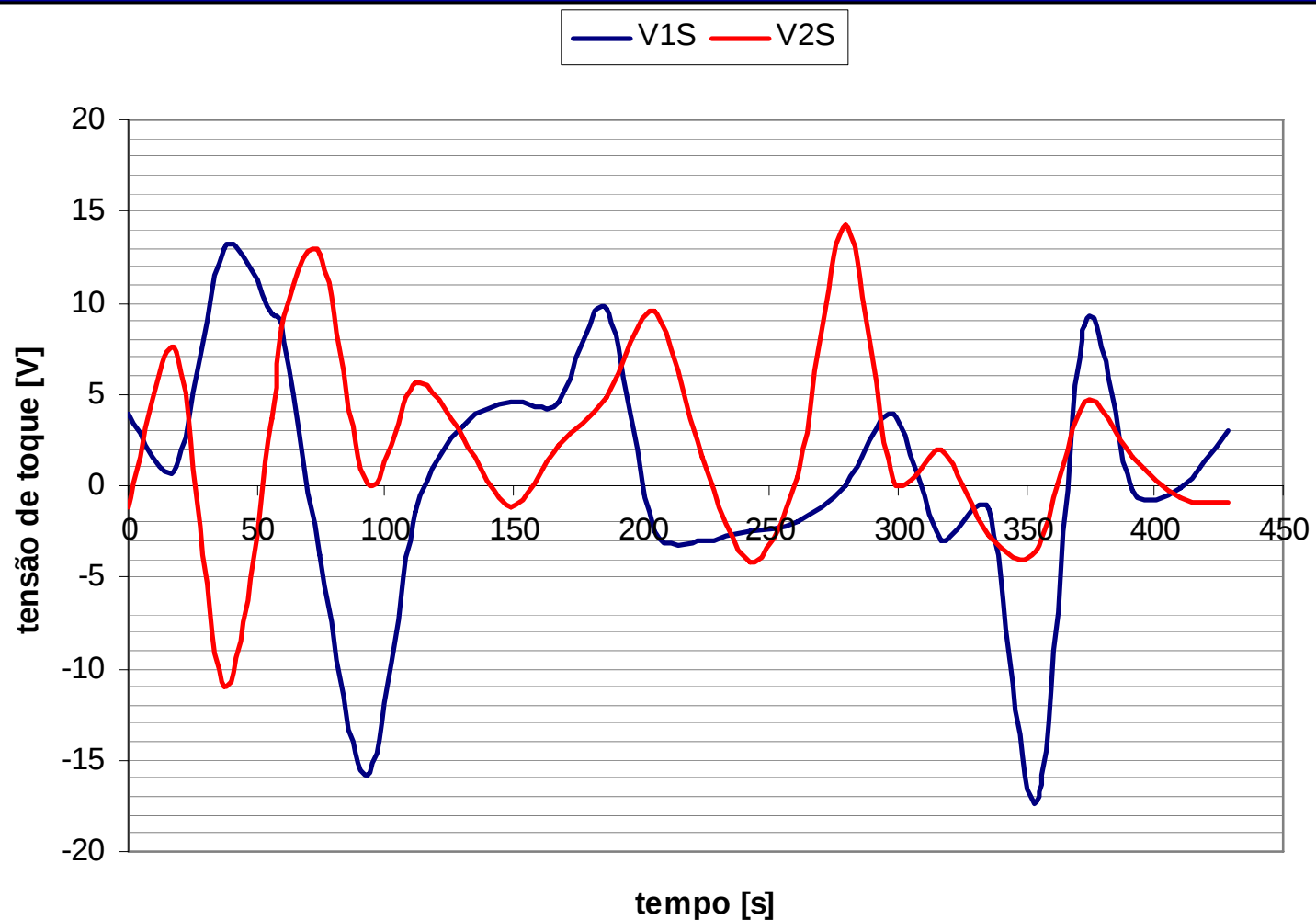
Simulação elétrica



Simulação elétrica



Simulação elétrica





Obrigado