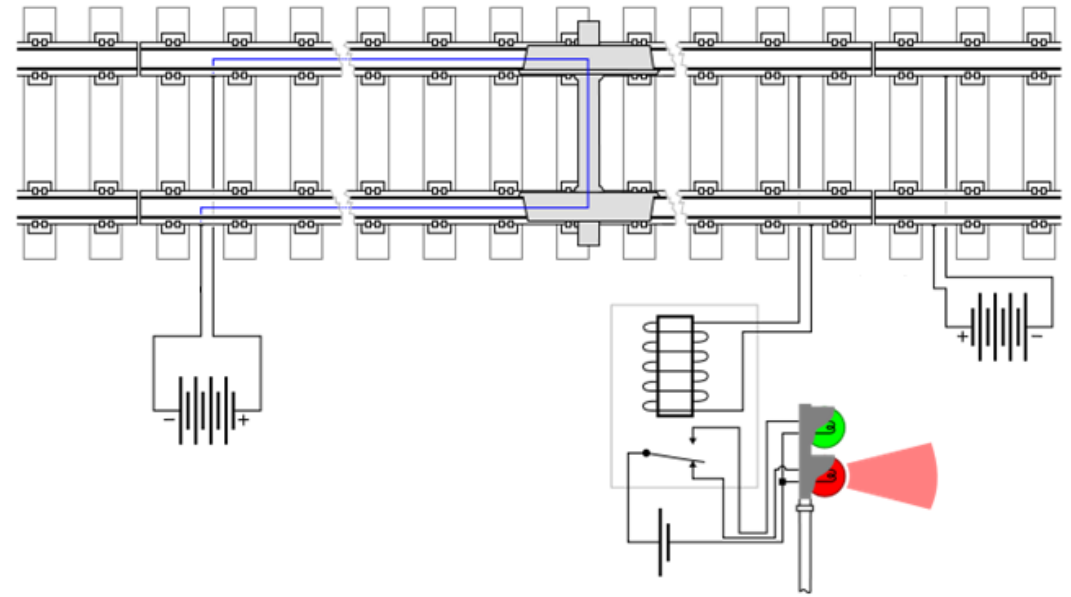




XI Congresso Nacional ADFERSIT – “Os Transportes, a Energia e o Ambiente”

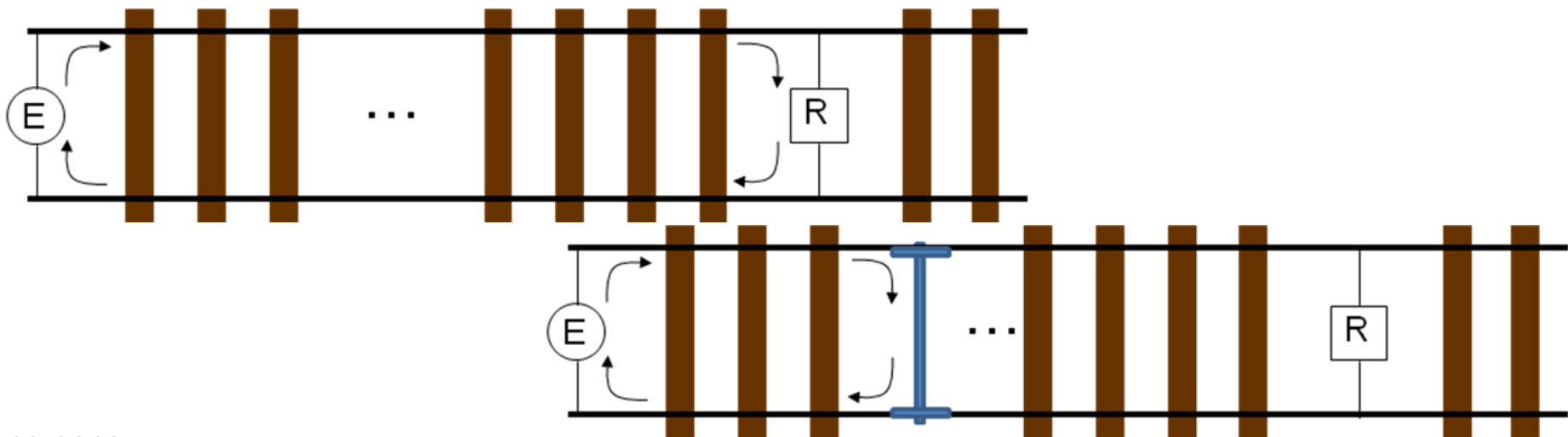


Sinalização Ferroviária: Abordagens para diagnóstico de falhas e controlo tolerante a falhas

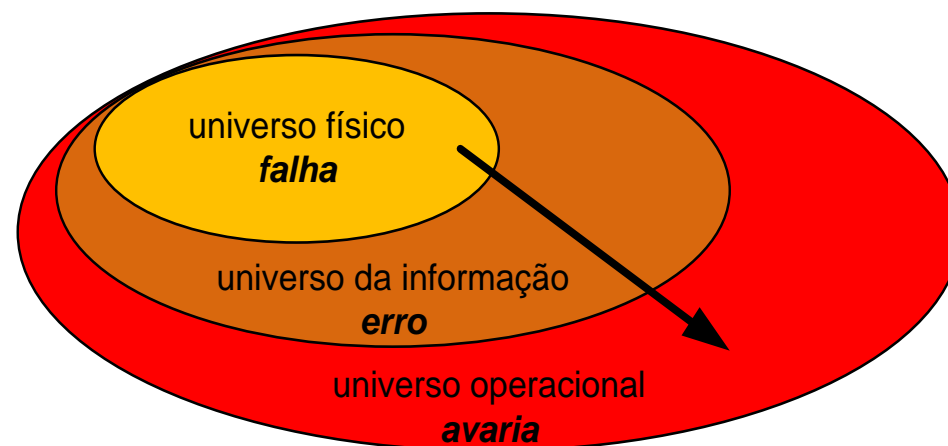


- O despertar dum antigo interesse pelas áreas de controlo e decisão.
- Pensar na utilização da lógica *fuzzy* e do controlo tolerante a falhas nos sistemas de sinalização ferroviária.
- Seguiu-se a pesquisa e a leitura de alguns artigos técnico-científicos.
- A conjugação do interesse académico e ferroviário.
- O diagnóstico de falhas em circuitos de via utilizando conceitos *fuzzy*...

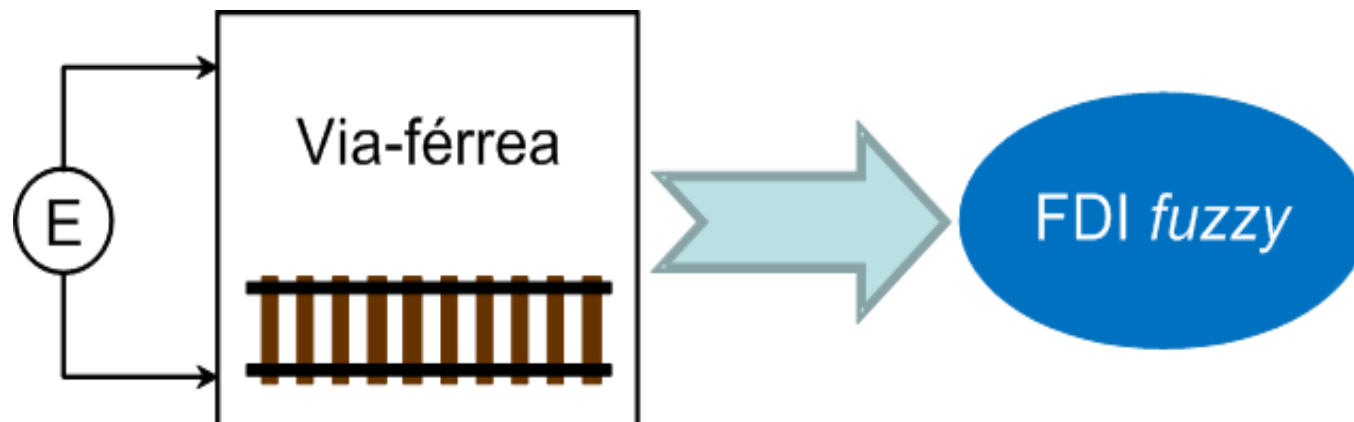
- O ambiente ferroviário circunscreve-se a um sistema guiado, sem liberdade de movimento.
- A necessidade de deteção dos comboios:
 - Circuito de via livre;
 - Circuito de via ocupado (também por avaria...).
- Uma avaria impõe regime de marcha-à-vista, com uma velocidade máxima de 30 km/h.



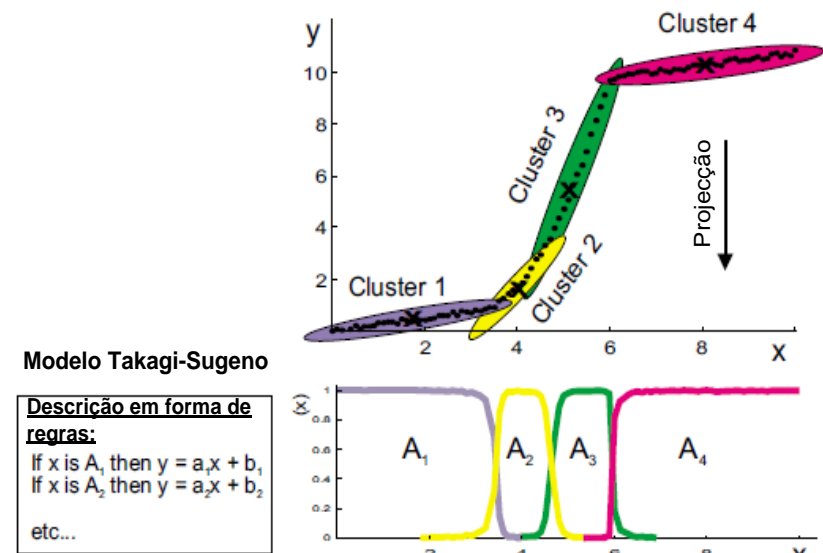
- ◆ Registadas, no ano de 2010, 1221 ocorrências em sistemas de deteção de comboios.
- ◆ Afetados 3381 comboios, com 26323 minutos de atraso (438,7 horas \Leftrightarrow 18,3 dias);
- ◆ Totalizadas 1625 horas em ações diretas de manutenção corretiva (elevados encargos).
- ◆ Solução: realizar diagnóstico de falhas em circuitos de via e assim minimizar os seus efeitos operacionais (avarias).



- ◆ Fiabilidade, disponibilidade e segurança na operação do caminho-de-ferro:
 - Uso de arquiteturas redundantes (já em uso...)
 - Sistemas de monitorização em tempo real (atualmente do tipo ON-OFF).
- ◆ Aplicar conceitos *fuzzy* no diagnóstico das falhas mais comuns subjacentes ao funcionamento dos circuitos de via.



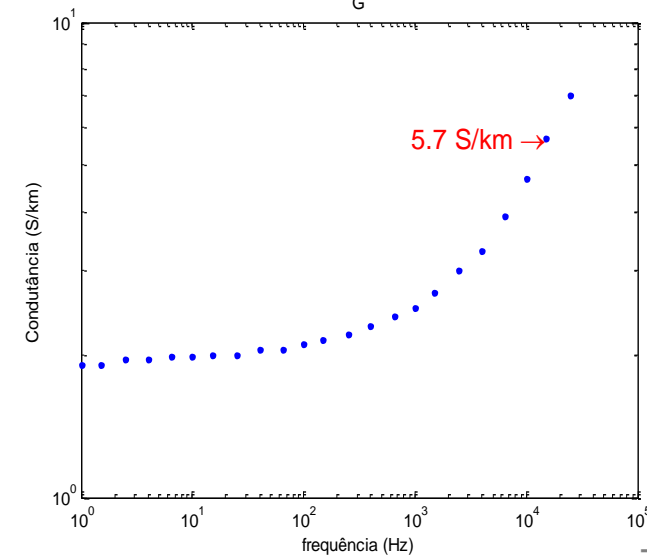
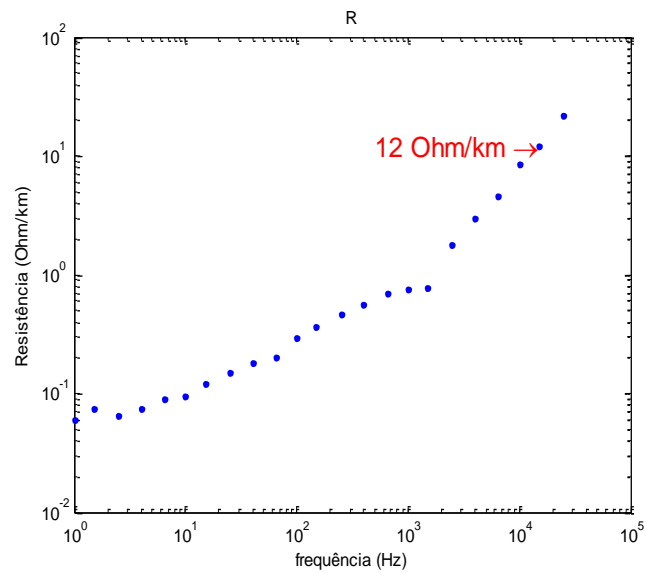
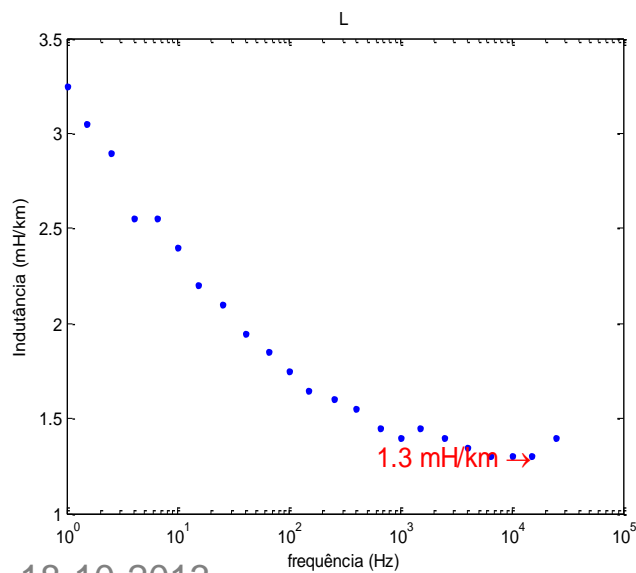
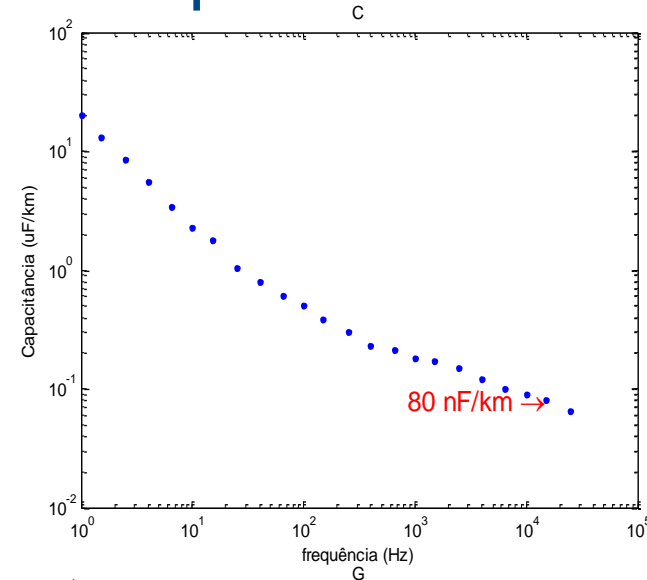
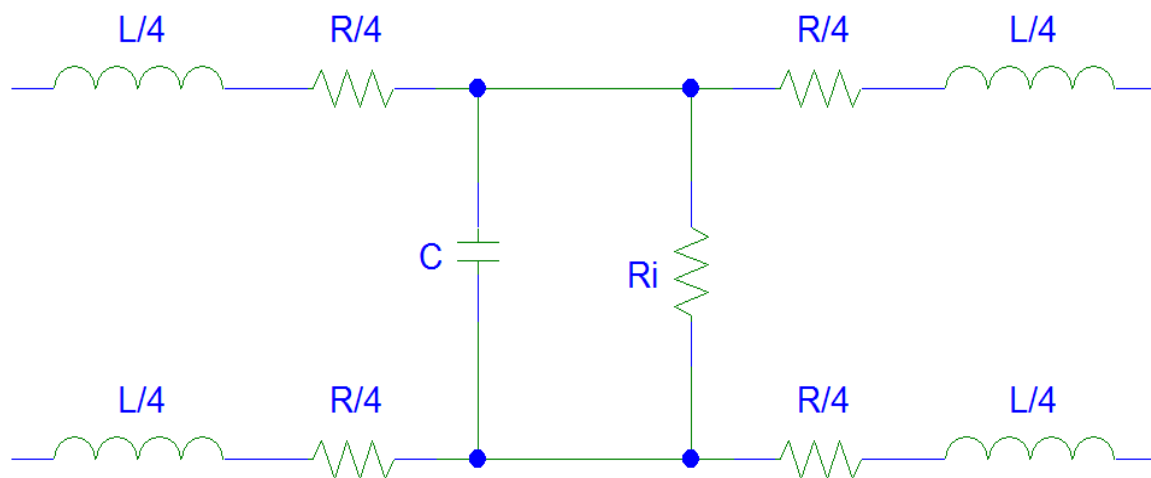
- Modelação *fuzzy* usada quando os processos em estudo são não lineares e não há conhecimento total do processo e das suas variáveis (modelo caixa cinzenta).
- **Se (*if*)** a velocidade é elevada **então (*then*)** proceder ao aperto do freio do comboio.



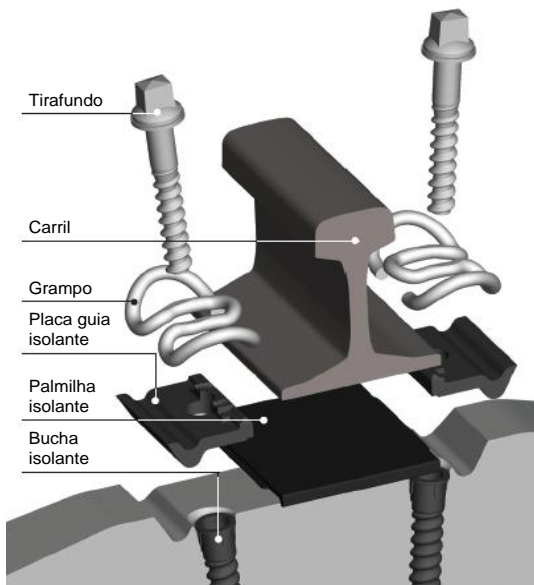
- Porquê o FDI baseado em modelos *fuzzy*: Não há conhecimento total dos modelos (com e sem falhas) do processo!

Desenvolvimento (modelação da via-férrea)

Parâmetros elétricos que variam com a frequência.

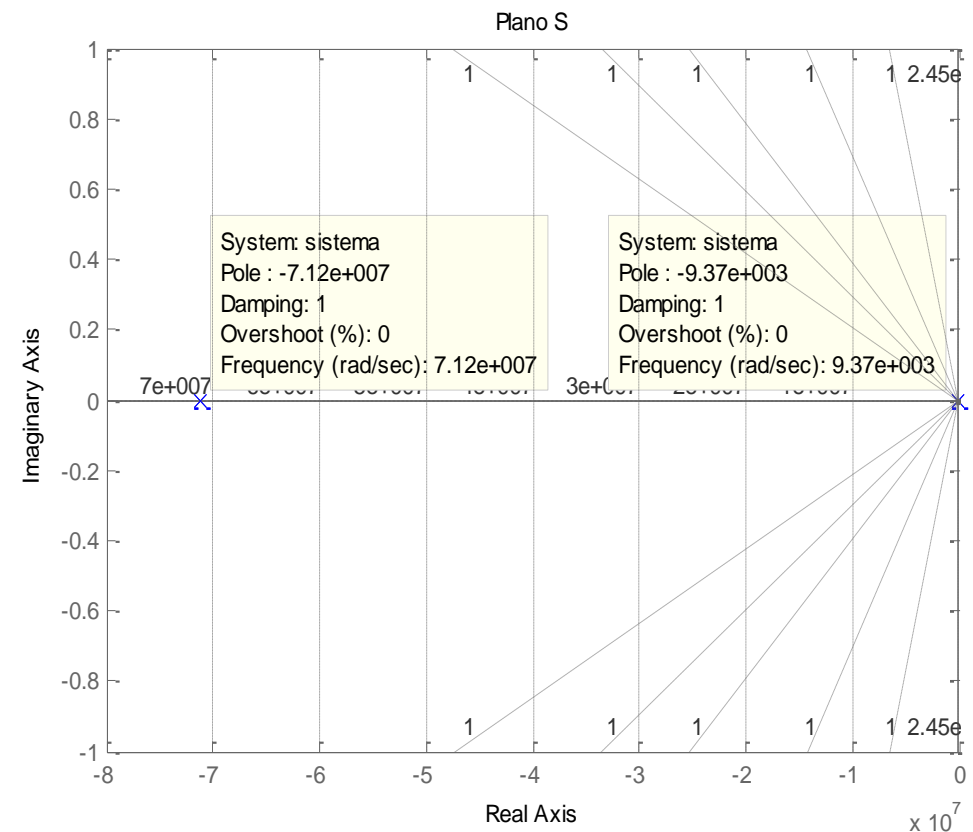
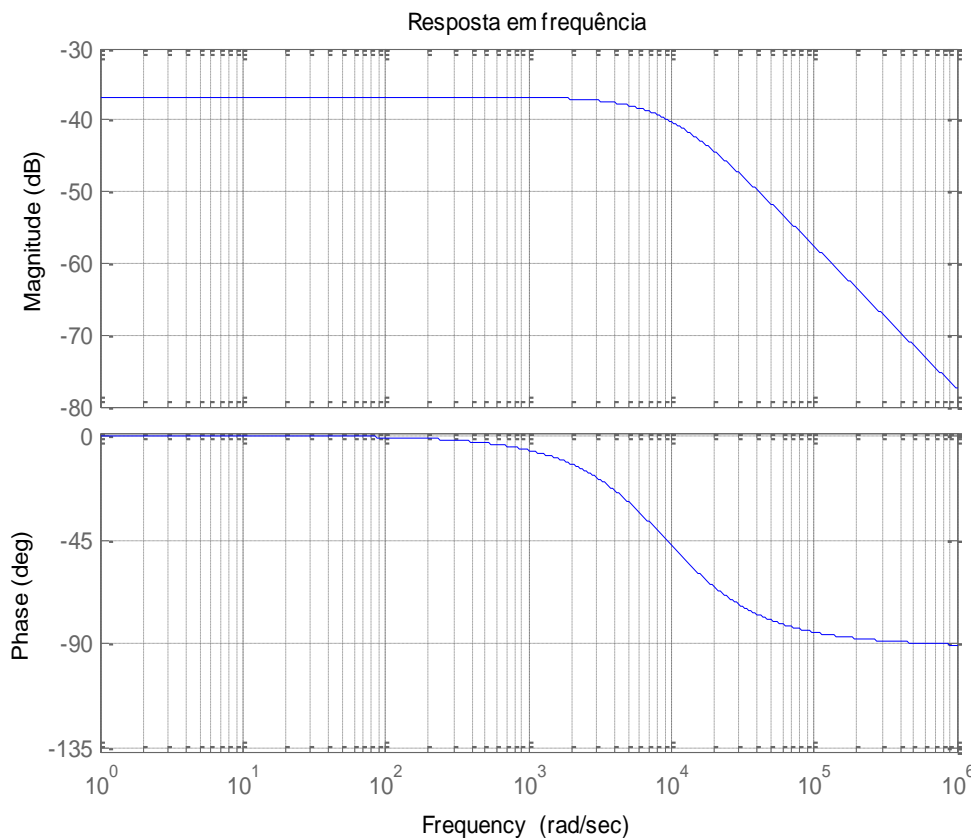


- Valores típicos dos parâmetros da via-férrea a aplicar ao modelo do processo (a 15 kHz, para 1 km de extensão):
 - 1,3 mH de indutância longitudinal dos carris;
 - 12 Ω de resistência longitudinal dos carris;
 - 80 nF de capacitância transversal entre carris;
 - 5,7 S de condutância da via-férrea.

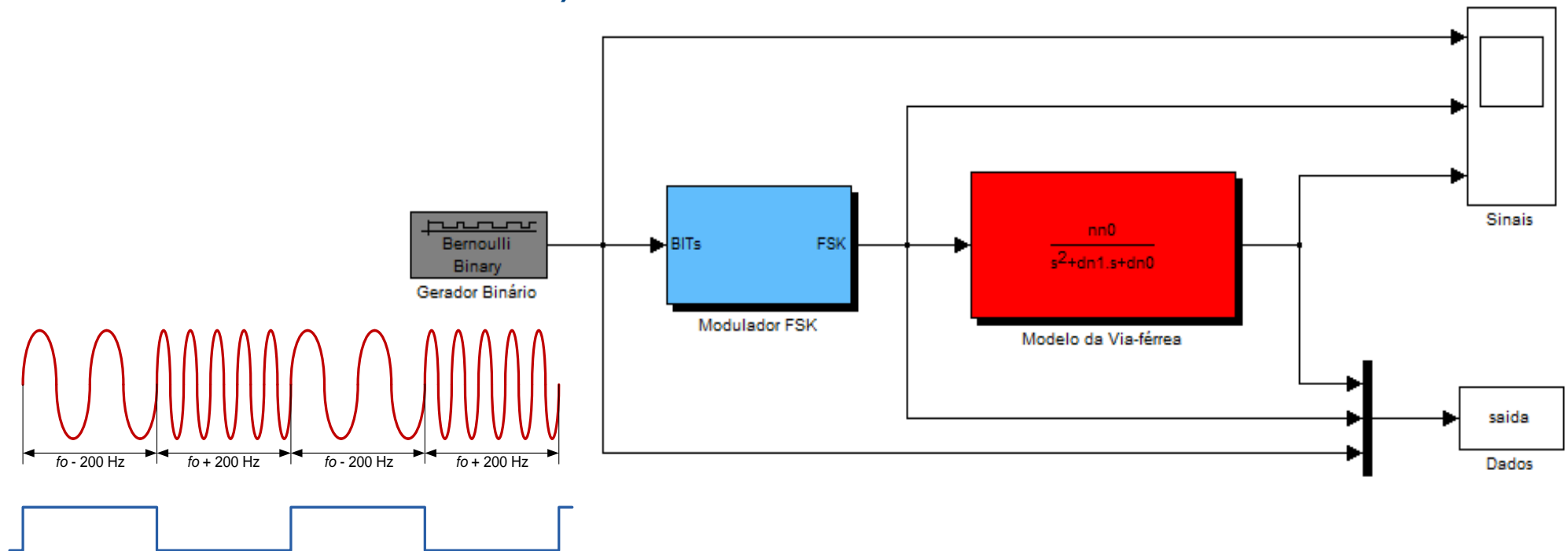


$$V_o(S) = \frac{Z_B}{Z_C + Z_B} \times V_i(S) \Leftrightarrow \frac{V_o(S)}{V_i(S)} = \frac{Z_B}{Z_C + Z_B} \Leftrightarrow H(S) = \frac{\frac{1}{G + S.C}}{(R + S.L) + \frac{1}{G + S.C}} = \dots$$
$$\dots = \frac{1}{S^2.L.C + S(C.R + L.G) + (1 + R.G)} = \frac{\frac{1}{L.C}}{S^2 + S\left(\frac{R}{L} + \frac{G}{C}\right) + \left(\frac{1}{L.C} + \frac{R.G}{L.C}\right)}$$

- Modelo elétrico da via-férrea verificado como sistema estável (sem zeros e com 2 polos no semiplano esquerdo do plano complexo).



- ◆ Implementação do processo (simulação/geração de sinais em *Simulink*).



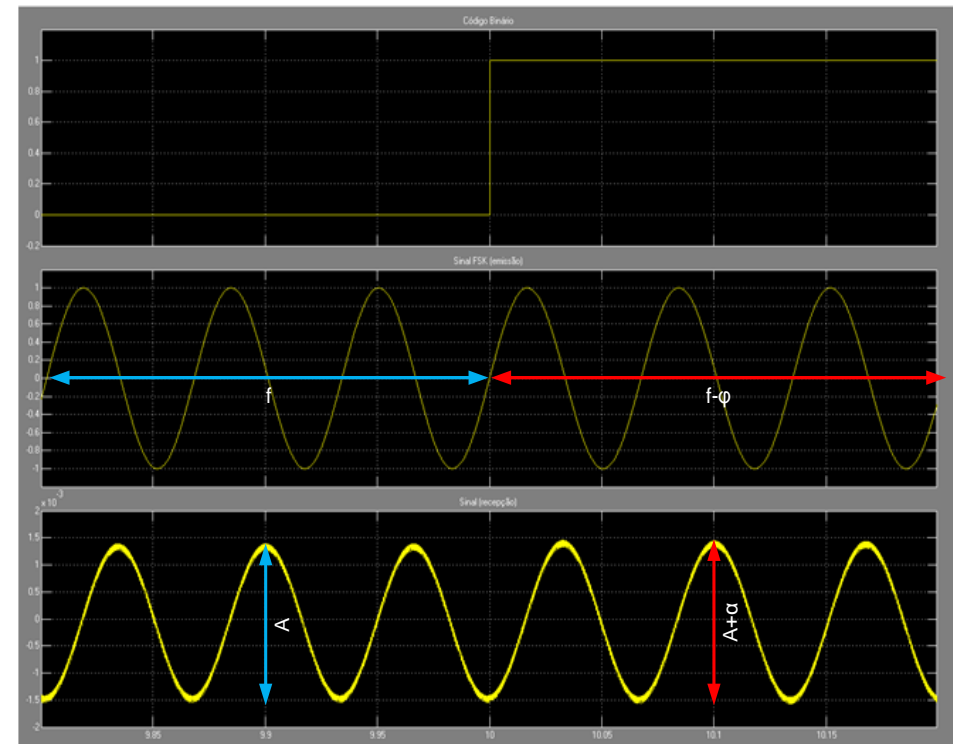
- ◆ Utilização do circuito de via para transmissão de informações de condução (sinal digital FSK).

- Amplitudes dos sinais do processo na ausência de falhas – sistema SISO (*Single Input to Single Output*):

- $V_i = 1$ volt;
- $V_o = 1,5$ mV.

- Sinal de saída FSK:

- $f_0 = 15,2$ kHz;
- $f_1 = 14,8$ kHz;
- $LB = 400$ Hz;
- Amplitude variável em função das distintas frequências.

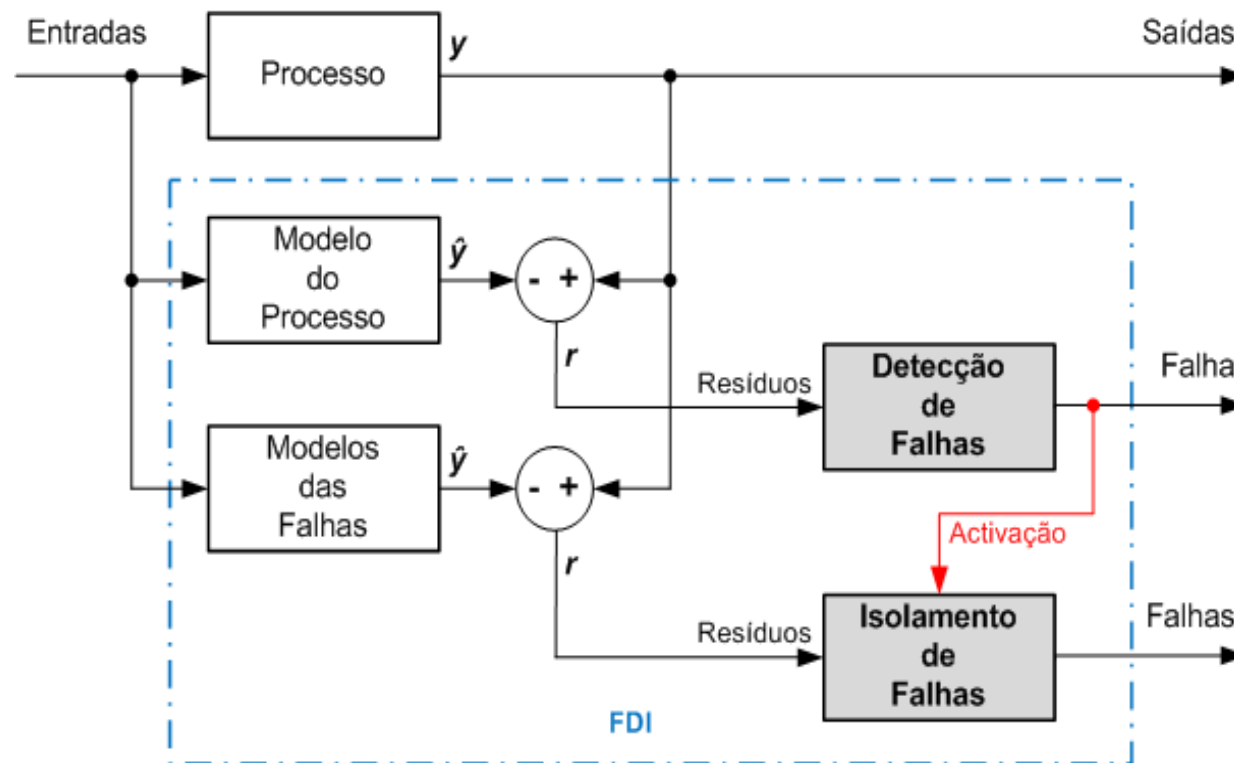


◆ Análise de resíduos:

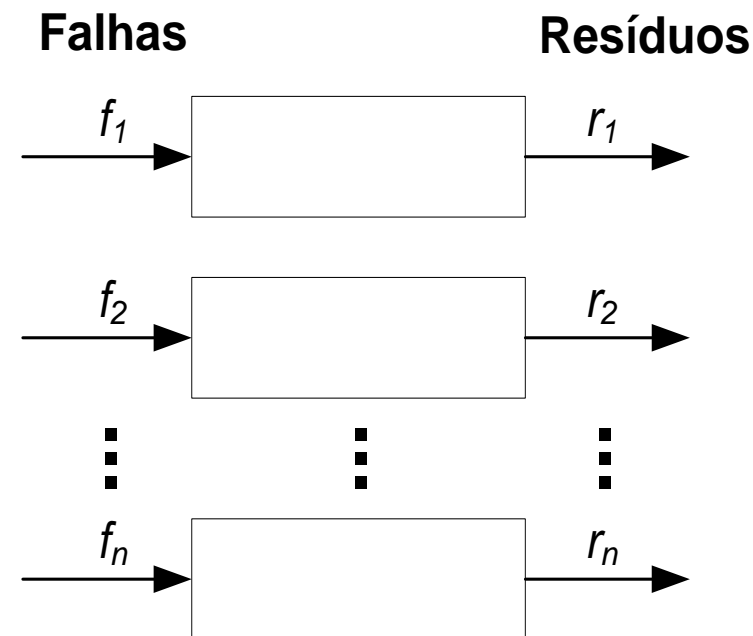
- Comparação da saída do processo e do modelo;

$$\hat{y}_j(k+1) = f_j(x(k)), \quad j = 1, \dots, m \quad r_i(k) = y_i - \hat{y}_i$$

- Desvios significativos nos resíduos implicam deteção de falhas, que ativa o estágio de isolamento.



- O circuito de via como sistema SISO (1 sinal de resíduo por cada tipo de falha).
- O isolamento de falhas segue-se à deteção e conjuga a análise de resíduos (através dos critérios de VAF e RMS) para cada modelo de falha (modelo do processo estimulado por um determinado tipo de falha).



- Uso de *toolbox fuzzy* que contempla:
 - Utilização de modelos do tipo Takagi-Sugeno;
 - Agregação de dados (*clustering*) com algoritmo do tipo *Gustafson-Kessel*;
 - Medição do desempenho dos modelos através dos índices:

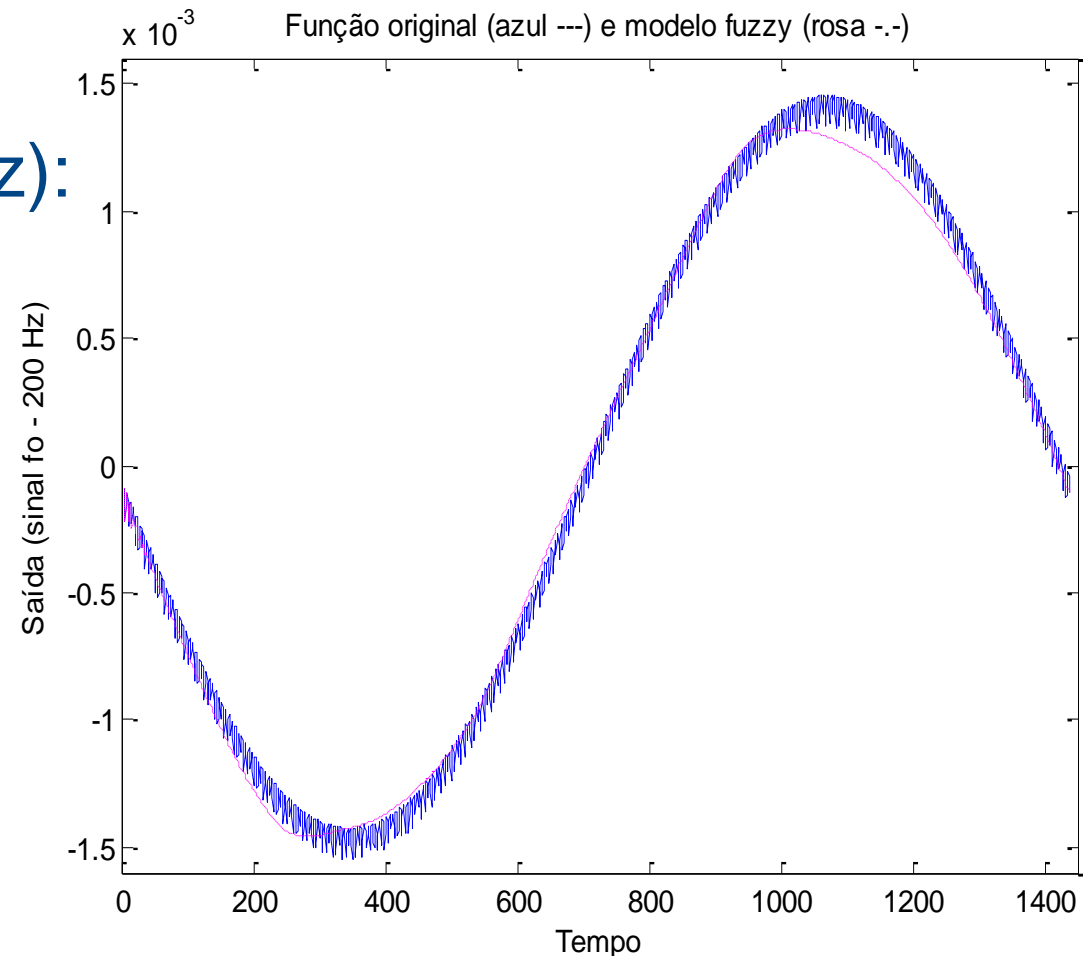
- *Variance Accounted For*,

$$VAF = \left[1 - \frac{\text{cov}(y_i - \hat{y}_i)}{\text{cov}(y_i)} \right] \times 100\%$$

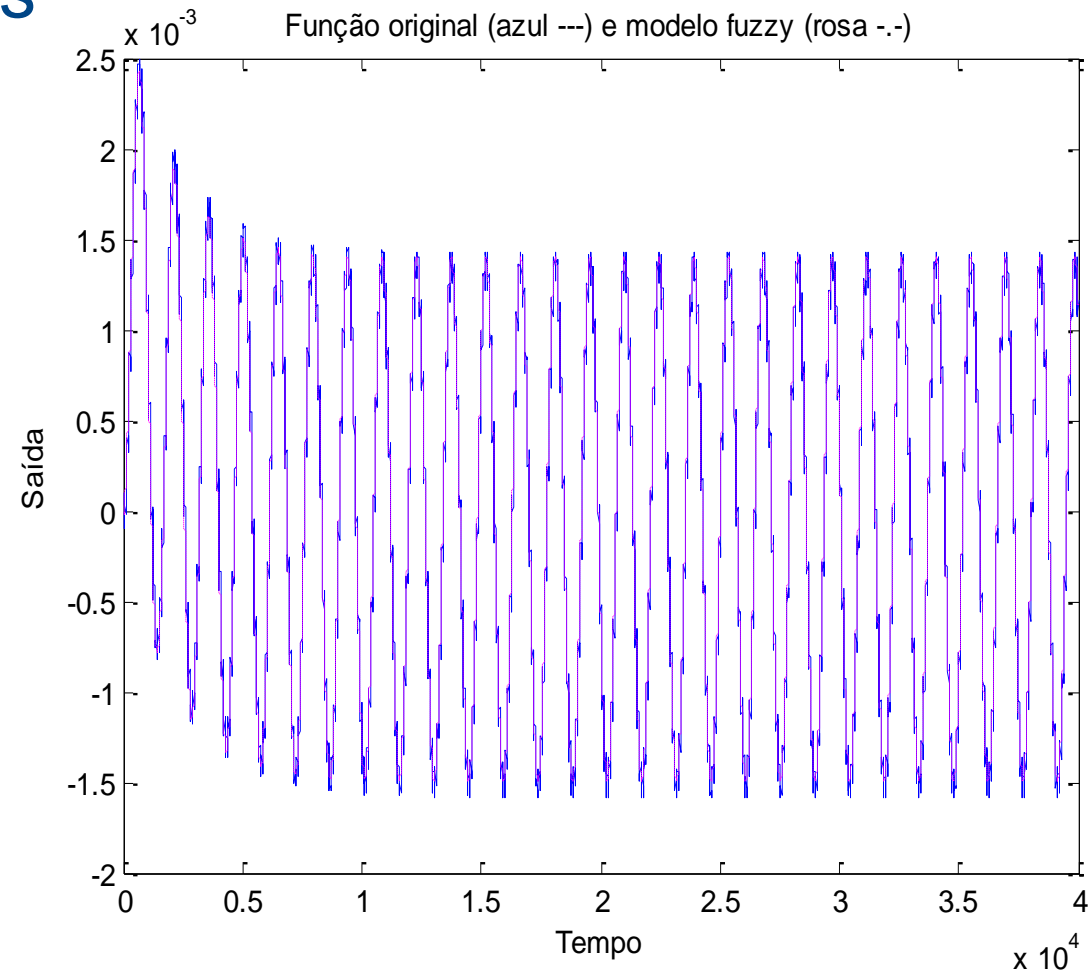
- *Root Mean Squared error*.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}}$$

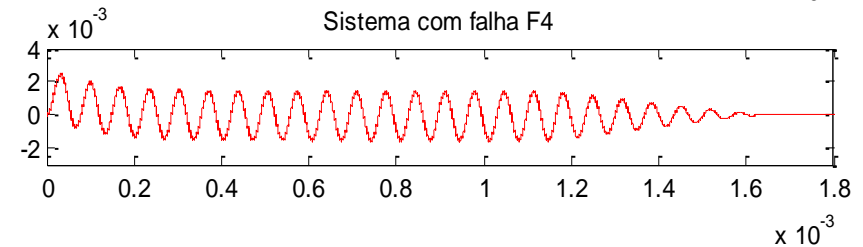
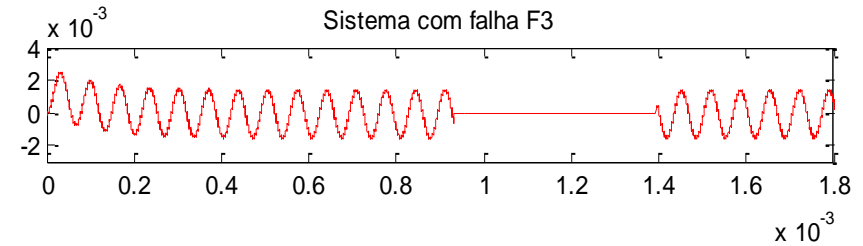
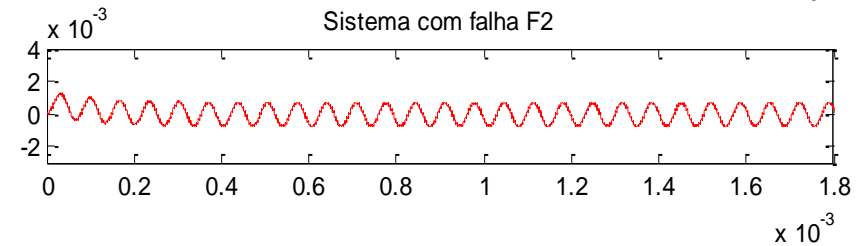
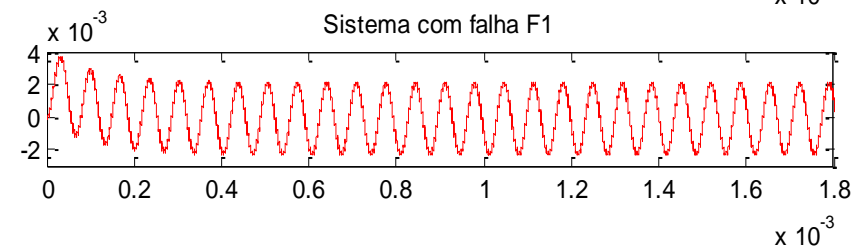
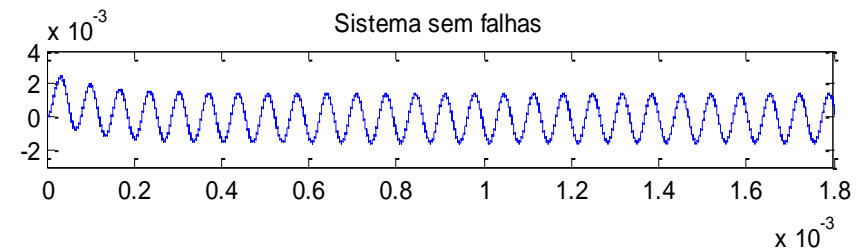
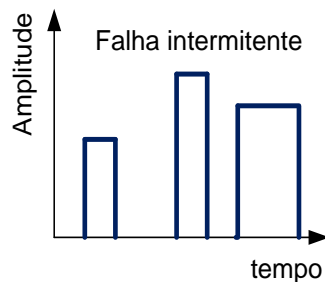
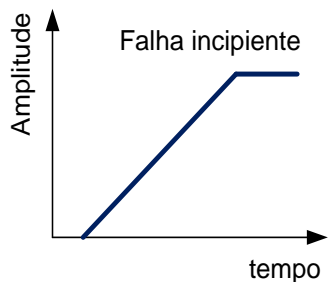
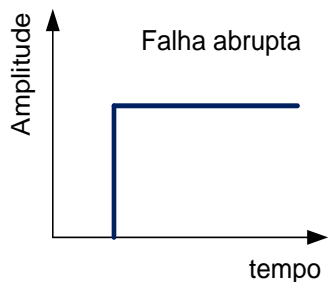
- Resultados da modelação *fuzzy* do sinal de saída FSK (modelação com a componente de f_0+200 Hz):
 - Para f_0+200 Hz:
 - VAF de 99,56%;
 - RMS de $65,50 \times 10^{-6}$;
 - Para f_0-200 Hz:
 - VAF de 99,45%;
 - RMS de $78,90 \times 10^{-6}$.



- ◆ Procura, através do método tentativa-erro, dos parâmetros adequados ($C = 1$ *cluster* de dados).
- ◆ Resultados obtidos:
 - VAF = 99,75%;
 - RMS = $51,70 \times 10^{-6}$.

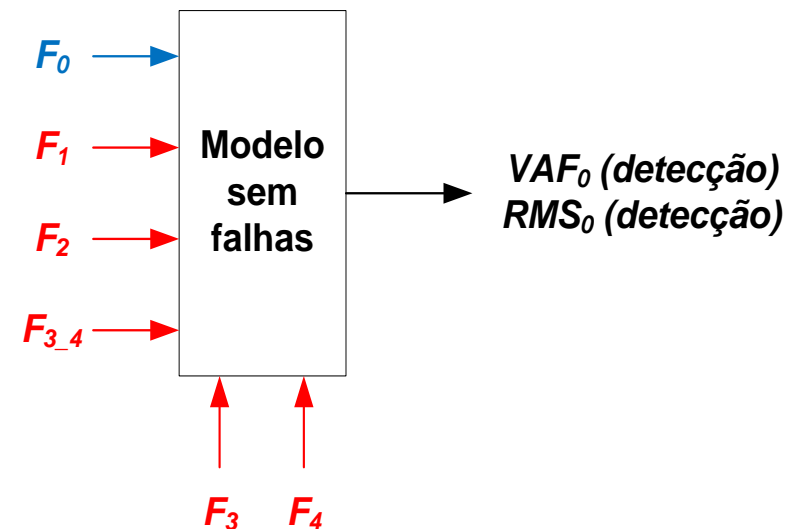


- Tipos de falhas analisadas:
 - Aumento ou diminuição do nível de sinal no recetor (F_1 e F_2);
 - Aumento da impedância da via-férrea - fratura de ligadores ou do carril (F_3);
 - Desvios lentos nos parâmetros da via-férrea (F_4).

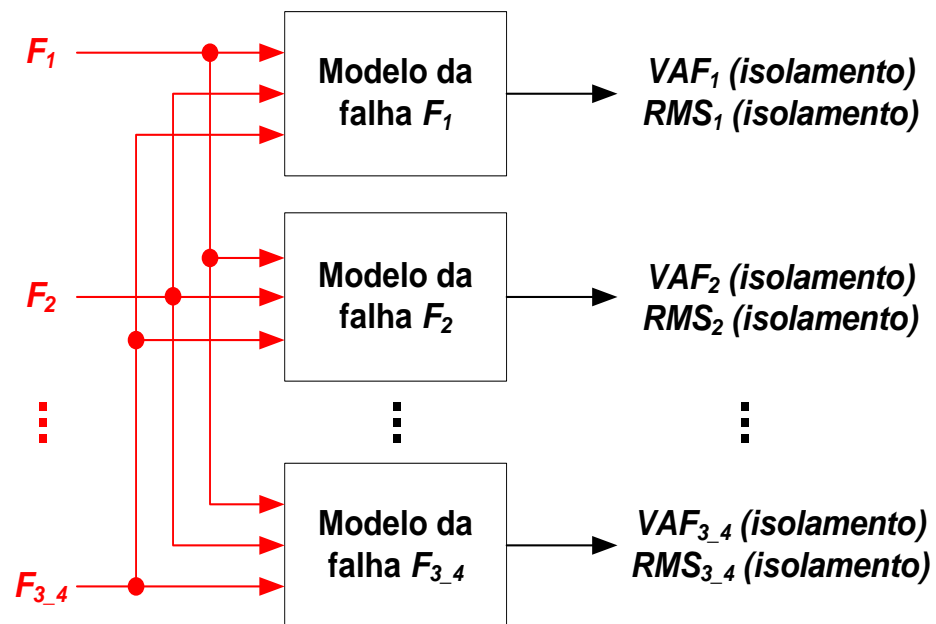


- Detetada falha quando os dados com falha se afastam dos valores de VAF a 100% e dos reduzidos valores de RMS.
- Os valores de limiar/*threshold* utilizados para deteção de falhas (também para o isolamento) são:
 - VAF < 95%;
 - RMS > 100×10^{-6} .
 - Sujeitos a afinação (*tuning*)...

	Dados F_0	Dados F_1	Dados F_2	Dados F_3	Dados F_4	Dados F_{3_4}
VAF	99,75	88,59	0,63	67,90	71,88	0,00
RMS ($\times 10^{-6}$)	51,78	531,07	522,45	516,67	471,15	1000,00



- Os dados com falha aproximam-se de valores de VAF a 100% quando comparados com os do modelo da própria falha.

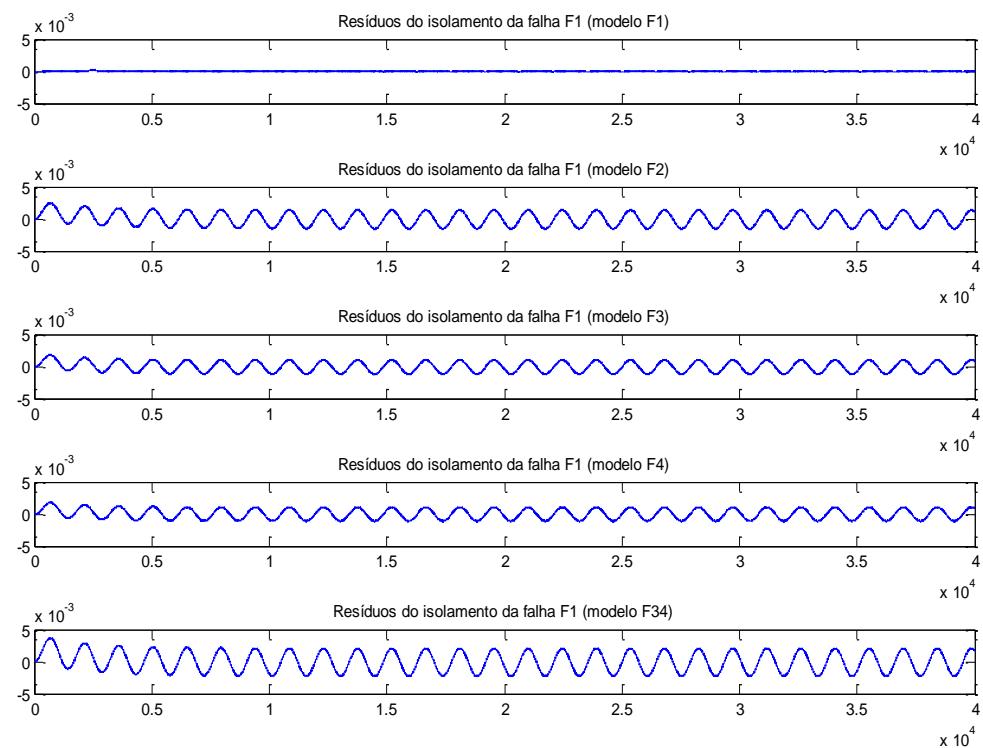
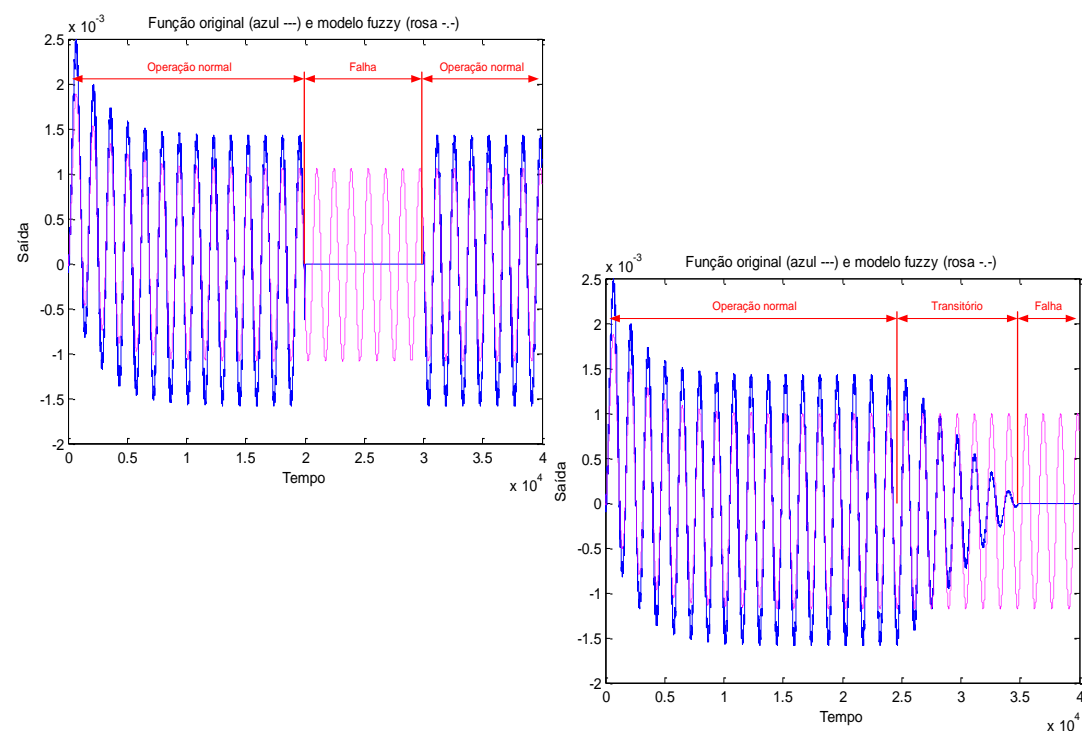


VAF	Modelo F_1	Modelo F_2	Modelo F_3	Modelo F_4	Modelo F_{3_4}
Dados F_1	99,75	55,32	74,71	75,23	0,00
Dados F_2	0,00	99,75	75,23	73,44	0,00
Dados F_3	3,36	66,76	75,77	75,88	0,00
Dados F_4	4,10	70,49	80,09	80,22	0,00
Dados F_{3_4}	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00

- ◆ Índices de desempenho de RMS abaixo do *threshold* de 100×10^{-6} , implicando o isolamento das falhas.
- ◆ Os valores para os índices de RMS seguem o mesmo padrão dos de VAF.

RMS ($\times 10^{-6}$)	Modelo F_1	Modelo F_2	Modelo F_3	Modelo F_4	Modelo F_{3_4}
Dados F_1	77,66	1100,00	790,52	784,16	1600,00
Dados F_2	1000,00	25,89	264,73	271,29	524,10
Dados F_3	896,24	526,39	449,04	451,20	912,75
Dados F_4	870,02	483,19	396,90	398,50	889,30
Dados F_{3_4}	1600,00	522,70	785,60	792,12	0,00

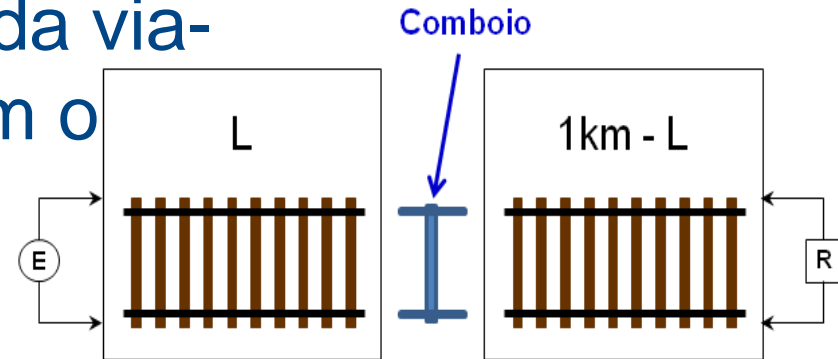
- Os dados das falhas dos tipos F_3 e F_4 são agregados num padrão de falha F_{3_4} para coerente isolamento.



- Comprova-se que a informação contida nos sinais de resíduo permite o isolamento das falhas.

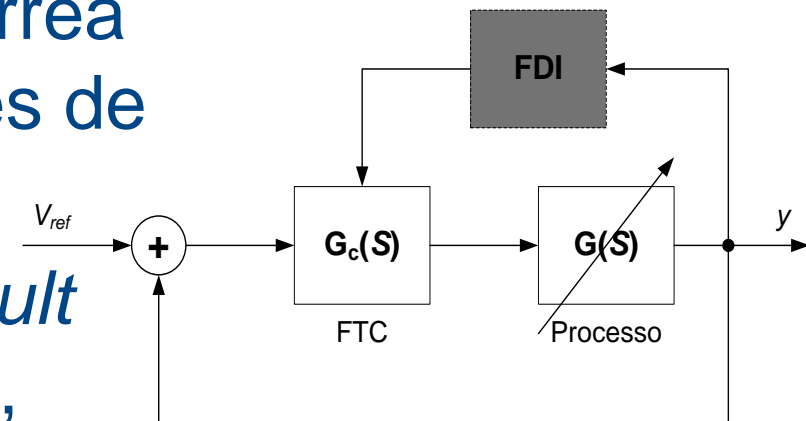
- ◆ A abordagem apresentada obteve bons resultados na detecção e no isolamento de falhas, manifestando elevada apetência para utilização no diagnóstico de falhas em circuitos de via.
- ◆ Em processos de elevada complexidade, não lineares e quando a informação sobre o processo não é totalmente conhecida a abordagem de FDI *fuzzy* baseada em modelo é uma boa opção.
- ◆ A adequabilidade às várias gerações de circuitos de via instalados na Rede REFER é reduzida devido à sua localização e obsolescência, vislumbrando-se potencial aplicação a futuras tecnologias (interessa à indústria...).

- Consolidação do modelo elétrico da via-férrea através de dados reais, com o objetivo de localização (não só deteção) de comboios.



- Análise da variação lenta (degradação) dos parâmetros elétricos da via-férrea como falhas incipientes – situações de eminência de avaria.

- Aplicação de técnicas de FTC (*Fault Tolerant Control*) a circuitos de via, ajustando o nível do sinal de emissão, compensando a degradação do meio físico de transmissão (via-férrea).



Fim da apresentação



Grato pela atenção dispensada...

nsbarrento@refer.pt