

Universidade Federal de Campina  
Grande  
Centro de Ciências e Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica



***Projeto de Conclusão:  
Introdução ao Estudo da Ferroressonância***

*Aluno: Almir Pereira Menezes*

*Curso: Engenharia Elétrica*

*Matrícula: 20021140*

*Orientador: Francisco das Chagas Guerra*

*Campina Grande, 2004*



M543p Menezes, Almir Pereira.

Projeto de conclusão: introdução ao estudo da ferroressonância. / Almir Pereira Menezes. - Campina Grande - PB: [s.n], 2004.

26 f.

Orientador: Professor Me. Francisco das Chagas Fernandes Guerra.

Trabalho de Conclusão de Curso - Monografia; (Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

1. Ferroressonância em circuitos. 2. Circuitos de serviços auxiliares. 3. Linhas de transmissão paralelas. 4. Compensação Shunt. 5. Transformadores de potencial - circuitos. 6. Método de Runge-Kutta. 7. Linguagem Fortran. I. Guerra, Francisco das Chagas Fernandes. II. Título.

CDU:621.3(043.1)

**Elaboração da Ficha Catalográfica:**

Johnny Rodrigues Barbosa  
Bibliotecário-Documentalista  
CRB-15/626

## ÍNDICE

	pág.
1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1 Descrição Geral do Fenômeno.....	3
1.2 Análise Fasorial do Fenômeno.....	4
1.3 Equacionamento.....	8
2. CONFIGURAÇÕES CLÁSSICAS DE OCORRÊNCIA DO FENÔMENO.....	10
2.1 Ferroressonância em Circuitos de Serviços Auxiliares.....	10
2.2 Ferroressonância em Linhas de Transmissão Paralelas com Compensação <i>Shunt</i> ...11	
2.3 Ferroressonância em Circuitos Contendo Transformadores de Potencial.....	12
3. ATIVIDADES REALIZADAS.....	13
3.1 Determinação dos parâmetros do circuito.....	13
3.2 Resultados das Simulações .....	17
4. CONCLUSÃO.....	23
5. BIBLIOGRAFIA.....	24

## 1- INTRODUÇÃO

### 1.1 - Descrição Geral do Fenômeno

O termo “ferroressonância” nomeia um fenômeno próprio dos circuitos não-lineares que contêm capacitores e elementos com núcleos magnéticos saturáveis. Sua ocorrência verifica-se quando há uma variação na amplitude ou frequência da excitação ou em certos parâmetros do sistema, implicando isto numa variação relativamente grande e descontínua em amplitude e fase na saída. Supondo a excitação com forma senoidal, as formas de onda de tensão e de corrente nos elementos do circuito apresentam-se distorcidas, em longa duração, com valores de picos pronunciados, de modo a colocar em risco a integridade dos equipamentos.

Geralmente, os sistemas elétricos são projetados de forma a evitar estas situações, mas, a prática tem mostrado que este fenômeno ocorre em determinadas configurações e modos de operação do sistema. A ferroressonância pode envolver a conexão de componentes indutivos e capacitivos em série ou em paralelo, sendo os valores máximos das sobretensões e sobrecorrentes limitados pelas características de magnetização e resistências dos componentes.

Um caso prático de ferroressonância ocorre em sistemas de distribuição de energia elétrica nos quais há a abertura de uma das fases de uma linha ligada a um transformador com enrolamento secundário em vazio, como é mostrado na Fig. 1.

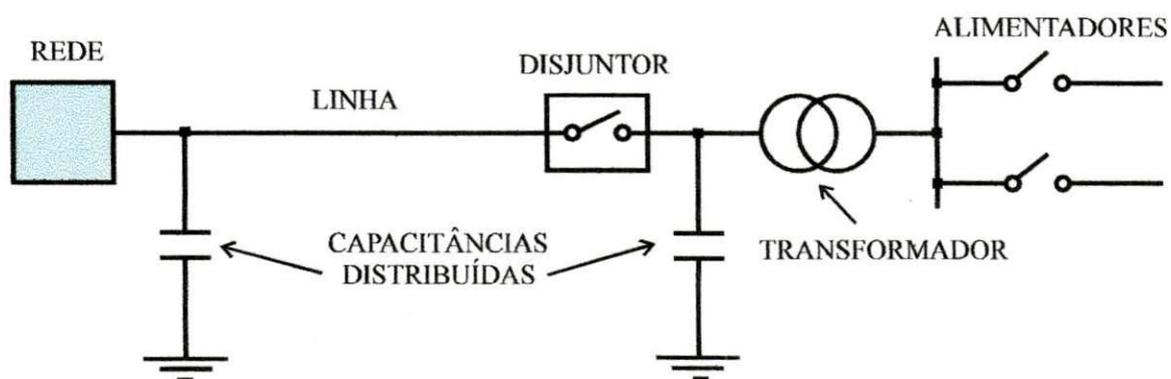


Fig. 1 - Situação de ferroressonância em um sistema de distribuição de energia elétrica.

Os condutores da rede possuem capacitâncias fase-terra distribuídas em paralelo. Após a abertura de um disjuntor ou fusível, ocorre uma mudança na configuração do circuito equivalente do sistema, de modo que uma capacitância em série é introduzida, propiciando o surgimento de tal fenômeno.

## 1.2 - Análise Fasorial do Fenômeno

A análise feita a seguir é restrita aos circuitos monofásicos com indutâncias saturáveis, cujas características de magnetização são levantadas em laboratório e fornecidas em termos de valores RMS de tensão e de corrente de magnetização. Inicialmente, é assumido que as correntes e as tensões não-senoidais podem ser substituídas por equivalentes senoidais de mesmo valor RMS. Assim, os efeitos considerados só se referem à frequência fundamental, não sendo levados em conta os efeitos das harmônicas e sub-harmônicas. O circuito a ser estudado é mostrado na Fig. 2. O mesmo é uma representação simplificada do sistema de distribuição da Fig. 1, onde são desprezadas as resistências em série da linha e do transformador. O transformador é representado por uma indutância não-linear (desprezando-se o efeito de histerese), em paralelo com uma resistência, a qual é associada às perdas do núcleo do transformador.

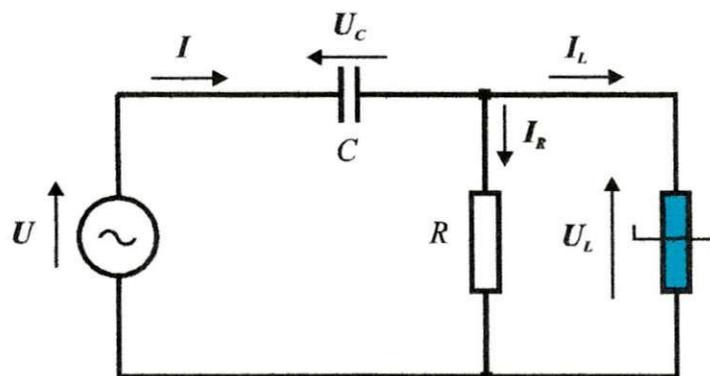


Fig. 2 - Circuito RLC não-linear com indutor saturável.

O diagrama fasorial deste circuito acha-se mostrado na Fig. 3 ( a ). Inicialmente, as perdas serão desprezadas, fazendo-se  $R = \infty$ . Assim, o diagrama fasorial modifica-se, de modo que  $I_R = 0$  e  $I = I_L$ .  $U$  e  $U_L$  passam a estar em fase entre si, ambos defasados de  $180^\circ$  de  $U_C$ , como mostra a figura 1.3 ( b ).

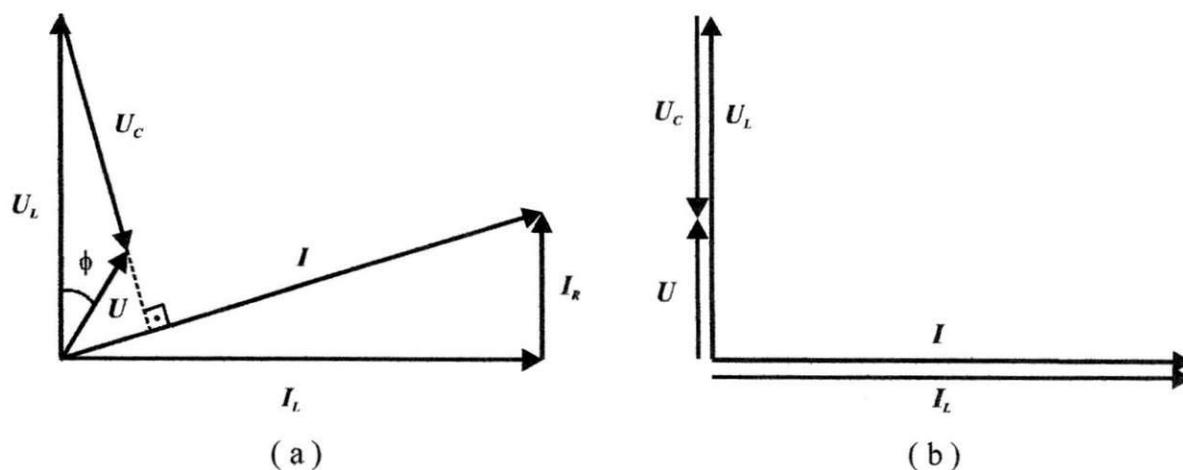


Fig. 3 - ( a ) Diagrama fasorial do circuito da Fig. 2, ( b ) diagrama fasorial para  $R = \infty$ .

Neste caso, pode-se escrever para os módulos das tensões:

$$U_L = U + U_C = U + (1/\omega C) I \quad (1)$$

Com base nesta equação, pode-se construir o gráfico da Fig. 4, onde é mostrado o ponto de operação inicial,  $P_1$ . Este ponto corresponde à intercessão da reta descrita por ( 1 ) com a curva de magnetização do indutor, para a tensão da fonte  $U = U_1$ .

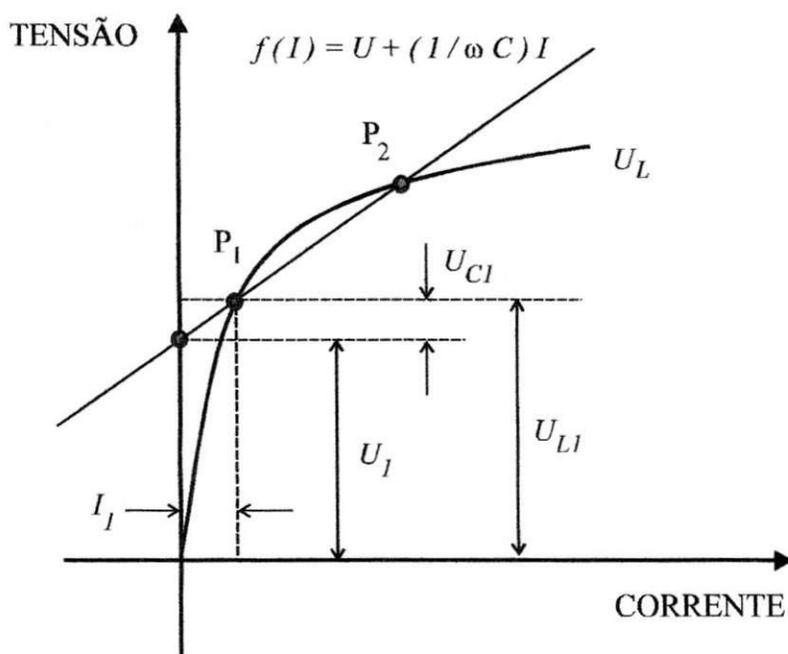


Fig. 4 - Condição de funcionamento estável de um circuito LC em série não-linear.

Neste ponto de funcionamento estável, o circuito assume um comportamento predominantemente indutivo ( $U_L > U_C$ ). Se ocorrer um aumento de  $U$  ou redução da frequência  $\omega$  ou da capacitância  $C$ , o novo ponto de trabalho tende a se deslocar para cima. Entretanto, como  $P_1$  acha-se próximo ao joelho da característica do indutor, pode ocorrer que as duas curvas não se interceptem no primeiro quadrante. De acordo com a Fig. 5, o novo ponto de operação passa a ser  $P'_3$ , situado no terceiro quadrante.

Deste modo conclui-se que:

- o circuito muda bruscamente de comportamento, passando a predominar o efeito capacitivo ( agora  $U_C > U_L$  );
- além da mudança súbita na fase da corrente, a amplitude também aumenta de  $I_1$  para  $I_3$ ;
- as tensões  $U_L$  e  $U_C$  assumem valores elevados, trazendo perigo à instalação;
- como a corrente de magnetização do núcleo do transformador aumenta, o fluxo também aumenta, ocorrendo sobreaquecimento, uma vez que as perdas magnéticas crescem com o quadrado do fluxo.

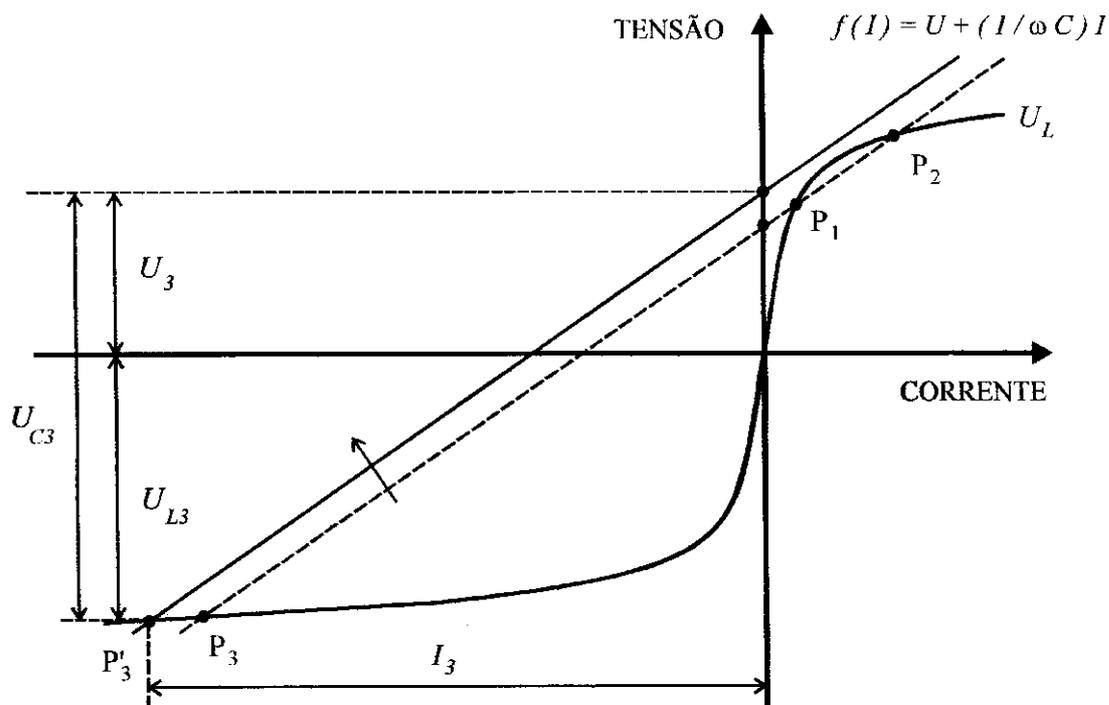


Fig. 5 - Comportamento de um circuito LC não-linear ferro-ressonante em série. com aumento de  $U$ .

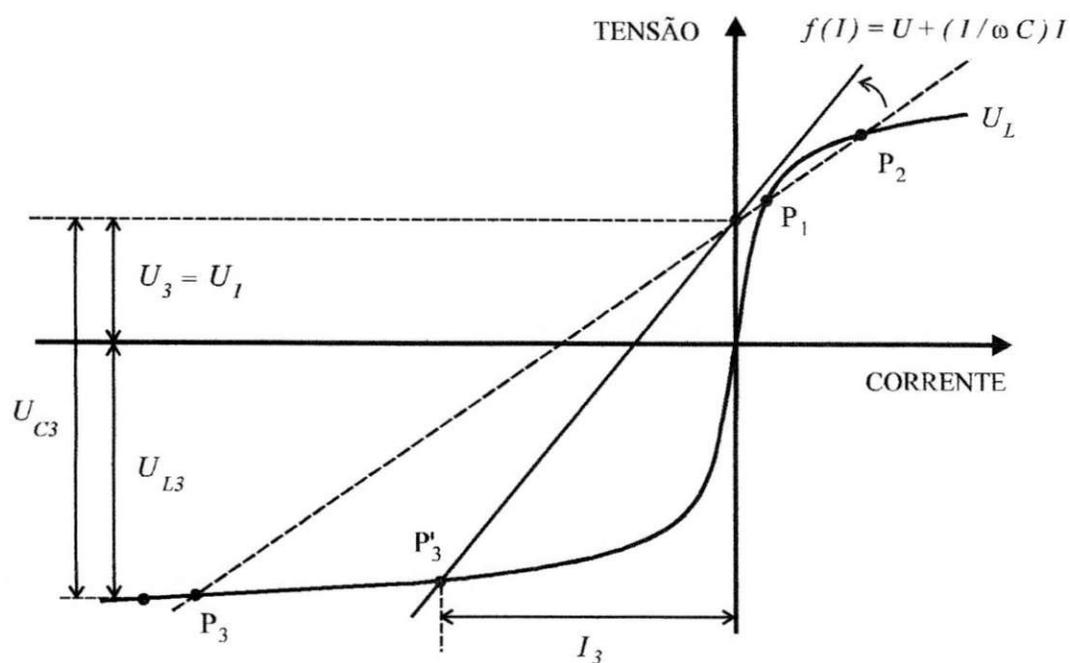


Fig. 6 - Comportamento de um circuito LC não-linear ferro-ressonante em série, com redução de  $C$  ou de  $\omega$ .

A Fig. 7 mostra o gráfico da tensão *versus* corrente, em módulo, para o indutor, capacitor e fonte, considerando um ajuste gradual da tensão desta última.

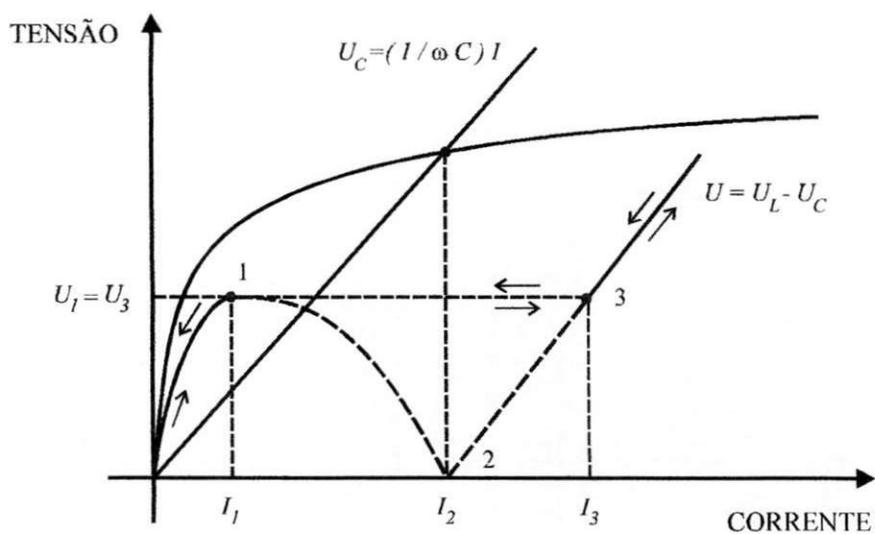


Fig. 7 - Variações das tensões em função da corrente em um circuito LC não-linear em série, considerando-se  $\omega$  e  $C$  fixos e variando-se a tensão da fonte,  $U$ .

Supondo um aumento gradual da tensão a partir de zero, observa-se que a corrente também aumenta gradualmente. No ponto 1, qualquer incremento de  $U$  implica num aumento abrupto de  $I$  e de  $U_C$ , havendo também um crescimento menos pronunciado de  $U_L$ . Assim, a variação do ponto de operação entre 1 e 3 é realizada de modo descontínuo, mudando o comportamento do circuito de indutivo ( $U_L > U_C$ ) para capacitivo ( $U_C > U_L$ ), do modo indicado pelas setas.

A determinação da capacitância necessária para ocorrência da ferroressonância pode ser realizada através do seguinte procedimento:

- Levanta-se em laboratório a curva  $U_L$  versus  $I$  do indutor;
- Traça-se uma reta tangente a essa curva, com coeficiente linear igual à tensão da fonte;
- Determina-se o valor do coeficiente angular  $1 / (\omega C)$ , e, a seguir, o valor de  $C$ .

A Fig. 8 descreve o procedimento adotado.

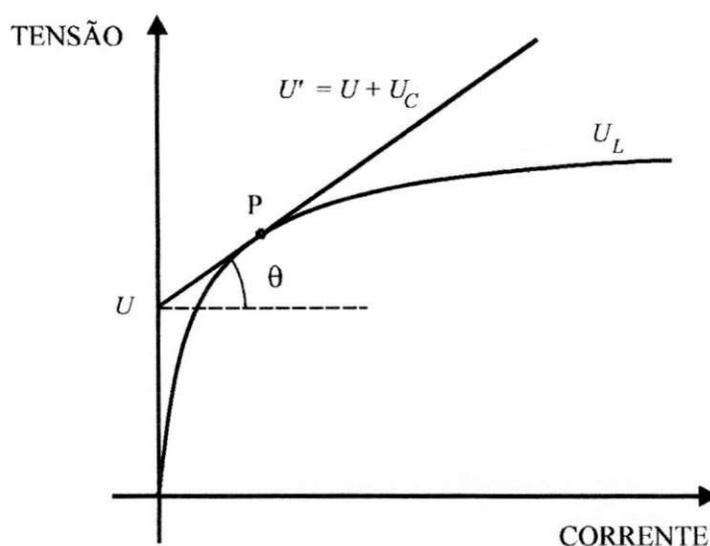


Fig. 8 - Método gráfico para determinação da capacitância necessária à produção de ferroressonância em um circuito LC série.

### 1.3 - Equacionamento

No circuito da Fig. 2, serão agora consideradas as perdas resistivas. A curva de magnetização corrente versus fluxo de enlace do indutor é aproximada pela seguinte função polinomial:

$$i_m = f(\lambda) = a\lambda + b\lambda^n \quad (2)$$

onde  $n$  é um número inteiro ímpar.; se  $u = U_m \text{ sen } \omega t$ , é fácil deduzir que :

$$\frac{d^2\lambda}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{d\lambda}{dt} + \frac{1}{C}(a\lambda + b\lambda^n) = \omega U_m \cos \omega t \quad (3)$$

Considerando as variáveis auxiliares  $Y_1$  e  $Y_2$ , tais que:

$$Y_1 = \lambda \quad (4)$$

$$Y_2 = \frac{d\lambda}{dt} \quad (5)$$

tem-se:

$$\frac{dY_1}{dt} = Y_2 \quad (6)$$

$$\frac{dY_2}{dt} = \omega U_m \cos \omega t - \frac{1}{RC} Y_2 - \frac{1}{C} f(Y_1) \quad (7)$$

Assim, a equação ( 3 ) pode ser desmembrada no sistema de equações diferenciais de primeira ordem constituído por ( 6 ) e ( 7 ).

As tensões no indutor e no capacitor e a corrente são dadas por:

$$u_L = \frac{d\lambda}{dt} = Y_2 \quad (8)$$

$$u_C = u - u_L = U_m \text{ sen } \omega t - Y_2 \quad (9)$$

$$i = C \frac{du_C}{dt} = C \left( \omega U_m \cos \omega t - \frac{dY_2}{dt} \right) = \frac{dY_2}{dt} + f(Y_1) \quad (10)$$

As condições iniciais do circuito são dadas por:

$$Y_1(0) = \lambda(0) \quad (11)$$

$$Y_2(0) = u_L(0) \quad (12)$$

sendo essas condições tais que levem o circuito ao regime de ferroressonância.

Se  $u = U_m \text{sen } \omega t$ , tem-se  $u_L = U_L \text{sen}(\omega t + \phi)$ ; assim:

$$u_L(0) = U_L \text{sen } \phi = \sqrt{2} U_L \text{sen } \phi \quad (13)$$

Como  $\lambda = \int u_L dt = -(U_L / \omega) \cos(\omega t + \phi)$ , tem-se:

$$\lambda(0) = -\frac{\sqrt{2}U_L}{\omega} \cos\phi \quad (14)$$

A Fig. 9 mostra o diagrama fasorial do circuito antes de ocorrer a ferroressonância.

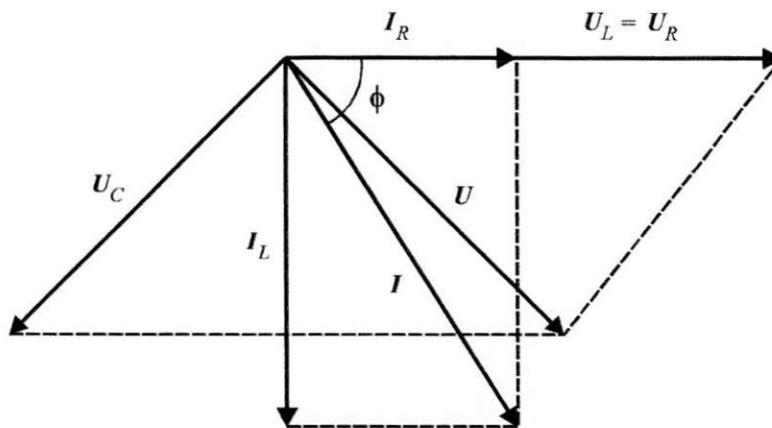


Fig. 9 - Diagrama fasorial do circuito em condições normais de funcionamento.

A solução do sistema formado por (6) e (7) pode ser obtida pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem, com condições iniciais tais que o circuito seja levado a ferroressonância.

## 2 - CONFIGURAÇÕES CLÁSSICAS DE OCORRÊNCIA DO FENÔMENO

### 2.1 - Ferroressonância em Circuitos de Serviços Auxiliares

A Fig. 10 apresenta um circuito muito propício à ocorrência de ferroressonância. Esta configuração é utilizada em circuitos de serviços auxiliares onde há cabos subterrâneos e transformadores não aterrados, sendo utilizados elos fusíveis para a proteção contra curtos-circuitos. A queima de um elo fusível leva à abertura de uma fase, de modo que a

capacitância do cabo fica em série com a indutância de magnetização do transformador, provocando ferroressonância. O mesmo pode ocorrer com a abertura de duas fases. Esta problema é facilmente evitado com a utilização de disjuntores nos lugares dos elos fusíveis, de modo a proporcionar uma abertura tripolar. A abertura de duas fases também pode provocar ferroressonância.

Com menor probabilidade, o problema pode ocorrer com um disjuntor, quando, por uma falha mecânica, um ou dois dos pólos de deixa de abrir.

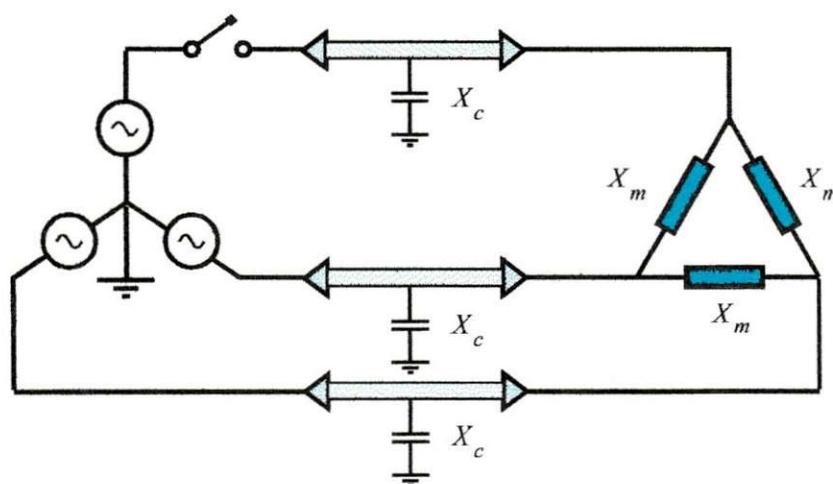


Fig. 10 - Abertura monopolar de linha a cabo isolado alimentando transformador trifásico,

## 2.2 Ferroressonância em Linhas de Transmissão Paralelas com Compensação *Shunt*

É prática usual a utilização da mesma faixa de passagem para mais de uma linha de transmissão, como também a utilização de compensação por reatores em derivação. Caso uma das linhas de transmissão esteja fora de serviço e com as suas extremidades em aberto, é muito provável que o circuito resultante seja ferroressonante. O mesmo tipo de circuito pode ser encontrado em linhas de transmissão que utilizam o religamento monopolar. A configuração mostrada na Fig. 11 é um exemplo da situação em questão. O acoplamento capacitivo entre as linhas de transmissão forma um circuito série com os reatores da linha de transmissão (com as extremidades em aberto), propiciando um circuito cuja frequência natural de oscilação normalmente é muito próxima de 60 Hz para os graus de compensação empregados. Geralmente, os picos de ressonância ocorrem para níveis de compensação entre 60 e 70% e para 100 %.

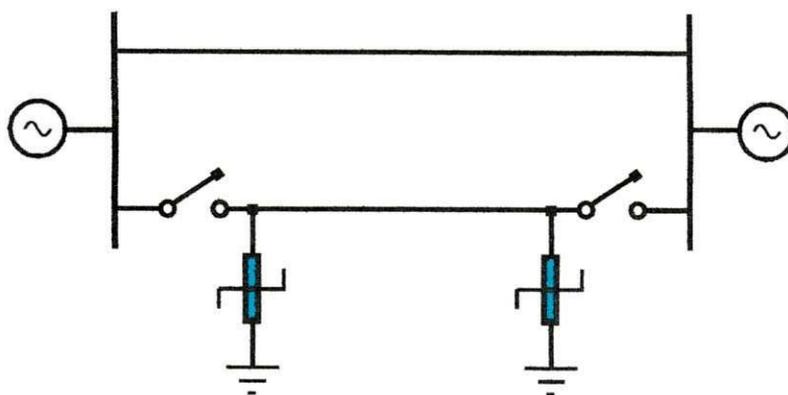


Fig. 11 - Linhas de transmissão paralelas com compensação *shunt*.

### 2.3 Ressonância em Circuitos Contendo Transformadores de Potencial

Apesar de sua probabilidade ser reduzida quando comparada aos outros tipos de ferroressonância, relata-se casos de danificação de equipamento, cuja causa foi atribuída à ocorrência de ferroressonância entre o transformador de potencial e a capacitância de equalização da tensão através dos contatos do disjuntor.

A Fig. 12 mostra um disjuntor aberto e um transformador de potencial conectado ao barramento que deveria estar desenergizado.

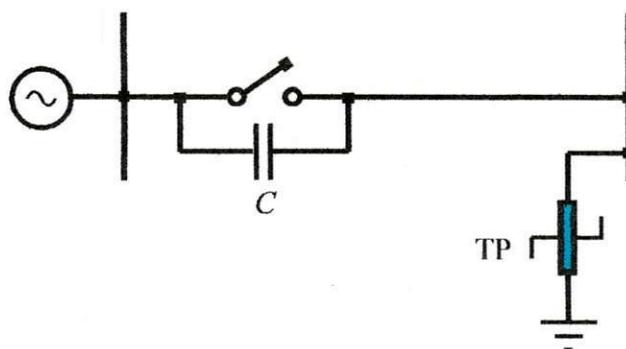


Fig. 12 - Abertura de disjuntor com capacitância de equalização de tensão ligado a barramento com transformador de potencial eletromagnético.

O transformador de potencial, apesar de isolado da rede elétrica, continua formando um circuito passível de ferroressonância constituído de sua reatância em série com a capacitância de equalização da tensão através dos contatos do disjuntor.

### 3 - ATIVIDADES REALIZADAS

#### 3.1 - Determinação dos parâmetros do circuito

No trabalho de simulação realizado considerou-se a configuração da Fig. 1, cujo circuito equivalente simplificado é mostrado na Fig. 2.

#### Determinação da curva de magnetização $\lambda - i_m$

Na determinação da característica fluxo de enlace *versus* corrente de magnetização do transformador, utilizou-se a montagem da Fig. 13, classicamente utilizada.

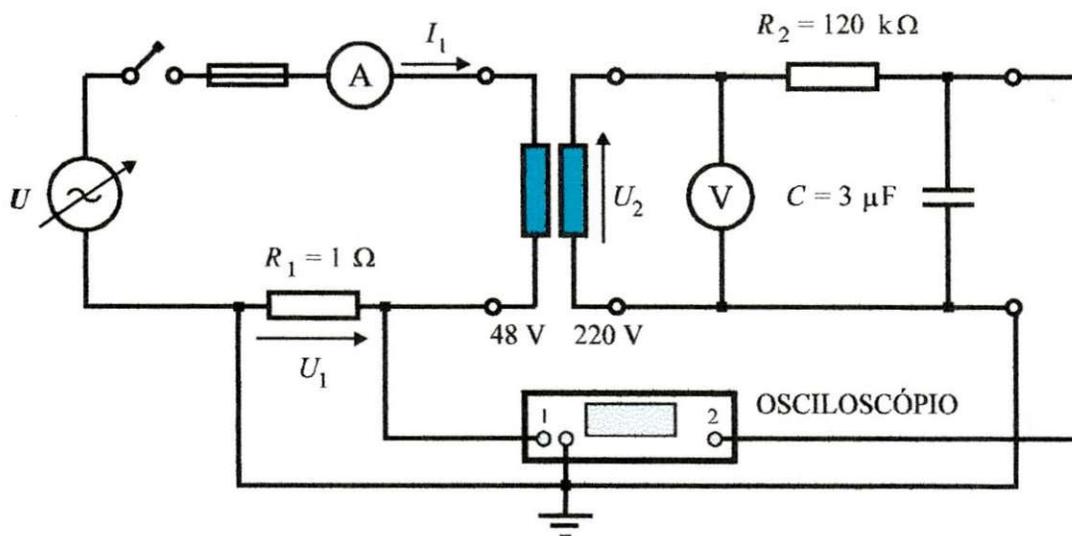


Fig. 13 - Montagem para determinação da curva de magnetização  $\lambda - i_m$

Nesta montagem, pode-se facilmente mostrar que, como  $R_2 \gg 1 / (2 \pi f C)$ , tem-se:

$$\lambda = R_2 C U_2 \quad (15)$$

$$i_m = U_1 / R_1 \quad (16)$$

Ajustou-se uma curva aos pontos obtidos no ensaio através do *software* Labfit, disponível na rede. A função que melhor se prestou a esta finalidade foi a seguinte:

$$i_m = 0.7771 \lambda + 941.1 \lambda^5$$

A curva resultante acha-se mostrada na Fig. 14.

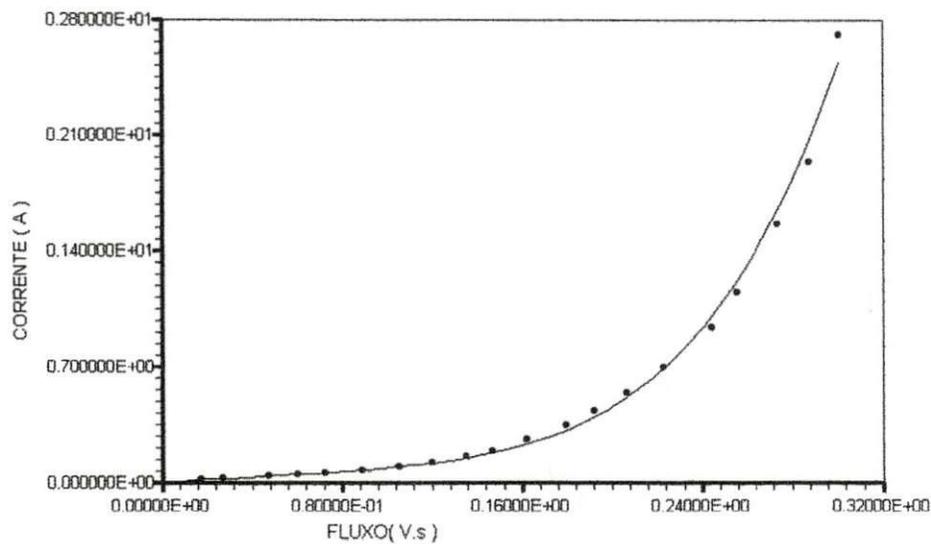


Fig. 14 - Pontos da curva de magnetização  $\lambda - i_m$  obtidos em ensaio e curva aproximada pelo *software* Labfit.

#### Determinação da resistência de perdas $R_P$

Para determinar a resistência de perdas, utilizou-se a montagem da Fig. 15.

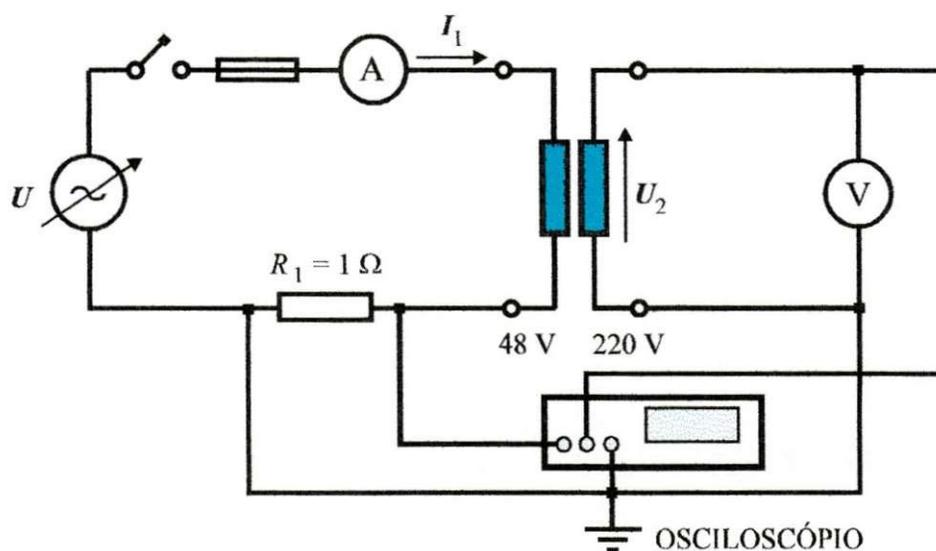


Fig. 15 - Montagem para determinação da resistência de perdas.

O osciloscópio de memória digital utilizado possui funções que permitem multiplicar dois sinais quaisquer, bem como calcular o valor médio do produto obtido, assim, torna-se possível medir a potência correspondente às perdas magnéticas no núcleo do transformador. Tomou-se a tensão no lado do secundário no sentido de evitar a inclusão das perdas ôhmicas no enrolamento primário do transformador.

A tensão no lado de 220 V foi variada na faixa de 0 a 320 V, obtendo-se os valores de perdas indicados na Tabela 1, mostrados em função da tensão variável no lado de 48 V.

Tabela 1 - Valores de perdas magnéticas em função da tensão no lado de 48 V.

$U$ (V)	10	20	30	40	50	60	70
$P$ (W)	0.115	0.444	0.863	1.460	2.222	3.040	4.568

A Fig. 16 mostre a variação de  $P$  em função de  $U^2$ .

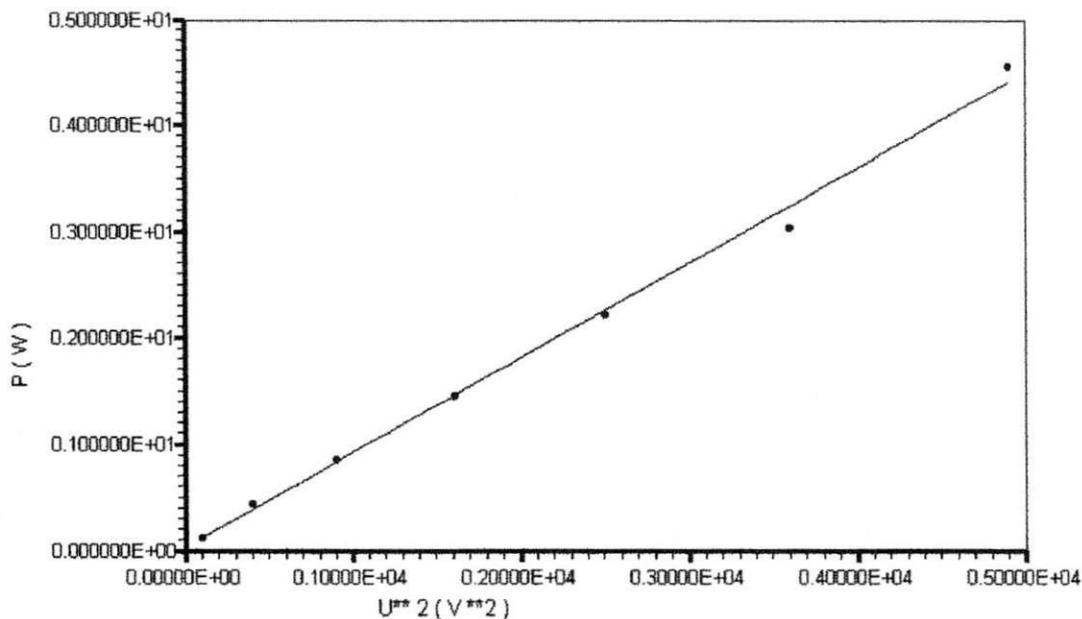


Fig. 16 - Valores de perdas no núcleo em função do quadrado da tensão no lado de 48 V.

Como  $P = U^2 / R$ , pode-se obter  $R$  tomando-se o inverso do coeficiente angular da reta da Fig. 16. Com isto, obtém-se  $R = 1119.33 \Omega$ .

### Determinação das condições iniciais

Na determinação das condições iniciais para o estabelecimento da ferroressonância, especificadas no item 1.3, utilizou-se a montagem da Fig. 17. A tensão de entrada foi gradualmente variada de 0 até o valor que produzisse o fenômeno. Após várias tentativas, estabeleceu-se com precisão máxima os valores limite de tensão no indutor,  $U_L$ , e a defasagem  $\phi$  entre  $U_L$  e  $U$  ( tensão na fonte ). Para cada um desses valores, obteve-se os conjuntos de condições iniciais mostrados na Tabela 2.

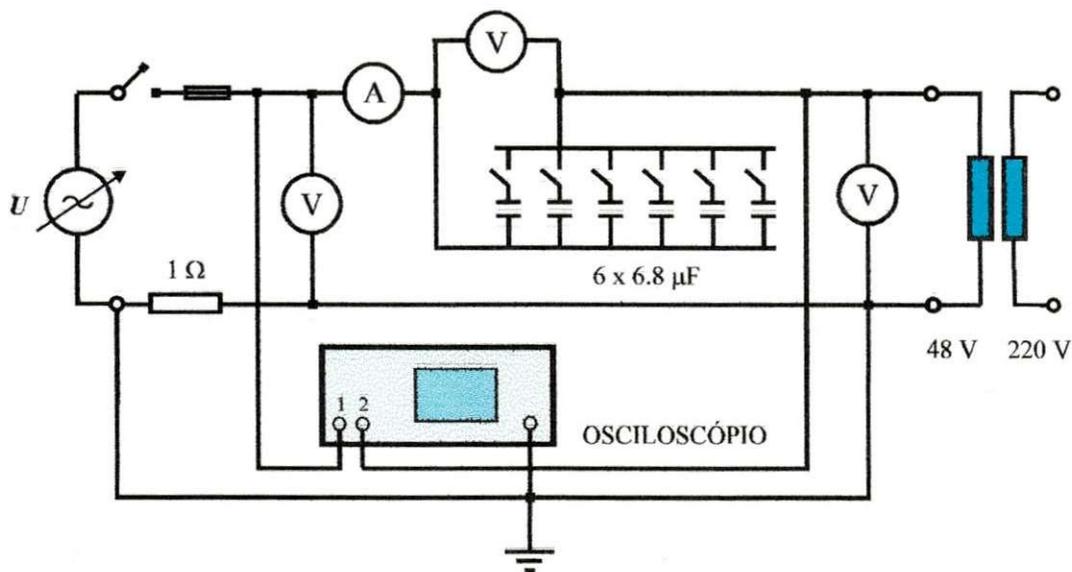


Fig.17 - Montagem para determinação das condições iniciais.

Tabela 2 - Condições iniciais para o estabelecimento da ferroressonancia.

C ( $\mu$ F )	2 x 6.8		4 x 6.8		6 x 6.8	
	REGIME NORMAL	FERRO-RESSONÂNCIA	REGIME NORMAL	FERRO-RESSONÂNCIA	REGIME NORMAL	FERRO-RESSONÂNCIA
$U$ ( V )	21.9	21.6	32.0	31.4	38.5	37.4
$U_L$ ( V )	35.7	63.7	45.5	79.3	52.3	86.5
$U_C$ ( V )	17.1	82.0	15.1	109.4	15.5	122.5
$I$ ( A )	0.08	0.35	0.13	0.890	0.21	1.48
$\phi$ ( $^\circ$ )	- 25.2	81.6	- 47.0	91.2	- 53.4	100.0

### 3.2 - Resultados das Simulações

Para simular o fenômeno de ferroressonância em um circuito RLC em série, foi feito um programa em FORTRAN, cuja listagem encontra-se em anexo. Este programa tem como dados de entrada os parâmetros dos elementos do circuito e da fonte, o degrau de tempo, bem como os valores iniciais  $\phi$  e  $U_L$ .

Os oscilogramas de tensões e correntes obtidos durante a simulação são mostrados a seguir.

O degrau de tempo utilizado foi de  $1 \times 10^{-5}$  s.

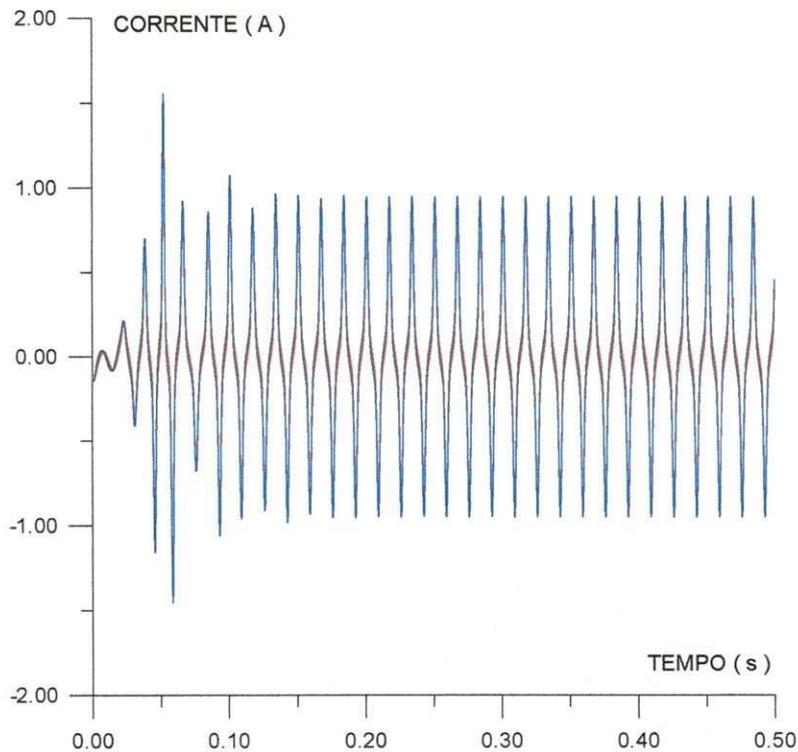


Fig.18 - Corrente de magnetização,  $i_m$  (vermelho), e corrente de excitação,  $i_e$  (azul) versus tempo para  $C = 13.6 \mu\text{F}$ .

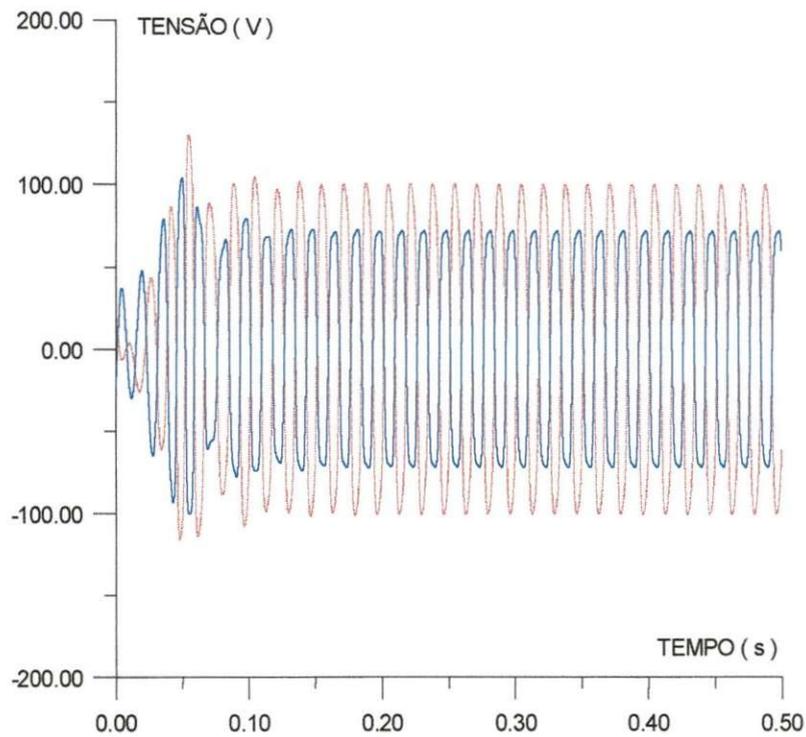


Fig.19 - Tensão no capacitor,  $u_C$  (vermelho), e tensão no indutor,  $u_L$  (azul) versus tempo para  $C = 13.6 \mu\text{F}$ .

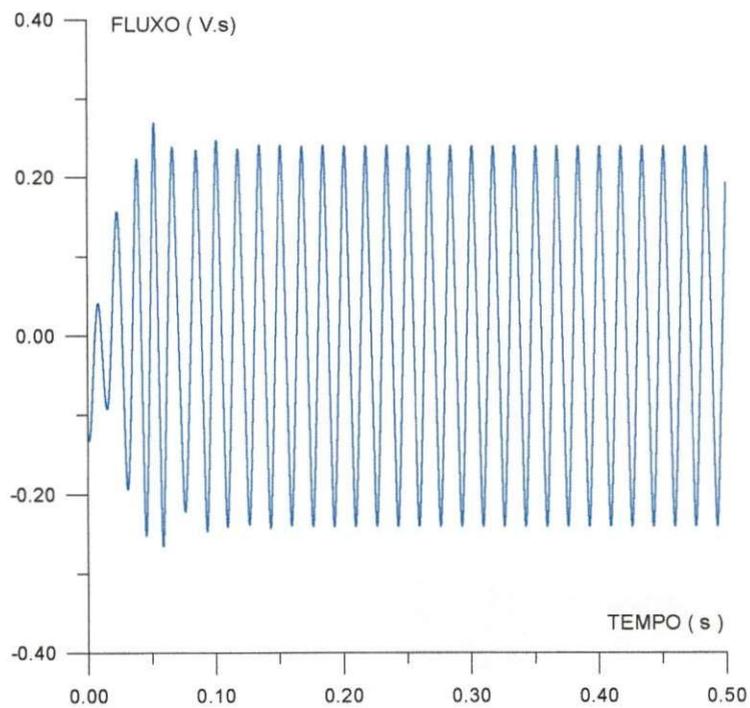


Fig.20 - Fluxo de enlace no lado de 48 V,  $\lambda$ , versus tempo, para  $C = 13.6 \mu\text{F}$ .

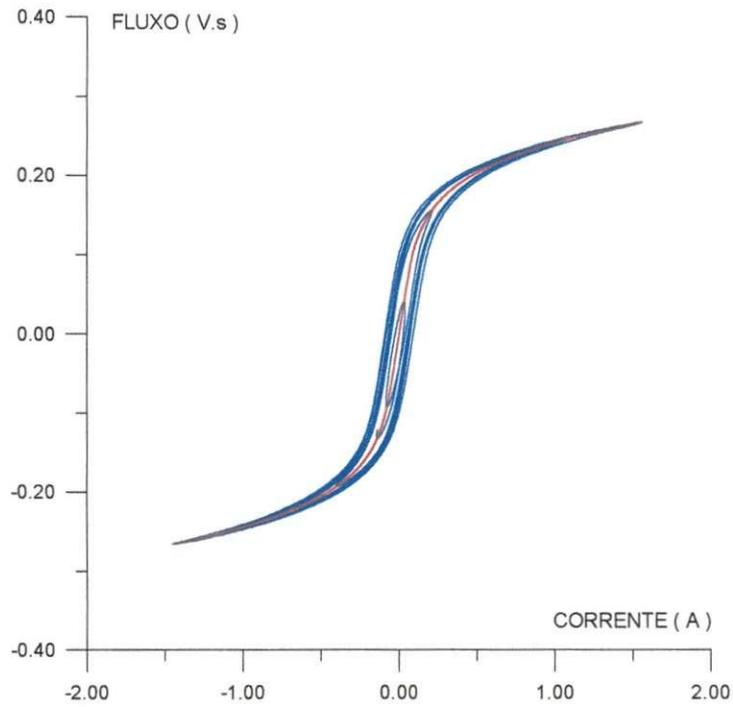


Fig.21 - Fluxo de enlace *versus* corrente de excitação,  $i_e$  ( azul ), e fluxo de enlace *versus* corrente de magnetização,  $i_m$  ( vermelho ), para  $C = 13.6 \mu\text{F}$ .

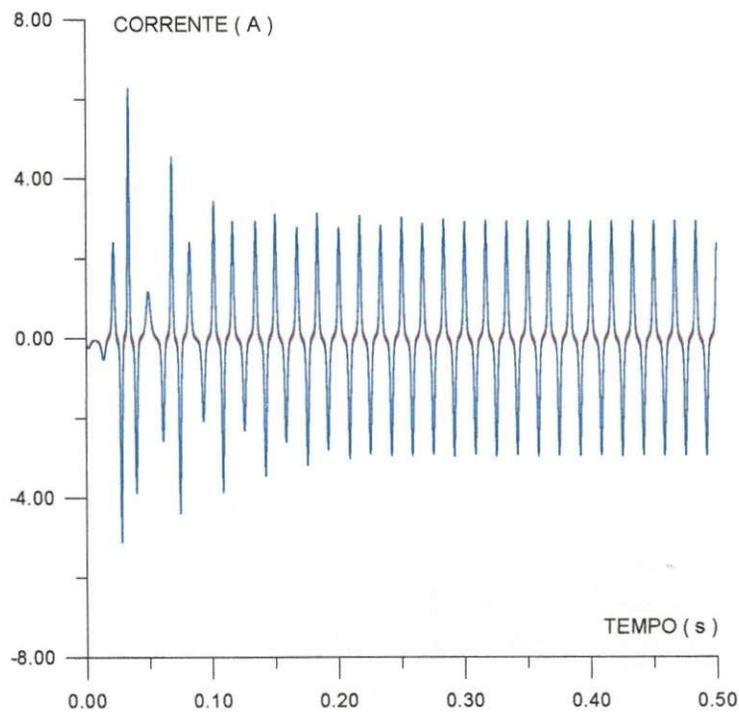


Fig.22 - Corrente de magnetização,  $i_m$  ( vermelho ), e corrente de excitação,  $i_e$  ( azul ) *versus* tempo para  $C = 27.2 \mu\text{F}$ .

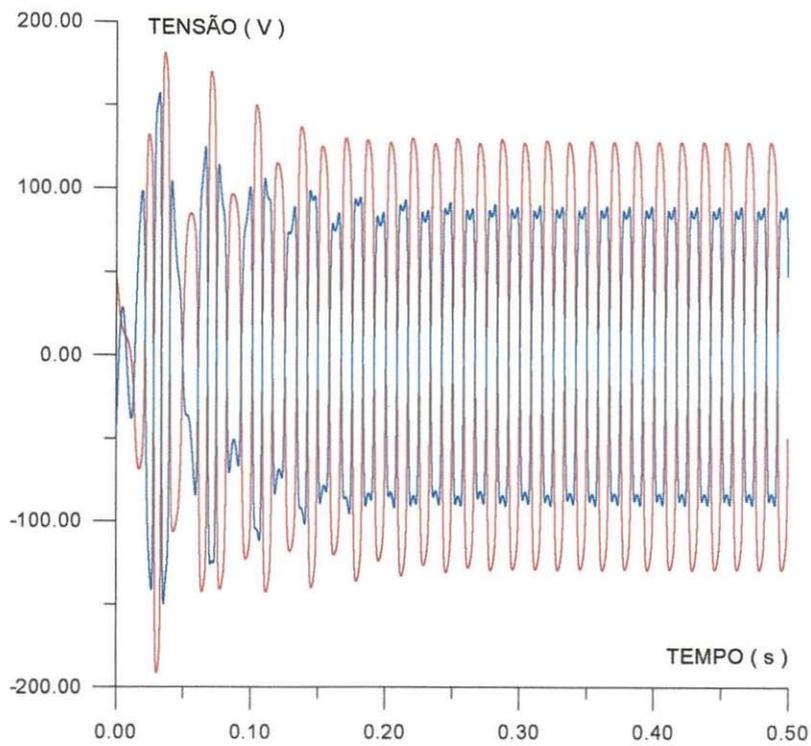


Fig.23 - Tensão no capacitor,  $u_C$  (vermelho), e tensão no indutor,  $u_L$  (azul) versus tempo para  $C = 27.2 \mu\text{F}$ .

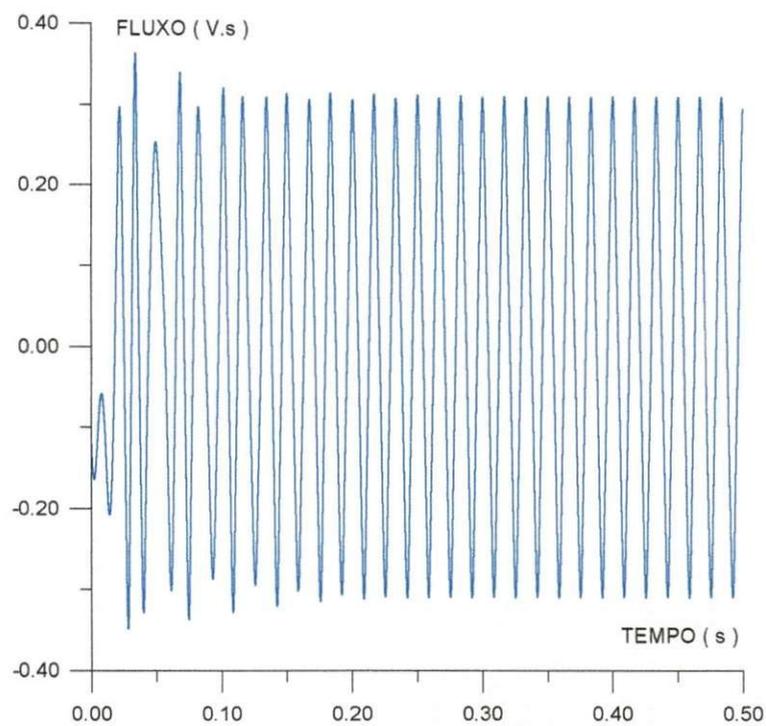


Fig.24 - Fluxo de enlace no lado de 48 V,  $\lambda$ , versus tempo, para  $C = 27.2 \mu\text{F}$ .

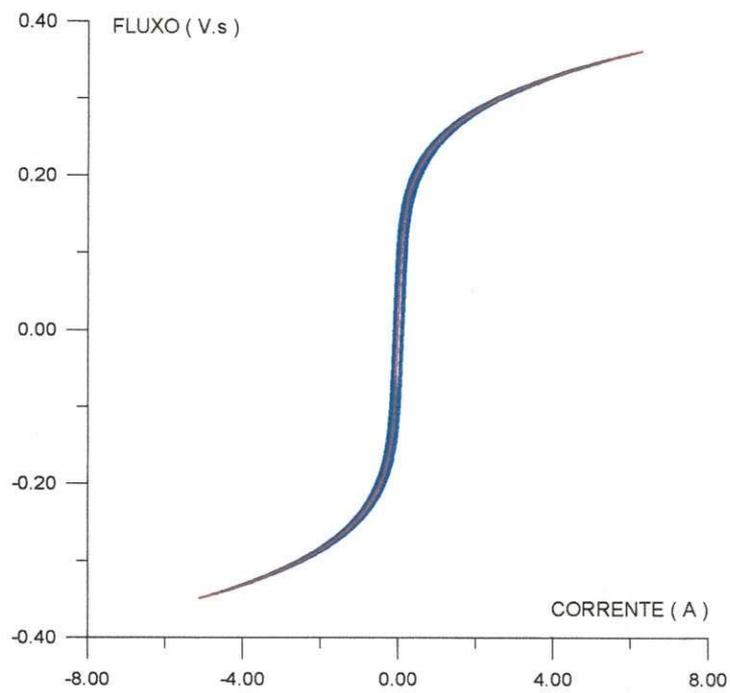


Fig.25 - Fluxo de enlace *versus* corrente de excitação,  $i_e$  ( azul ), e fluxo de enlace *versus* corrente de magnetização,  $i_m$  ( vermelho ), para  $C = 27.2 \mu\text{F}$ .

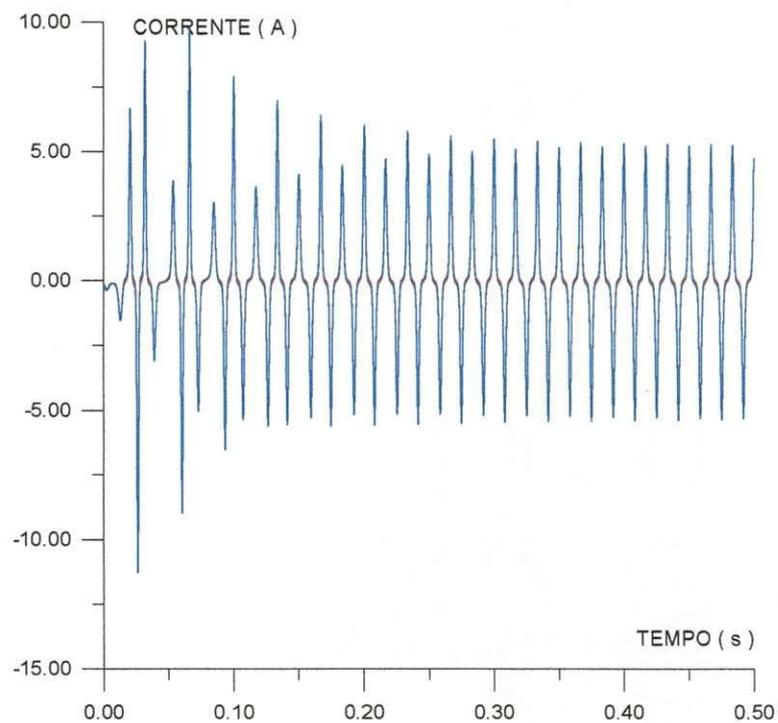


Fig.26 - Corrente de magnetização,  $i_m$  ( vermelho ), e corrente de excitação,  $i_e$  ( azul ) *versus* tempo para  $C = 40.8 \mu\text{F}$ .

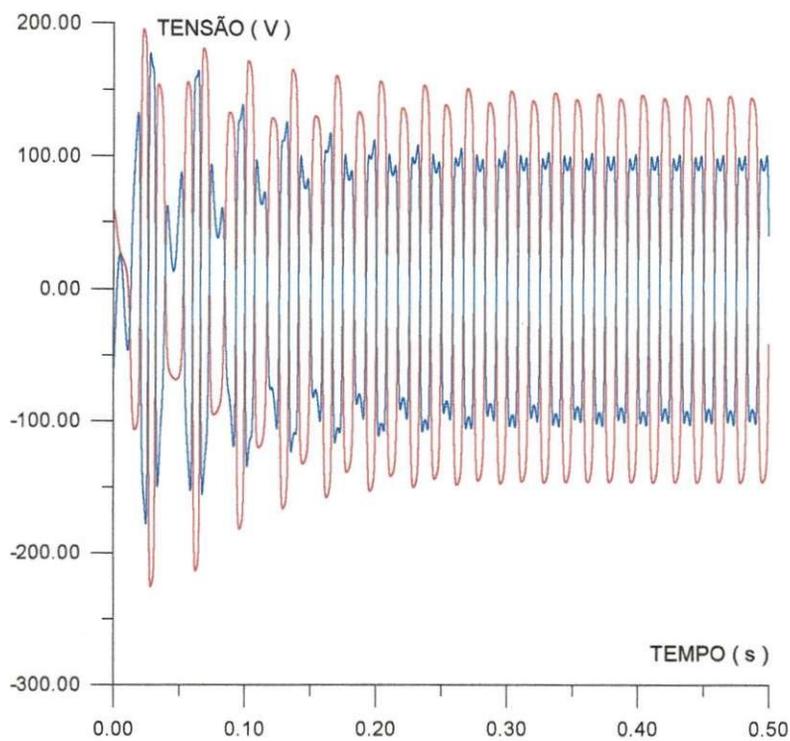


Fig.27 - Tensão no capacitor,  $u_C$  (vermelho), e tensão no indutor,  $u_L$  (azul) versus tempo para  $C = 40.8 \mu\text{F}$ .

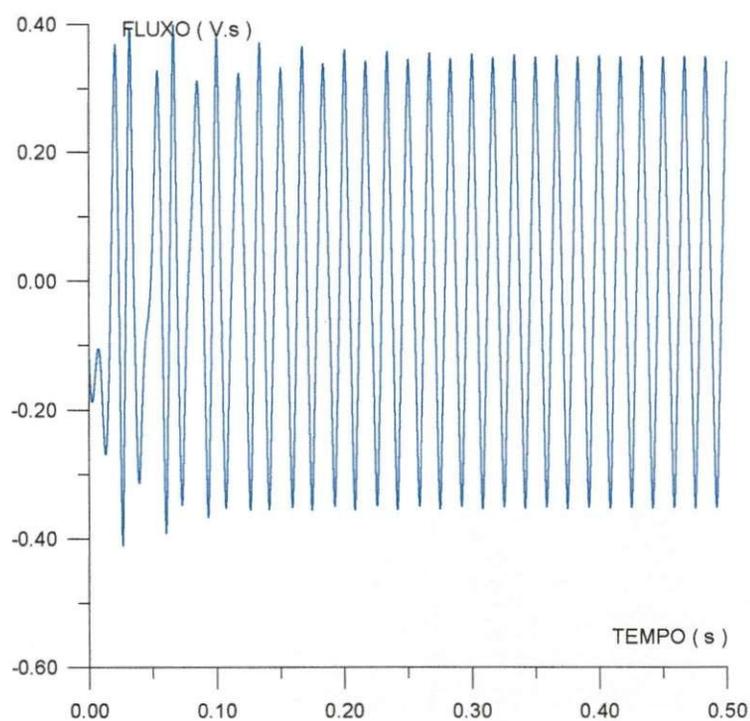


Fig.28 - Fluxo de enlace no lado de 48 V,  $\lambda$ , versus tempo, para  $C = 27.2 \mu\text{F}$ .

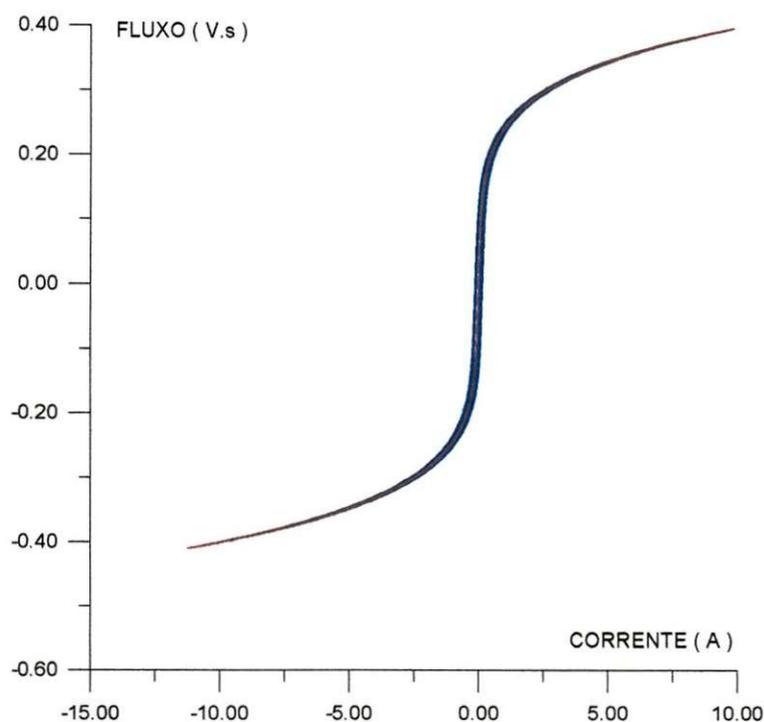


Fig.29 - Fluxo de enlace *versus* corrente de excitação,  $i_e$  ( azul ), e fluxo de enlace *versus* corrente de magnetização,  $i_m$  ( vermelho ), para  $C = 40.8 \mu\text{F}$ .

#### 4 - CONCLUSÃO

Apresentou-se um método de cálculo de ferroressonância em um transformador monofásico com secundário em vazio, onde foi representada a característica não-linear do núcleo magnético mediante polinômio truncado de ordem 5, ajustado a partir de pontos obtidos em ensaio. O efeito das correntes parasitas foi considerado através de um resistor em derivação, calculado a partir de medições de perdas no núcleo. A equação diferencial de segunda ordem que representa o modelo foi resolvida pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem, mediante um programa em linguagem FORTRAN, apresentado em anexo. As condições iniciais correspondentes ao limite entre os estados de operação normal e de ferroressonância também foram determinados por ensaio.

Os resultados obtidos permitem tirar as conclusões apresentadas a seguir

- Ao entrar em ferroressonância, o sistema passa a operar com níveis perigosos de corrente, tensão e fluxo, o que pode causar danos à instalação; este efeito se pronuncia à

medida que a capacitância em série aumenta. Assim, os resultados citados a seguir referem-se à capacitância de  $40.8 \mu\text{F}$ .

- As sobrecorrentes máximas verificadas alcançaram valores no entorno de 33 p.u., em regime transitório, e 19 p.u., em regime permanente.
- As tensões no indutor apresentam valores máximos de 2.4 p.u. ( regime transitório ) e 1.4 p.u. ( regime permanente ); as tensões no capacitor apresentam valores máximos de 10.3 p.u. ( regime transitório ) e 6.8 p.u. ( regime permanente ).
- As Figs. 21, 25 e 29 apresentam um comportamento histerético da curva fluxo *versus* corrente de excitação, o que se deve à inclusão da resistência de perdas no núcleo do transformador. Como a corrente neste elemento é dada pela derivada do fluxo em relação ao tempo, se o fluxo aumenta, a componente de perdas é somada com sinal positivo à corrente de magnetização; reciprocamente, se o fluxo diminui, essa componente é somada com sinal negativo.
- É possível que os resultados acima apresentem-se diferentes caso o polinômio que aproxima a curva fluxo *versus* corrente de magnetização seja ajustado a partir de um conjunto de pontos que corresponda a um estágio mais pronunciado de saturação.
- Sugere-se como trabalho futuro que se represente a característica de magnetização fluxo *versus* corrente com uma faixa mais larga de valores, de modo a incluir estágios mais pronunciados de saturação.

## 5 – BIBLIOGRAFIA

BESSONOV, L. - Applied Electricity for Engineers; MIR Publishers, Moscou, 1973.

CARNAHAN, B.; LUTHER, H. A.; WILKES, J.O. - Applied Numerical Methods, Wiley, 1969.

DE SOUZA, B. A. - Métodos Computacionais da Resposta de Circuitos Não-lineares com Excitação Periódica: Um estudo Voltado para o Problema da Ferroressonância ( Tese de Doutorado ); COPELE / CCT / UFPB, Campina Grande, PB, abril de 1995.

GERMAY, N; MASTERO, S.; VROMAN, J. - Review of ferroresonance phenomena in high voltage power system and presentation of a voltage transformer model for predetermining them; CIGRÉ, paper 33 - 18 T, August 21 - 29, 1974.

MARTI, J. R.; SOUDACK, A. C. - Ferroresonance in power system fundamental solutions; IEE PROC. - C, Vol. 138, No 4, July 1991.

ANEXO

```

C-----
C   CÁLCULO DO FLUXO MAGNÉTICO, TENSÕES E CORRENTE EM UM CIRCUITO RLC
c   NÃO-LINEAR FERRO-RESSONANTE (C EM SÉRIE COM ASSOCIAÇÃO EM PARALE-
C   LO DE R E L). O PROCESSO É REALIZADO PELA RESOLUÇÃO DE UMA EQUAÇÃO
C   DIFERENCIAL NÃO-LINEAR DE ORDEM 2, USANDO RUNGE-KUTTA DE ORDEM 4.
C-----
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      REAL*8 Y(10), YI(10), TP(500000), CM(500000), CR(500000), UI(500000),
*         UC(500000), FL(500000)

C
C ARQUIVOS DE SAÍDA
C
      OPEN( 5, FILE = 'FLX-TP.DAT')
      OPEN(10, FILE = 'ULL-TP.DAT')
      OPEN(15, FILE = 'UCC-TP.DAT')
      OPEN(20, FILE = 'CRM-TP.DAT')
      OPEN(25, FILE = 'CRE-TP.DAT')
      OPEN(30, FILE = 'FLX-CM.DAT')
      OPEN(35, FILE = 'FLX-CR.DAT')

C
      WRITE(*,*) 'TEMPO TOTAL DE SIMULACAO (s) '
      READ (*,*) TT
      WRITE(*,*) '          '
      WRITE(*,*) 'DEGRAU DE TEMPO DT (s) '
      READ (*,*) DT
      WRITE(*,*) '          '
      WRITE(*,*) 'Nº DE ITERACOES DENTRO DE CADA INTERVALO DT'
      READ (*,*) IT
      WRITE(*,*) '          '
      WRITE(*,*) 'VALOR RMS DA TENSÃO DE ALIMENTACAO (V) '
      READ (*,*) U
      WRITE(*,*) '          '
      WRITE(*,*) 'VALOR FREQUENCIA DE ALIMENTACAO (V) '
      READ (*,*) F
      WRITE(*,*) '          '
      WRITE(*,*) 'VALOR RMS DA TENSÃO NO INDUTOR (V) '
      READ (*,*) UL
      WRITE(*,*) '          '
      WRITE(*,*) 'VALOR DA CAPACITANCIA (F) '
      READ (*,*) C
      WRITE(*,*) '          '
      WRITE(*,*) 'VALOR DA RESISTENCIA DE PERDAS (OHMS) '
      READ (*,*) R
      WRITE(*,*) '          '
      WRITE(*,*) 'ANGULO DE DEFASAGEM ENTRE U E UL (GRAUS) '
      READ (*,*) FI
      WRITE(*,*) '          '
      WRITE(*,*) 'GRAU DO POLINOMIO i=a*FLo+b*FLo**n'
      READ (*,*) N
      WRITE(*,*) '          '
      WRITE(*,*) 'COEFICIENTE a DO POLINOMIO'
      READ (*,*) A
      WRITE(*,*) '          '

```

```

WRITE(*,*) 'COEFICIENTE b DO POLINOMIO'
READ (*,*) B
WRITE(*,*) '      '

C
PI      = 4.D0*DATAN(1.D0)
FI      = FI*PI/180.D0
W       = 2.D0*PI*F
NP      = TT/DT

C
C      CÁLCULO DAS CONDIÇÕES INICIAIS
C
T       = 0.D0
YI(1)  = -DSQRT(2.D0)*(UL/W)*DCOS(FI)
YI(2)  = DSQRT(2.D0)*UL*DSIN(FI)
FL(1)  = YI(1)
UI(1)  = YI(2)
UC(1)  = -YI(2)
CM(1)  = A*YI(1)+B*YI(1)**N
CR(1)  = YI(2)/R+CM(1)

C
C      CÁLCULO E ARMAZENAMENTO DOS VALORES DE FLUXO E DE CORRENTE
C
DO 20 K=2, NP
CALL RK4(T, YI, CMM, 2, T+DT, IT, Y, R, C, U, W, A, B, N)
FL(K)  = Y(1)
UI(K)  = Y(2)
CM(K)  = CMM
CR(K)  = CMM+Y(2)/R
UC(K)  = DSQRT(2.D0)*U*DSIN(W*T)-Y(2)
TP(K)  = T
YI(1)  = Y(1)
YI(2)  = Y(2)
T      = T+DT
20 CONTINUE

C
C      IMPRESSÃO DO FLUXO, TENSÕES E CORRENTE VERSUS TEMPO
C
WRITE( 5, 30) (TP(J), FL(J), J=1, NP, 20)
WRITE(10, 30) (TP(J), UI(J), J=1, NP, 20)
WRITE(15, 30) (TP(J), UC(J), J=1, NP, 20)
WRITE(20, 30) (TP(J), CM(J), J=1, NP, 20)
WRITE(25, 30) (TP(J), CR(J), J=1, NP, 20)
WRITE(30, 30) (CM(J), FL(J), J=1, NP, 20)
WRITE(35, 30) (CR(J), FL(J), J=1, NP, 20)

C
30 FORMAT(1X, D15.6, 4X, D15.6)

C
STOP
END

-----
C      MÉTODO DE RUNGE KUTTA DE ORDEM 4
-----
SUBROUTINE RK4(TI, YIN, CMM, NN, TF, IT, Y, R, C, U, W, A, B, N)

C
IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)

```

```

REAL*8 Y(10),YIN(10),YT(10),D1(10),D2(10),D3(10),D4(10)
C
HIT=IT
DT=(TF-TI)/HIT
DT2=DT/2.
DT6=DT/6.
T=TI
C
DO 10 I=1,NN
Y(I)=YIN(I)
10 CONTINUE
DO 50 J=1,IT
CALL DERIV(T,Y,CMM,D1,R,C,U,W,A,B,N)
DO 20 I=1,NN
YT(I)=Y(I)+D1(I)*DT2
20 CONTINUE
T=T+DT2
CALL DERIV(T,YT,CMM,D2,R,C,U,W,A,B,N)
DO 30 I=1,NN
YT(I)=Y(I)+D2(I)*DT2
30 CONTINUE
CALL DERIV(T,YT,CMM,D3,R,C,U,W,A,B,N)
DO 40 I=1,NN
YT(I)=Y(I)+D3(I)*DT
40 CONTINUE
T=T+DT2
CALL DERIV(T,YT,CMM,D4,R,C,U,W,A,B,N)
DO 50 I=1,NN
Y(I)=Y(I)+(D1(I)+2.*(D2(I)+D3(I))+D4(I))*DT6
50 CONTINUE
C
RETURN
END

```

```

C-----
C CÁLCULO DA DERIVADA DO FLUXO DE ENLACE EM RELAÇÃO AO TEMPO
C-----

```

```

SUBROUTINE DERIV(T,Y,CMM,D,R,C,U,W,A,B,N)
C
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
REAL*8 Y(10),D(10)
C
CMM=A*Y(1)+B*Y(1)**N
D(1)=Y(2)
D(2)=W*DSQRT(2.D0)*U*DCOS(W*T)-(Y(2)/R+CMM)/C
C
RETURN
END
C-----

```