



GPC/010

21 a 26 de Outubro de 2001  
Campinas - São Paulo - Brasil

## GRUPO V

### GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

#### ALGORITMO DE ALTA VELOCIDADE PARA A PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Ervaldo Garcia Júnior (\*)

Instituto Mauá de Tecnologia

Eduardo César Senger

Universidade de São Paulo

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é o de apresentar um algoritmo de equação diferencial que foi modificado a partir de um algoritmo proposto em 1982 por Bornard e Bastide [8], estudar o seu desempenho frente a uma falta e compará-lo com o algoritmo de Fourier.

**PALAVRAS-CHAVE :** Proteção Digital, Automação, Algoritmos, Simulação.

## 1.0 INTRODUÇÃO

Os relés digitais de distância utilizados para proteção de linhas de transmissão que funcionam com o algoritmo baseado na análise de Fourier são os mais utilizados devido à sua ótima característica de filtragem do sinal. Esse tipo de algoritmo utiliza uma janela de dados relativamente longa (1 ciclo de 60 Hz) e por isso apresenta um tempo de resposta em torno de 17 ms (1 ciclo). Sua principal fonte de erro é a componente aperiódica exponencial presente principalmente nos sinais de corrente de falta. Para linhas de transmissão de EHV, para as quais o tempo de atuação da proteção é extremamente importante, torna-se interessante investigar a utilização de algoritmos com janelas de dados mais curtas e que conseqüentemente apresentem tempos de atuação menores. A principal classe desse tipo de algoritmo se baseia na equação diferencial da linha de transmissão e são conhecidos como Algoritmos Diferenciais. Esses algoritmos apresentam tempos de atuação menores que 1 ciclo o que os tornam uma boa opção para serem utilizados em um esquema de proteção. A componente aperiódica exponencial é prevista no modelo da linha de transmissão e não reflete de maneira desfavorável em seu desempenho.

## 2.0 RELÉS DIGITAIS

Os relés digitais são hoje o que há de mais moderno na concepção da proteção de um sistema de potência, apresentando uma série de vantagens sobre os eletromecânicos, que fazem com que estes sejam seus substitutos naturais, como :

- Ausência de partes móveis, reduzindo a manutenção devido a desgaste no material por corrosão e/ou oxidação.
- Sistema de proteção mais confiável pois os relés digitais estão constantemente em funcionamento, fazendo uma autoverificação em suas partes ativas. Este recurso é chamado de autoteste;
- Comunicação de dados, que permite que o relé receba e transmita dados referentes à tarefa a qual se destina;
- Todos os ajustes e alterações da função de proteção são feitos por software dando uma maior flexibilidade ao sistema;
- Possibilidade de se implementar algoritmos para o processamento de sinais mais sofisticados e complexos, garantindo um melhor desempenho do sistema;
- Podem utilizar hardware padronizado para as diversas funções de proteção o que facilita a manutenção;
- Devido à facilidade de comunicação torna-se também mais fácil a integração com outros sistemas através de redes.

Isso faz com que os relés digitais sejam muito estudados, com o objetivo de encontrar melhores algoritmos para que estes alcancem melhores desempenhos na detecção da falta.

Pode-se representar um relé digital conforme a figura 1 (pág 5).

As funções das principais partes do relé são :

- Sistema de entrada de dados analógicos :
  - Prover a blindagem e a proteção contra surtos, o acondicionamento, a filtragem analógica e a digitalização do sinal.
- Sistema de entrada/Sistema de saída digital :
  - Fazer a interface entre os sinais do microprocessador e os sinais externos, além da blindagem e da proteção contra surtos.
- Algoritmo de medição :
  - Resgatar a parcela do sinal, de interesse à proteção e estimar o valor da impedância.
- Lógica do relé :
  - Determinar as características funcionais do relé e enviar o sinal de controle (trip) que atuará o disjuntor.
- Ajustes:
  - Permitir o ajuste de parâmetros referentes à lógica do relé.

### 3.0 ALGORITMOS DE MEDIÇÃO PARA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

No relé digital as características mais importantes, são definidas fundamentalmente pelo software utilizado.

A parcela mais importante do software para os relés de distância, é o algoritmo de medição utilizado no cálculo da impedância vista pelo relé.

Os algoritmos que se baseiam na Transformada Discreta de Fourier são hoje os mais utilizados na implementação de relés de distância, devido ao fato deles apresentarem uma ótima característica de filtragem, ou seja, todas harmônicas inteiras múltiplas da componente fundamental são rejeitadas. Há uma boa atenuação da componente aperiódica exponencial, porém, a mesma não é totalmente eliminada e pode provocar erros no cálculo da impedância.

Pode-se obter a componente fundamental do sinal a partir da Transformada Discreta de Fourier (TDF). As equações (1) e (2) mostram como são obtidas as componentes senoidal e cossenoidal da tensão:

$$V_s = \frac{2}{N} \sum_{l=0}^N v_{k-N+l} \sin \left( \frac{2\pi l}{N} \right) \quad (1)$$

$$V_c = \frac{2}{N} \sum_{l=0}^N v_{k-N+l} \cos \left( \frac{2\pi l}{N} \right) \quad (2)$$

Com as componentes senoidal e cossenoidal do sinal de tensão, calcula-se a amplitude e a fase através das seguintes equações :

$$V_n = (V_c^2 + V_s^2)^{1/2} \quad (3)$$

$$\theta_n = \text{tg}^{-1} \left( \frac{-V_s}{V_c} \right) \quad (4)$$

O mesmo aplica-se também para a corrente.

Com base nas equações acima, vários autores propuseram soluções para a estimativa da impedância da linha de transmissão, com o objetivo de atenuar o erro causado pela componente aperiódica exponencial, como PADKE et al [2], VERDUZCO et al [3], SANTANA [4], entre outros.

Ao contrário do algoritmo de Fourier que se baseia em um modelo do sinal os algoritmos de equação diferencial baseiam-se em um modelo do sistema. Pode-se representar a linha de transmissão de forma simplificada conforme mostra a figura (2):

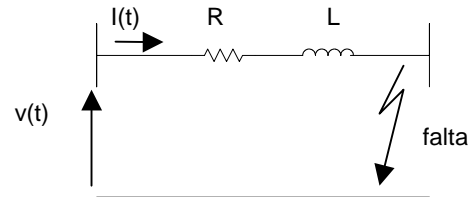


FIGURA 2 – Modelo de 1ª ordem de uma LT

Através de uma equação diferencial de primeira ordem pode-se escrever que :

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt} \quad (5)$$

Vários autores propuseram soluções para a estimativa de R e L da linha de transmissão através da aplicação de métodos matemáticos na equação (5), com o objetivo de obter melhores desempenhos no algoritmo, como MC-INNES e MORRISON [5], RAJBAR e CORY [6], SMOLINSKI [7], e outros.

BORNARD e BASTIDE [8] propuseram um algoritmo que se baseia na aplicação do método dos mínimos quadrados na equação diferencial (5) onde são obtidas as seguintes equações para o cálculo de R e L da linha :

$$R = \frac{b_1(P_{22} - P_{12}) - b_2(P_{12} - P_{11})}{P_{11}P_{12} - P_{12}^2} \quad (6)$$

$$L = T \frac{b_1P_{12} - b_2P_{11}}{P_{11}P_{22} - P_{12}^2} \quad (7)$$

onde :

$$[b] = \begin{bmatrix} \sum_{k=0}^{m-1} i(t-kT)v(t-kT) \\ \sum_{k=0}^{m-1} i(t-(k+1)T)v(t-kT) \end{bmatrix} \quad (8)$$

e :

$$[P] = \begin{bmatrix} \sum_{k=0}^{m-1} i^2(t-kT) & \sum_{k=0}^{m-1} i(t-kT)i(t-(k+1)T) \\ \sum_{k=0}^{m-1} i(t-kT)i(t-(k+1)T) & \sum_{k=1}^m i^2(t-kT) \end{bmatrix} \quad (9)$$

#### 4.0 ALGORITMO MODIFICADO DA EQUAÇÃO DIFERENCIAL

O algoritmo modificado da equação diferencial apresentado neste trabalho baseia-se no algoritmo proposto por BORNARD e BASTIDE [8], ou seja, também é aplicado o método dos mínimos quadrados na equação diferencial de uma linha de transmissão modelada pela equação (5).

As equações obtidas com a aplicação do método, para o cálculo de R e L da linha de transmissão são mostradas a seguir :

(10)

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n i_j'^2 \sum_{j=1}^n i_j v_j - \sum_{j=1}^n i_j i_j' \sum_{j=1}^n i_j' v_j}{\sum_{j=1}^n i_j'^2 \sum_{j=1}^n i_j^2 - \left( \sum_{j=1}^n i_j i_j' \right)^2} \quad (11)$$

$$L = \frac{\sum_{j=1}^n i_j^2 \sum_{j=1}^n i_j' v_j - \sum_{j=1}^n i_j i_j' \sum_{j=1}^n i_j v_j}{\sum_{j=1}^n i_j'^2 \sum_{j=1}^n i_j^2 - \left( \sum_{j=1}^n i_j i_j' \right)^2}$$

O cálculo das derivadas será aproximado por :

$$i_j' = \frac{i_{j+1} - i_{j-1}}{2T} \quad (12)$$

Esta aproximação das derivadas é o que diferencia este algoritmo do original proposto por Bornard e Bastide. Neste a aproximação das derivadas é dada por :

$$i_j' = \frac{i_j - i_{j-1}}{T} \quad (13)$$

Conhecendo-se as equações para o cálculo de R e L da linha, é possível fixar os principais parâmetros para o algoritmo diferencial modificado : frequência de amostragem e comprimento da janela de dados. Esses parâmetros serão fixados a partir dos resultados verificados em uma simulação da resposta do algoritmo para diversos tipos de faltas.

Para essa análise considerou-se a linha de transmissão mostrada na figura (3), cujos parâmetros são : em seqüência positiva - R=0,025 Ω/km ; L=0,897 mH/km ; C=0,01292 μF/km ; e em seqüência zero : R=0,398 Ω/km ; L=3,097 mH/km ; C=0,00806 μF/km ;

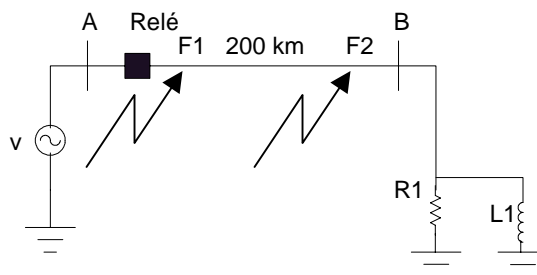


FIGURA 3 – Rede utilizada para análise de desempenho dos algoritmos.

O sistema da figura (3) foi simulado no programa EMTF (Eletromagnetic Transient Program) onde foram gerados os sinais de tensão e corrente para as diversas condições de curto-circuito como faltas trifásicas, fase-fase e fase-terra nos pontos F1 e F2 sendo F1 distante de 50km do relé e F2 distante de 150km do relé, com ângulos de incidência de falta de 0° e 90°, sem resistência de falta e com resistência de falta de 10 Ω.

O programa de simulação do relé digital que utiliza o algoritmo proposto foi feito no programa PC-MATLAB versão 5.3. O programa é composto pelas seguintes etapas : filtragem analógica, digitalização do sinal, algoritmo de medição e cálculo da impedância.

Foram feitos ensaios para faltas trifásicas, fase-fase e fase-terra onde, inicialmente, variou-se o tamanho da janela de dados (j) e a frequência de amostragem (f<sub>a</sub>). Considerou-se f<sub>a</sub>=8, 12, 16 e 24 amostras por ciclo no relé com as mesmas condições de faltas descritas anteriormente, com o objetivo de escolher a janela de dados e a frequência de amostragem em que fosse obtido o melhor desempenho do relé.

O objetivo principal desta análise é o de obter uma frequência de amostragem com uma janela de dados que resulte em tempos de convergência T<sub>conv</sub> de ½ ciclo em todas as condições de falta descritas. Verificou-se na análise feita que a frequência de amostragem e o comprimento da janela de dados que resultaram no melhor desempenho do relé, além de ter-se uma menor carga computacional foi para f<sub>a</sub>=16 amostras/ciclo com j=3 amostras.

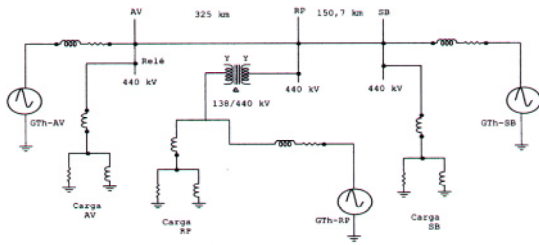
A seguir faz-se uma comparação com o desempenho do algoritmo de Bornard e Bastide, que foi utilizado como base para o algoritmo diferencial modificado, no sistema da figura (3) com as mesmas condições de falta já descritas.

A tabela 1 (pág.5) mostra os resultados obtidos para faltas trifásicas, fase-fase e fase-terra no ponto F1.

#### 5. ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO

Neste item será analisado o desempenho do algoritmo diferencial modificado que será comparado com o de Fourier. Para esta análise foi feita a simulação no EMTF de um sistema de potência mais complexo do que o apresentado no

Item anterior, para a geração dos sinais de tensão e corrente em diversas condições de falta. Foi utilizado o sistema CESP ilustrado na figura (4) :



**FIGURA 4 – Sistema CESP simplificado**

O sistema é alimentado por uma tensão de 440 kV, tem três barras, Água Vermelha, Ribeirão Preto e Santa Bárbara, e duas linhas : AV-RP com 325 km e RP-SB com 150,7 km de extensão.

Os parâmetros das linhas de transmissão do sistema da figura (6) são :

Em Seqüência Positiva :

Linha AV-RP –  $R=0,025 \Omega/\text{km}$  ;  $L=0,897 \text{ mH}/\text{km}$  ;  $C=0,01292 \mu\text{F}/\text{km}$  ; Compr.=325 km.

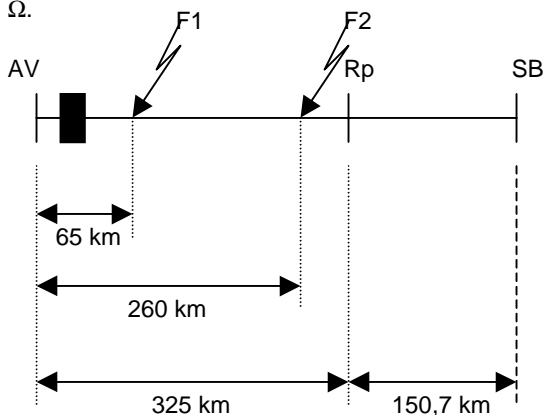
Linha RP-SB –  $R=0,025 \Omega/\text{km}$  ;  $L=0,897 \text{ mH}/\text{km}$  ;  $C=0,01292 \mu\text{F}/\text{km}$  ; Compr.=150,7 km.

Em Seqüência Zero :

Linha AV-RP –  $R=0,398 \Omega/\text{km}$  ;  $L=3,097 \text{ mH}/\text{km}$  ;  $C=0,00806 \mu\text{F}/\text{km}$  ; Compr.=325 km.

Linha RP-SB –  $R=0,398 \Omega/\text{km}$  ;  $L=3,097 \text{ mH}/\text{km}$  ;  $C=0,00806 \mu\text{F}/\text{km}$  ; Compr.=150,7 km.

Com base neste sistema foram gerados os sinais de tensão e de corrente, para faltas trifásicas, fase-fase e fase-terra, nos pontos F1(65 km do barramento AV) e F2(260 km do barramento AV), com ângulos de incidência de falta de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , sem resistência de falta e com resistência de falta de  $10 \Omega$ .



**FIGURA 5 – Diagrama simplificado do sistema CESP.**

São apresentados alguns dos resultados obtidos da análise e comparação dos algoritmos para as condições de faltas citadas.

A tabela 2 (pág.6) mostra os tempos de convergência  $T_{\text{conv}}$  em ciclos de pós falta, para faltas sólidas no ponto F1. Com base nesses resultados é possível analisar o desempenho de cada algoritmo.

As figuras 6 a e 7 a (pág.6) mostram a trajetória da impedância para os curtos trifásicos e as figuras 6 b e 7 b (pág.6) mostram os valores da impedância aparente e da reatância, ambas em função do tempo.

## 6.0 CONCLUSÃO

O trabalho apresentou os resultados referentes ao comportamento de um algoritmo utilizado na estimativa da impedância em um relé digital de distância para proteção de linhas de EHV, que é baseado na equação diferencial da linha, chamado Algoritmo de Equação Diferencial. O algoritmo mostrado foi modificado em relação ao original proposto por Bornard e Bastide, onde alterou-se o método utilizado no cálculo das derivadas da corrente.

Fez-se uma análise comparativa do desempenho do algoritmo proposto com o algoritmo baseado na análise de Fourier, por ser hoje o mais utilizado e por se tratar de uma classe diferente de algoritmo em relação ao diferencial.

Verificou-se que para todas as situações de faltas consideradas para o sistema de potência utilizado, o Algoritmo Diferencial Modificado apresentou melhor comportamento do que o de Fourier, no que diz respeito à velocidade de atuação e à estabilidade.

## BIBLIOGRAFIA

[1] SENGHER, E.C. **Proteção digital de sobrecorrente**. São Paulo, 1990. 220p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[2] PHADKE, A.G. et al. A digital computer system for EHV substations: analysis and field test. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v.95, p. 291-301, 1976.

[3] VERDUZCO, I.D. et al. Evaluación de filtros digitales de fourier, seno y coseno para protección de distancia. In: **SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE**, Curitiba, 1995. Curitiba, Inepac, 1995. P. 1-14.

[4] SANTANA, N.N. **Pré-filtragem da componente aperiódica exponencial para algoritmos utilizados em relés digitais de distância**. São Paulo, 1998. 124p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[5] McINNES, A.D.; MORRISON, I.F. Real time calculation of resistance and reactance for transmission line protection by digital computer. **Journal Institute of Electrical Engineers (Australia)**, v.EE7, p. 16-23, 1970.

[6] RAJBAR, A.M.; CORY, B.J. An improved method for the digital protection of high voltage transmission lines. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v.94, p. 544-50, 1975.

[7] SMOLINSKI, W.J. An algorithm for digital impedance calculation using a single PI section transmission line model. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v.PAS-98,n.5, p. 1546-51, 1979.

[8] BORNARD, P.; BASTIDE, J.C. A prototype of multiprocessor based distance relay. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v.101, p. 491-98, 1982.

[9] GARCIA JR, E. **Algoritmos de Alta velocidade para a proteção digital de linhas de transmissão**. São Paulo, 2000. 88p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

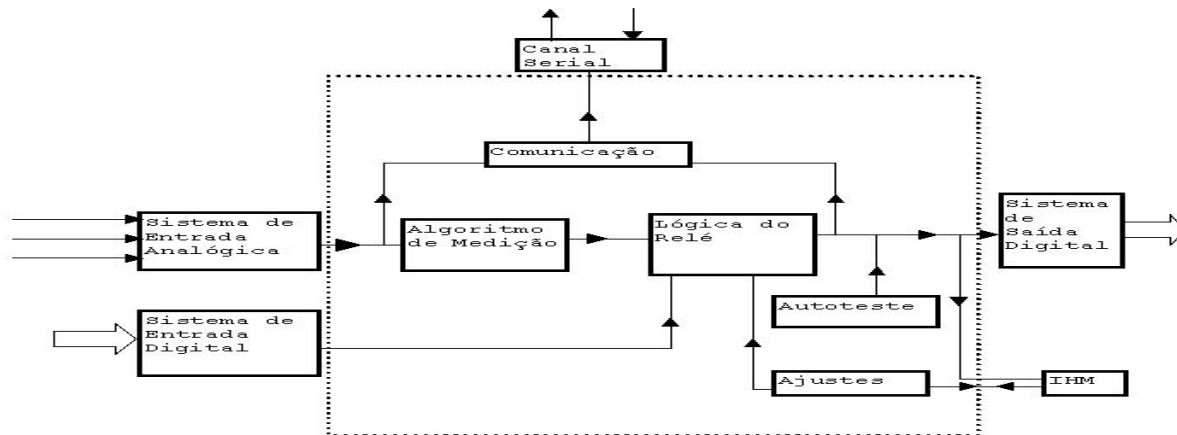


FIGURA 1 – Diagrama funcional de um relé digital

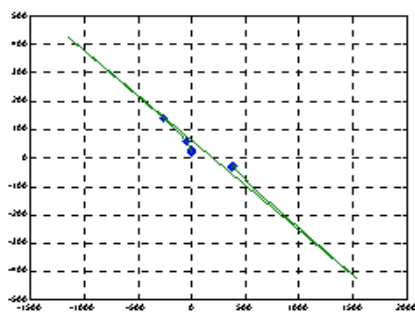
TABELA 1 – Tempos de convergência  $T_{conv}$  em ciclos de pós falta para faltas no ponto F1.

Algoritmo	Tipo de Falta					
	Trifásica		Fase-Fase		Fase-Terra	
	$Y=0^\circ$	$Y=90^\circ$	$Y=0^\circ$	$Y=90^\circ$	$Y=0^\circ$	$Y=90^\circ$
<i>Equação Diferencial Modificado</i>	0,5313	0,4588	0,5313	0,4484	0,4480	0,4588
<i>Bornard e Bastide</i>	1,5107	2,2925	1,5107	2,3133	1,4586	0,8131

TABELA 2 – Tempos de convergência  $T_{conv}$  em ciclos de pós falta, para faltas sólidas no ponto F1

Algoritmo	Tipo de Falta					
	Trifásica		Fase-Fase		Fase-Terra	
	$Y=0^\circ$	$Y=90^\circ$	$Y=0^\circ$	$Y=90^\circ$	$Y=0^\circ$	$Y=90^\circ$
<b><i>Equação Diferencial Modificado</i></b>	0,4375	0,4276	0,4375	0,4276	0,4271	0,4283
<b><i>Fourier 1 ciclo</i></b>	1,2294	1,2402	1,2294	1,2402	1,2294	1,2402

a)



b)

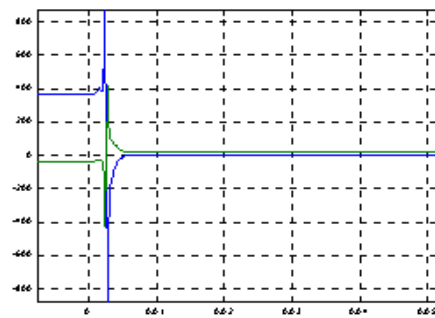
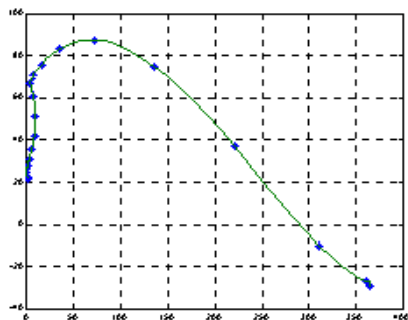


FIGURA 6 – Diferencial Modificado – Falta trifásica no ponto F1 com ângulo de incidência de falta de  $0^\circ$  a) Trajetória da impedância ZAB b) R e X em função do tempo

a)



b)

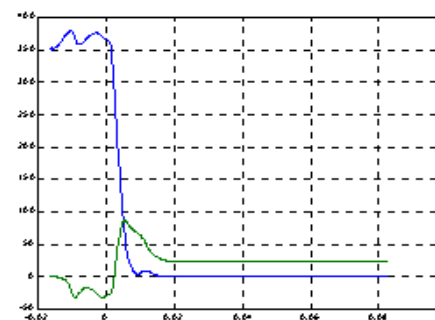


FIGURA 7 – Fourier 1 ciclo – Falta trifásica no ponto F1 com ângulo de incidência de falta de  $0^\circ$  a) Trajetória da impedância ZAB b) R e X em função do tempo