

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

DANIEL DOS SANTOS ALVES

ANÁLISE DE TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIO

**VOLTA REDONDA
2018**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

ANÁLISE DE TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIO

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica do UniFOA como requisito a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aluno:

Daniel dos Santos Alves

Orientador:

Prof. D. Sc. Hélio de Paiva Amorim Júnior

VOLTA REDONDA

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

Curso: Engenharia Elétrica

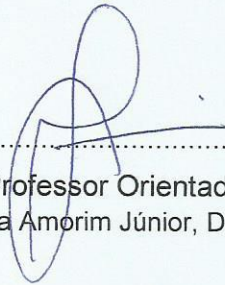
Acadêmico: Matrícula: Daniel dos Santos Alves 201410503

Título do TCC: Análise de Tensão de Restabelecimento Transitório

Apresentado publicamente perante a Banca Avaliadora, como parte dos requisitos para conclusão do Curso de Engenharia Elétrica.

Aprovada em 24 de NOVEMBRO de 2018

Banca Avaliadora:



Professor Orientador
Hélio de Paiva Amorim Júnior, Doutor, UniFOA



Professor Avaliador
Orlando Moreira Guedes Junior, Mestre, UniFOA



Professor Avaliador
Bruno Moreira da Silva, Especialista, UniFOA

A minha mãe, meu pai e minha avó por todo apoio, confiança e incentivo. E a todos que me apoiaram durante essa jornada e que ajudaram construir o que sou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe e minha avó que, a todo o momento, me incentivaram, apoiaram e quando necessário, brigaram comigo, fazendo, assim, que eu me tornasse a pessoa que sou hoje e pudesse, com isto, desfrutar das oportunidades que tive até o momento. Agradeço ao meu pai, que mesmo durante um pouco período de tempo, ajudou a me formar o que sou hoje.

Gostaria de agradecer ao professor Hélio Amorim que me deu a oportunidade de poder estagiar no CEPEL, lugar onde pude ganhar um grande conhecimento dentro da área da elétrica.

E gostaria de agradecer também a todos do Laboratório AP-2 do CEPEL (Cristiano Xavier, Robson Bianchi, Mario Melo, Claudio Cerqueira, Marcelo Guimarães e o Adílson “Tilsinho”) pela ajuda, companheirismo, por terem sido atenciosos em todo momento, por terem me ajudado a crescer profissionalmente e pessoalmente, e pela ajuda para eu desenvolver esse trabalho de fim de curso.

RESUMO

Quando ocorre um curto-circuito no sistema, a corrente de falta deve ser a solicitação mais severa que pode ser imposta a um dispositivo fusível. Um dos principais fatores associados à corrente de falta é a Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) que aparece entre os contatos do dispositivo fusível após a interrupção desta corrente de curto-circuito.

Com isso esse trabalho vem com o objetivo de projetar o circuito de ensaio de dispositivos fusíveis, assim fazendo comparações entre o circuito real e simulações computacionais. Para o projeto deste circuito, é utilizado as normas ABNT e IEC afim de poder ser utilizado nos ensaios dos dispositivos fusíveis.

Palavra-chave: Transitórios, TRT, Chave Fusível.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Justificativa.....	15
1.2	Objetivo	16
1.2.1	Objetivos Gerais	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	Descrição	16
2	TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIO	18
2.1	Dispositivo Fusível	21
2.1.1	Classe do Dispositivo Fusível	23
2.1.2	Tipos de Elos Fusíveis.....	23
2.2	Análise da Resposta Natural de um Circuito RLC em Paralelo.....	24
2.3	Análise da Resposta Natural de um Circuito RLC em Série	25
2.4	Tipos de Respostas.....	26
2.5	Determinação do Fator de Amplitude da TRT.....	28
2.6	Função de Transferência	31
2.6.1	Função de Transferência do Circuito RLC em Paralelo.....	31
2.6.2	Função de Transferência do Circuito RLC em Série	32
2.7	Determinação dos Parâmetros Representativos da TRT	33
3	PARAMETRIZAÇÃO DO ARRANJO DE ENSAIO.....	35
3.1	Gerador de Degrau Unitário	37
3.1.1	Circuito da Fonte	39
3.1.2	Circuito Injetor de Corrente.....	40
3.1.3	Circuito de Controle	41
3.2	Escolha do TAP do Transformador	41
3.3	Grupo de Ensaio 1	42
3.3.1	Inerentes do Circuito.....	42
3.3.2	Parâmetros de Controle da TRT.....	43
3.4	Grupo de Ensaio 2 e 3	51
3.5	Grupo de Ensaio 4	52
3.5.1	Lado Fonte	52
3.5.2	Lado carga.....	58
3.5.3	Simulações no ATPDraw.....	63

4	ESTUDO DE CASO.....	68
4.1	Aplicação com Degrau Unitário.....	68
4.2	Análise Reversa	70
4.3	Aplicação com Dispositivo Fusível	70
5	CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
	ANEXO I – Reatores	76
	ANEXO II – Reatores de Carga.....	77
	Anexo III – Regulação em Paralelo	78
	Anexo IV – Regulação em Série	79
	Anexo V – Regulação da Frequência Amortecida.....	80
	Anexo VI – Programação para Cálculo Automático do Circuito de Ensaio no MatLab	

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

μF – Microfarads

μs – Microssegundos

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AF – Fator de Amplitude

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

F – Farads

f_0 – Frequência Natural do Circuito

f_a – Fator de Amplitude

f_d – Frequência Natural Amortecida

H – Henrys

Hz – Hertz

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

kHz – Quilohertz

mH – Milihenrys

PO – Porcentagem de *Overshoot*

R – Resistência

rad/s – Radianos por Segundo

R_c – Resistência de Amortecimento Crítico

T – Tempo

t_3 – Tempo de Pico

TCTRT – Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitório

t_d – Retardo de Tempo

TRT – Tensão de Restabelecimento Transitório

TRTômetro – Dispositivo para a Medição de TRT

U_c – Tensão de Pico da TRT

V – Volts

V_{furnas} – Tensão da fonte

V_{ref} – Tensão de Referência, Tensão da Fonte

V_{TAP} – Tensão do TAP do transformador

Z – Impedância

α – Frequência de Neper

ζ – Taxa de Amortecimento

ηF - Nanofarads

φ – Ângulo do Fator de Potência

Ω – Ohms

ω_0 – Velocidade Angular Natural do Circuito

ω_d – Velocidade Angular Natural Amortecida

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento da tensão e da corrente durante a fusão do elo fusível..	18
Figura 2 - Elementos de chave fusível de Classes A e B.....	21
Figura 3 - Elo Fusível	22
Figura 4 - Curva de resposta ao degrau unitário	29
Figura 5 - Exemplo de TRT	33
Figura 6 - Circuito de ensaio para sequências de ensaio 1, 2 e 3.....	35
Figura 7 - Circuito de ensaio para sequência de ensaio 4	36
Figura 8 - Circuito de ensaio para sequência de ensaio 5	36
Figura 9 - Circuito Equivalente do TRTômetro	37
Figura 10 - Tensão e corrente esperada na fonte	38
Figura 11 - Circuito de Medição dos Parâmetros da TRT	39
Figura 12 - Circuito da fonte de Alimentação e seus Subcircuitos	40
Figura 13 - Circuito injetor de Corrente	41
Figura 14 - Resposta Transitória do Circuito do Grupo 1 em Paralelo	47
Figura 15 - Circuito simulado no ATPDraw	47
Figura 16 - Do circuito simulado no ATPDraw.....	48
Figura 17 - Resposta Transitória do Circuito do Grupo 1 em Série.....	50
Figura 18 - Circuito simulado no ATPDraw	50
Figura 19 - Resposta Transitória do Circuito do Grupo 1 em Série.....	51
Figura 20 - Resposta Transitória do Circuito do Lado Fonte em Paralelo.....	56
Figura 21 - Resposta Transitória do Circuito do Lado Fonte em Série.....	58
Figura 22 - Resposta Transitória do Circuito do Lado Carga em Paralelo	61
Figura 23 - Resposta Transitória do Circuito do Lado Carga em Série	63
Figura 24 - Circuito paralelo- paralelo	64
Figura 25 - Resposta do circuito paralelo- paralelo	64
Figura 26 - Circuito série-paralelo	65
Figura 27 - Resposta do circuito série-paralelo	65
Figura 28 – Circuito série-série	65
Figura 29 - Resposta do circuito série-série.....	66
Figura 30 - Circuito paralelo-série	66
Figura 31 - Resposta do circuito paralelo-série	67
Figura 32 - Arranjo de ensaio para teste	68

Figura 33 - Forma de onda da tensão	69
Figura 34 - Forma de onda da tensão	69
Figura 35 - Forma de onda da tensão	71
Figura 36 - Forma de onda da tensão	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de referência para os ensaios de capacidade de interrupção	20
Tabela 2 - Valores de frequência natural de oscilação da tensão de restabelecimento transitória e dos máximos valores de $\cos\varphi$ do circuito de ensaios	20
Tabela 3 - Características elétricas dos dispositivos fusíveis.....	22
Tabela 4 - Valores padronizados da TRT para os ensaios 1, 2, 3 e 4 de capacidade de interrupção em dispositivos fusíveis da Classe A – Representação por dois parâmetros – Ensaio na tensão nominal	30
Tabela 5 - Valores padronizados da TRT para os ensaios 1, 2, 3 e 4 de capacidade de interrupção em dispositivos fusíveis da Classe B – Representação por dois parâmetros – Ensaio na tensão nominal	30
Tabela 6 - Parâmetros de ensaio dos grupos 1, 2 e 3.....	52
Tabela 7 - Resultados das simulações.....	67
Tabela 8 - Reais valores do circuito	70

1 INTRODUÇÃO

Com a grande e complexa malha de distribuição de energia elétrica espalhada pelo país, existem os riscos de ocorrerem surtos durante o fornecimento desta energia. Para ser providenciada a proteção das linhas e dos equipamentos e máquinas elétricas, bem como a dos consumidores, existem dispositivos fusíveis que compõem e integram as linhas de distribuição, eles têm a finalidade de proteger tais elementos contra surtos de corrente (tanto de diversos níveis de curto-circuito quanto de correntes de sobrecarga) evitando, assim, o comprometimento dos equipamentos instalados nestes circuitos e o das fontes a estas associadas.

Devido aos componentes reativos, capacitivos e indutivos, acoplados às redes, pode-se haver picos de tensão ou de corrente quando se desliga ou quando se liga um circuito, causados pelo armazenamento de energia, elétrica ou magnética, derivado de tais elementos passivos.

Todos os equipamentos, especialmente os de manobra e proteção, devem suportar tais surtos e/ou impedir a passagem desses transitórios eletromagnéticos causados pela presença destes elementos reativos acoplados as próprias linhas de distribuição. Esses transitórios são causados pela capacidade desses componentes reativos de armazenarem energia — sob forma de campo elétrico ou tensão, para capacitores; e sob forma de campo magnético ou corrente, para reatores — que é liberada assim que a quantidade energética armazenada for superior à do nível presente do circuito.

A combinação total destes elementos é que responderá pelo comportamento transitório do circuito na hora em que ocorrer alguma interrupção de corrente pelo dispositivo fusível.

Para que esses dispositivos possam ser utilizados, os mesmos têm de passar por testes, ou ensaios, para se averiguar se estes estão atendendo os requisitos definidos por normas nacionais e internacionais. O Laboratório de Alta Potência (AP2), localizado no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), é um dos

locais existentes e habilitados para se fazer este tipo de validação, conforme as exigências das normas.

1.1 Justificativa

Com a grande malha de linhas de transmissão e distribuição, assim como com a sua grande complexidade e interligação entre elas, há a necessidade de se ter uma garantia de que o dispositivo realmente funcionará corretamente quando houver um surto de energia. Com isso, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) criou normas com requisitos exigíveis a esses dispositivos fusíveis de alta tensão para tensões nominais acima de 1000 V e com frequência de 60 Hz, tomando como base as normas internacionais, como a International Electrotechnical Commission (IEC) [1] [2] e Institute of Electrical and Eletronics Engineering IEEE [3] [4] [5].

Os ensaios para esses dispositivos fusíveis têm como finalidade verificar se o equipamento irá funcionar corretamente e suportará a tensão de restabelecimento transitório (TRT) que estará sujeita numa rede de distribuição. Através de pesquisas feitas pela IEC e ABNT, foi achado valores comuns para esses transitórios.

Como a frequência da TRT varia conforme o arranjo do circuito, é preciso realizar uma medição da resposta transitória do circuito antes da realização do ensaio, sendo analisados os principais parâmetros [6]:

- A Frequência de Ressonância natural do circuito (f_0);
- Se o TRT está criticamente amortecido;
- O Fator de Amplitude (AF);
- A Tensão de Pico da TRT (U_c);
- O Tempo (t_3);
- O Retardo de Tempo (t_d); e
- A Taxa de Crescimento do TRT (TCTRT).

Com isso, surge a necessidade do Laboratório AP-2 do CEPEL de construir um gerador de sinais de corrente, ou, TRTômetro, que gerará um degrau unitário no circuito associado a um sistema de aquisição que conseguirá verificar a resposta transitória do arranjo de ensaio. Analisando previamente, assim, se os parâmetros de transitórios estão dentro dos requisitos das Normas ABNT NBR 7282:2011 [6] e IEC 60282-2:2008 [2], para que se possa dar início ao ensaio.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como principais objetivos:

- Modelar circuitos para ensaio de dispositivos fusíveis com ênfase na resposta transitória de acordo com as normas ABNT, IEEE e IEC;
- Simular o circuito modelado em programas de análise de resposta elétrica;
- Medir a TRT através de uma unidade geradora de degrau unitário; e
- Comparar os resultados com as simulações e aplicação do degrau unitário e aplicação com o dispositivo fusível.

1.2.2 Objetivos Específicos

Devido às características e às necessidades para a realização dos ensaios no Laboratório AP-2, este trabalho tem objetivo específico:

- Parametrizar de forma rápida e confiável os elementos capacitivos e resistivos existentes para os diversos circuitos de ensaio que exigem transitórios TRT com determinadas características; e
- Analisar as características da TRT das simulações, aplicação com degrau unitário e aplicação com o dispositivo fusível.

1.3 Descrição

Este trabalho está estruturado como segue. Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica rápida sobre dispositivo fusível e uma revisão sobre a TRT e seus parâmetros, assim como as formulas para se parametrizar o circuito. O capítulo 3 mostra os cálculos para poder montar os circuitos de ensaio e as simulações computacionais.

Os ensaios são mostrados no capítulo 4 e no capítulo 5 são as referencias bibliográficas.

2 TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIO

Quando ocorre um curto-circuito no sistema, a corrente de falta deve ser a solicitação mais severa que pode ser imposta a um dispositivo fusível. Um dos principais fatores associados à corrente de falta é a Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) que aparece entre os contatos do dispositivo fusível após a interrupção desta corrente de curto-circuito.

Durante o processo de interrupção, a corrente é descontinuada bruscamente. Durante este instante, o sistema gerará uma resposta transitória a essa interrupção em forma de uma TRT. Essa TRT se apresentará sob forma de ondas transitórias de alta frequência, como mostrado na figura 3.

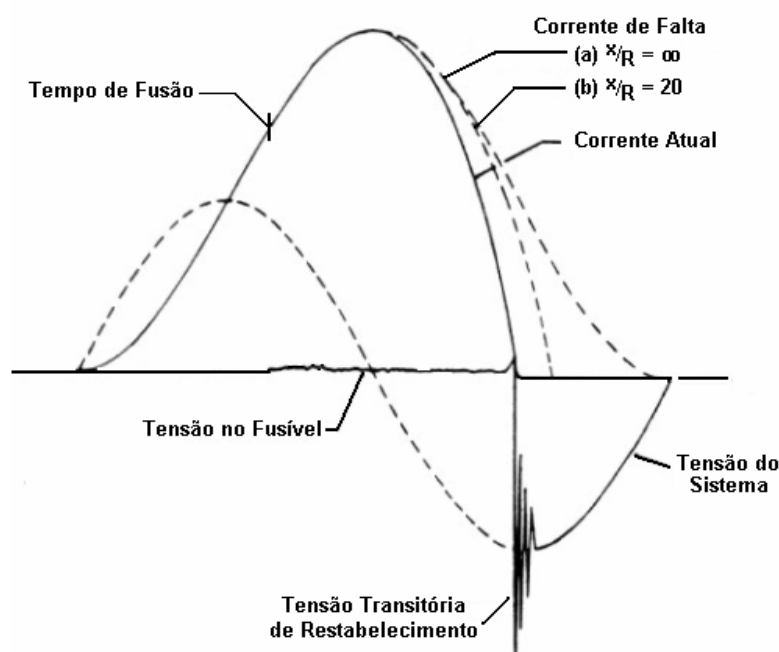


Figura 1 - Comportamento da tensão e da corrente durante a fusão do elo fusível

Fonte: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgOpMAK/a-protecao-rede-distribuicao-contra-sobrecorrentes?part=3>> [10]

Devido à capacidade de se armazenar energia em campo elétrico (capacitor), e/ou em campo magnético (indutor), essas ondas dependem exclusivamente dos componentes capacitivos, resistivos e indutivos (especialmente dos dois primeiros)

que estão associados ao circuito, do tipo de combinação entre eles e da forma como eles estão distribuídos ao longo do arranjo elétrico.

Os componentes reativos gerarão uma oscilação natural no circuito, e o componente resistivo fará com que essa oscilação seja amortecida. Para poder definir o valor do resistor a ser inserido no circuito para poder gerar um amortecimento da TRT, precisa-se analisar a equação resultante de um circuito RLC, que será feito no capítulo 3 deste trabalho.

A TRT tem dois componentes característicos: o pico da TRT e a forma de onda em si. O pico da TRT ocorre rapidamente, e é neste momento quando os elementos reativos liberam toda sua energia armazenada. A forma de onda depende do arranjo do circuito, e aparece devida a troca de energia entre o capacitor e o indutor, sendo que a parte resistiva do circuito, aparece para poder amortecer essa frequência, não deixando essa troca de energia ficar permanentemente.

A importância da escolha adequada da TRT se deve ao fato do dispositivo fusível poder interromper o fluxo de corrente sem causar, durante a manobra, um surto de tensão excessivo; por isso a importância dos ensaios e, principalmente, da escolha da TRT correta dentro do arranjo de ensaio, para que o dispositivo fusível possa ser ensaiado dentro dos mais críticos critérios que serão apresentados dentro das linhas e redes de distribuição na realidade. Os critérios da escolha da TRT podem ser vistos nas tabelas 1 e 2 retiradas da ABNT [6].

Tabela 1 - Valores de referência para os ensaios de capacidade de interrupção

PARAMETROS	Classe	GRUPOS DE ENSAIO				
		GRUPO 1	GRUPO 2	GRUPO 3	GRUPO 4	GRUPO 5
Tensão de restabelecimento à frequência industrial	A e B	Tensão nominal (tolerância de +5% a 0%)				
Frequência natural da TRT	A B	Ver tabela 4 Ver tabela 5			Não aplicável	
Corrente simétrica presumida (valor eficaz)	A e B	100% a 105% de I_{cc}	0,7 I_{cc} a 0,8 I_{cc}	0,2 I_{cc} a 0,3 I_{cc}	400 A a 500A	2,7 I_n a 3,3 I_n com valor mínimo de 15 A
Fator de potência	A B	Menor que 0,15 Menor que 0,10			Ver tabela 4	De 0,6 a 0,8

Fonte: ABNT NBR 7282:2011 [6]

Tabela 2 - Valores de frequência natural de oscilação da tensão de restabelecimento transitória e dos máximos valores de $\cos\varphi$ do circuito de ensaios

Classe do dispositivo fusível	Faixa de tensões nominais do dispositivo fusível (U_r) kV		
	12 a 17,5	24 a 27	36 a 40,5
A	0,35 a 0,45	0,35 a 0,45	0,2 a 0,3
B	0,1 a 0,2	0,1 a 0,2	0,1 a 0,2

Fonte: ABNT NBR 7282:2011 [6]

Assim como num disjuntor pode aparecer arco elétrico após o chaveamento (fechamento e, principalmente, abertura) do circuito, produzido pela elevada tensão causada pela TRT (gerada pela variação brusca do fluxo magnético do seu valor nominal para zero), o mesmo fenômeno também acontece nas chaves fusíveis.

2.1 Dispositivo Fusível

O dispositivo fusível, ou chave fusível, é um equipamento utilizado para a proteção de equipamentos e ramais das redes de distribuições de energia, com a finalidade de interromper correntes elevadas de curto-circuito no primário e secundário do transformador, além de correntes de sobrecarga. Os principais componentes dos dispositivos fusíveis são mostrados na Figura 2 [6] [1] [4]:

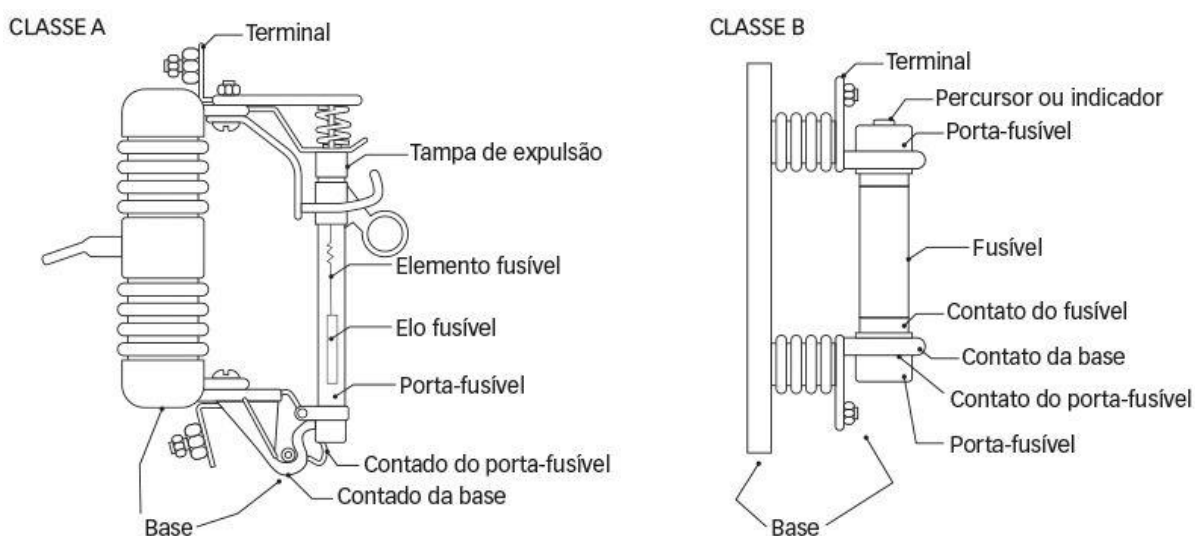


Figura 2 - Elementos de chave fusível de Classes A e B

Fonte: <<http://construnormas.pini.com.br/engenharia-instalacoes/instalacoes-eletricas/subestacao-dispositivos-fusiveis-de-alta-tensao-e-limitadores-de-341135-1.aspx>> [7]

- Dispositivo Fusível: é definido como o dispositivo de proteção que, pelas suas características dimensionais e construtivas, abre o circuito com um determinado valor de corrente;
- Elemento Fusível: é o material que constitui a parte que se funde quando o dispositivo fusível opera (geralmente uma mistura entre cobre e prata);
- Elo Fusível: é o componente que contém o elemento fusível e que a cada operação deve ser trocado. O elo fusível é mostrado na Figura 3.



Figura 3 - Elo Fusível

Fonte: <<http://www.wkeletrica.com.br/loja/produto/elo-fusivel-10k-500mm>> [8]

A classificação das classes A e B, é definida pela habilidade do elo fusível atender os requisitos da TRT esperada [6] e será definida no capítulo 2.1.1. Assim, como são classificados de acordo com a norma ABNT 7282:2011 [6], pelos tipos K, T ou H, que são definidos pela característica tempo x corrente, pode-se achar as características elétricas dos dispositivos fusíveis pela tabela 3.

Tabela 3 - Características elétricas dos dispositivos fusíveis

Elos fusíveis		Dispositivo fusível a utilizar		
Tipo	Corrente nominal A_{eficaz}	Tensão máxima kV_{eficaz}	Corrente nominal do porta-fusível A_{eficaz}	Capacidade de interrupção simétrica kA_{eficaz}
H	0,5, 1, 2, 3 e 5	15	100	7,1
		24,2		4,5
		36,2		3,5
K e T	6, 10, 15, 25, 40, 65 e 100 8, 12, 20, 30, 50 e 80	15		7,1
		24,2		4,5
		36,2		3,5
K e T	140 e 200	15	200	7,1

Fonte: ABNT NBR 7282:2011 [6].

2.1.1 Classe do Dispositivo Fusível

De acordo com a ABNT NBR 7282:2011 [6], a classe do dispositivo fusível é para:

- Classe A: Que se destina à proteção de pequenos transformadores e pequenos bancos de capacitores para correção de fator de potência ou controle de tensão localizada em redes aéreas ou subterrâneas e distantes de subestações de maior porte, e na proteção em pontos de seccionamento destes sistemas. As condições da TRT para classe A acontecem com valores mais baixos de U_c (tensão de pico) e com valores mais longos de t_3 (tempo de subida ou tempo de pico), do que aqueles que ocorrem na classe B.
- Classe B: Que se destina a proteger equipamentos similares aos da classe A, mas que estejam em locais mais próximos de subestações de maior porte e a circuitos de alimentação partindo destas subestações. As condições de TRT são mais severas do que a classe A.

2.1.2 Tipos de Elos Fusíveis

Os elos fusíveis são classificados pela velocidade de atuação, ou seja, pela sua curva característica de tempo x corrente [6]. Eles podem ser do tipo K (rápidos), T (lentos) ou H (alto surto).

Os elos de tipo K e T coordenam com outros equipamentos de proteção em uma faixa mais ampla de corrente, sendo utilizados na proteção de ramais, enquanto que os elos do tipo H são utilizados na proteção de transformadores de pequenas potências e pequenos bancos de capacitores [9].

A corrente nominal dos elos tipos K e T é de, aproximadamente, 150% do seu valor nominal, sendo que para os do tipo H, a corrente é próxima de 100% desse valor. Os fusíveis dos tipos K e T só começam a operar com valores de corrente iguais ou superiores a 2 vezes o seu valor nominal, ao passo que os do tipo H iniciam o processo de fusão quando a corrente atinge 1,5 vez do seu valor nominal e

não operam para sobrecorrentes de curta duração (associadas a descargas atmosféricas) que não representam perigo para o transformador.

2.2 Análise da Resposta Natural de um Circuito RLC em Paralelo

Sabendo que em todos os componentes em paralelo, as tensões são as mesmas, pode-se então achar a corrente em cada componente, chegando na equação diferencial 3.1:

$$\frac{v(t)}{R} + \frac{1}{L} \int_0^t v(t) dt + I_0 + C \frac{dv(t)}{dt} = 0 \quad (3.1)$$

Eliminando a integral e fazendo o rearranjo matemático, chega-se a equação diferencial 3.2:

$$\frac{d^2v(t)}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{LC} = 0 \quad (3.2)$$

Onde para resolver a equação 3.2, deve-se converter do domínio o tempo para o domínio da frequência, assim removendo as derivadas e chegando à equação 3.3:

$$s^2 + \frac{1}{RC} s + \frac{1}{LC} = 0 \quad (3.3)$$

Que é definida como equação característica da equação diferencial, pois o caráter matemático de $v(t)$ é determinado pelas raízes dessa equação. As suas raízes são:

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2RC} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (3.4)$$

Onde através dessas raízes podem-se definir duas frequências, elas são:

- Frequência de Neper:

$$\alpha = \frac{1}{2RC} \quad (3.5)$$

- Frequência angular de ressonância:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.6)$$

Podendo ser substituídas na equação das raízes 2.4:

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_o^2} \quad (3.7)$$

Assim definem-se as raízes como frequências complexas. Ambas as frequências, s_1 , s_2 , α e ω , são definidos por rad/s.

Após definir as equações características, pode-se conseguir definir a resposta natural do circuito quando gerar um degrau unitário no mesmo, essas respostas podem ser criticamente amortecidas, superamortecidas e subamortecidas. Para saber como será a resposta do circuito, deve-se analisar as raízes da equação característica.

2.3 Análise da Resposta Natural de um Circuito RLC em Série

Da mesma forma que o circuito RLC em paralelo, o circuito em série será feito da mesma maneira. Começando pela soma das tensões, chegando à equação 3.8:

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + v_o = 0 \quad (3.8)$$

Diferenciando a equação 3.8 obtém-se, em relação a t , obtém:

$$\frac{d^2i(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di(t)}{dt} + \frac{i(t)}{LC} = 0 \quad (3.9)$$

Passando para o domínio da frequência, obtém a equação característica 3.10:

$$s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC} = 0 \quad (3.10)$$

Através desta equação característica 3.10, podem-se definir as raízes da equação 3.11.

$$s_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (3.11)$$

Conseguindo assim definir os valores das frequências de Neper e da oscilação natural do circuito, que são:

- Frequência de Neper:

$$\alpha = \frac{1}{2RC} \quad (3.12)$$

- Frequência angular de ressonância:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.13)$$

Podendo ser substituídas na equação das raízes 3.11, de forma análoga a equação 3.7 do circuito RLC em paralelo.

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_o^2} \quad (3.14)$$

2.4 Tipos de Respostas

Ridel, na obra Circuitos Elétricos [11], define que de acordo com as características do circuito em relação aos valores de ω_o e α , o circuito tem peculiaridades específicas na forma das ondas que irão aparecer quando for aplicado um degrau unitário. Uma delas é o quanto esta frequência está amortecida, ou seja, o quão rápido ela chega ao seu resultado final. Essas respostas são definidas por:

- Resposta Subamortecida: aparece quando as raízes da equação característica forem complexas; para isso acontecer, o valor de ω_o^2 tem que ser maior que o valor de α^2 , o que gera uma oscilação de tensão ou de corrente em torno do seu valor final.
- Resposta Superamortecida: aparece quando as raízes da equação característica forem reais e distintas; para isso acontecer, o valor de α^2 deve ser maior do que o valor de ω_o^2 , assim a tensão e a corrente tendem a chegar no seu valor final sem oscilar.
- Resposta Criticamente Amortecida: aparece quando as raízes da equação característica forem reais e iguais; para isso acontecer, o valor de α e de ω_o tem que ser iguais, com isto, a tensão e a corrente tendem a oscilar perto do seu valor final.

Assim a frequência resultante, ou a frequência natural amortecida, pode ser definida pela equação 3.15:

$$\omega_d = \sqrt{\omega_o^2 - \alpha^2} \quad (3.15)$$

Onde: ω_d – Velocidade angular natural amortecida;

ω_o – Velocidade angular de oscilação natural do circuito;

α – Velocidade angular de Neper.

Ou então pode ser expressa, de acordo com Ogata [12], como:

$$\omega_d = \omega_o \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3.16)$$

Onde: ζ – Taxa de amortecimento (que será explicado no próximo capítulo)

Onde se relaciona ω_d/ω_o , pode-se chegar à seguinte função 3.17:

$$\frac{\omega_d}{\omega_o}(\zeta) = \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (\%) \quad (3.17)$$

Que dará, em porcentagem, a diferença da frequência natural amortecida que aparecerá em relação à frequência de oscilação natural, chegando no gráfico presente no anexo IV, que relaciona o fator de amplitude com ω_d/ω_o .

2.5 Determinação do Fator de Amplitude da TRT

Pode-se determinar o percentual de *overshoot* (PO) através da equação 3.18 [13].

$$PO = 100e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (3.18)$$

Onde o percentual de *overshoot* é o quanto que o sinal, ou a função ultrapassa do seu valor final, em outras palavras, é o valor do fator de amplitude da tensão que aparece nos terminais do dispositivo fusível, o valor de U_c . Como a equação 2.18 depende exclusivamente do valor de ζ (taxa de amortecimento), pode reescrever a equação do PO para a equação 3.19.

$$\zeta = \frac{-\ln\left(\frac{PO}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \ln\left(\frac{PO}{100}\right)^2}} \quad (3.19)$$

E sabendo que:

$$\frac{PO}{100} = fa - 1 \quad (3.21)$$

Chega-se a seguinte função 3.22:

$$\zeta(fa) = \frac{-\ln(fa - 1)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(fa - 1)^2}} \quad (3.22)$$

Com essa função, chega-se ao valor da taxa de amortecimento, presente nos gráficos dos anexos IV e V, onde se tem a relação do fator de amplitude com a resistência a ser inserida no circuito. A curva da resposta transitória pode ser vista pela figura 4, onde mostra a variação da frequência em função do valor de ζ .

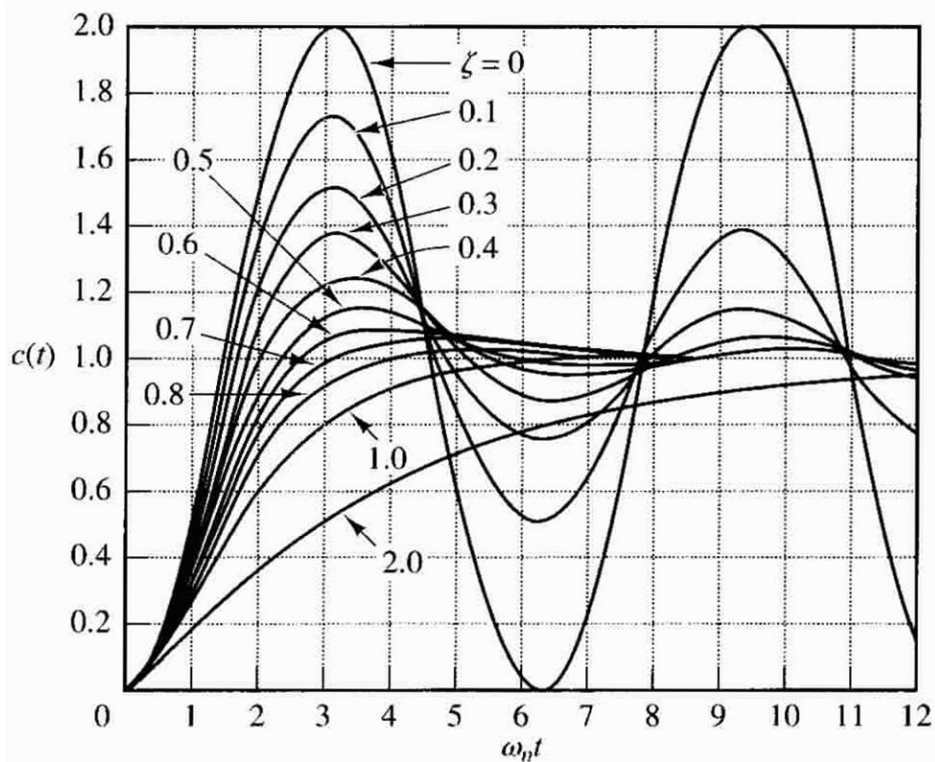


Figura 4 - Curva de resposta ao degrau unitário

Fonte: Engenharia de Controle Moderno [12]

E na equação 3.23, encontrada na obra do Nise [13], pode-se definir o tempo em que essa ultrapassagem (t_p) atinge seu valor máximo, onde, pelas tabelas 4 e 5, é definido como t_3 .

$$t_3 = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\omega_o \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (3.23)$$

Tabela 4 - Valores padronizados da TRT para os ensaios 1, 2, 3 e 4 de capacidade de interrupção em dispositivos fusíveis da Classe A – Representação por dois parâmetros – Ensaio na tensão nominal

Tensão nominal U_r (kV)	Sequência de ensaio	Fator de amplitude AF	Pico da TRT U_c kV	Tempo t_3 (μ s)	Retardo de tempo t_d (μ s)	Tensão U'	Tempo t'	TCTRT U_c/t_3
15	1, 2, 3	1,30	27,6	187	28	9,2	90	0,15
	4	1,50	31,8	18	3	10,6	9	1,77
24	1, 2, 3	1,30	44,1	236	36	14,7	115	0,19
	4	1,50	51,0	26	4	17,0	13	1,97
36	1, 2, 3	1,30	66,2	281	42	22,1	136	0,24
	4	1,60	81,5	40	6	27,2	19	2,04
$U_c = AF * U_r * \sqrt{2}$						$U' = U_3/3$		
$t_d = 0,15 * t_3$						$t' = t_d + t_3/3$		

Fonte: ABNT NBR 7282:2011 [6]

Tabela 5 - Valores padronizados da TRT para os ensaios 1, 2, 3 e 4 de capacidade de interrupção em dispositivos fusíveis da Classe B – Representação por dois parâmetros – Ensaio na tensão nominal

Tensão nominal U_r (KV)	Sequência de ensaio	Fator de amplitude AF	Pico da TRT U_c KV	Tempo t_3 (μ s)	Retardo de tempo t_d (μ s)	Tensão U'	Tempo t'	TCTRT U_c/t_3
15	1, 2, 3	1,40	29,7	140	21	9,9	67	0,21
	4	1,50	33,9	26	4	11,3	13	1,29
24	1, 2, 3	1,40	47,5	192	29	15,8	93	0,247
	4	1,60	54,3	34	5	18,1	16	1,61
36	1, 2, 3	1,40	71,3	251	38	23,8	121	0,28
	4	1,60	81,5	42	6	27,2	20	1,94
$U_c = AF * U_r * \sqrt{2}$						$U' = U_3/3$		
$t_d = 0,15 * t_3$						$t' = t_d + t_3/3$		

Fonte: ABNT NBR 7282:2011 [6]

2.6 Função de Transferência

Após analisar a resposta natural dos circuitos RLC, tanto em série quanto em paralelo, e pode-se chegar à função de transferência do circuito $G(s)$, pela equação 3.24:

$$G(s) = \frac{\omega_o^2}{s^2 + 2\zeta\omega_o s + \omega_o^2} \quad (3.24)$$

E através de 3.24 pode-se analisar a resposta transitória do circuito, ao ser aplicado um degrau unitário, e assim se determinar o fator de amplitude.

2.6.1 Função de Transferência do Circuito RLC em Paralelo

Sabendo-se que a função de transferência do circuito RLC em paralelo é descrito pela equação 3.25.

$$G(s) = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (3.25)$$

Ao se igualar $2\zeta\omega_o$ da equação 2.24 com $1/(RC)$ da equação 3.25, pode-se chegar na seguinte relação:

$$2\zeta\omega_o = \frac{1}{RC} \quad (3.26)$$

$$R = \frac{1}{2\zeta} \sqrt{L/C} \quad (3.27)$$

Onde:

$$R_c = \frac{1}{2} \sqrt{L/C} \quad (3.28)$$

Então:

$$R = \frac{R_c}{\zeta} \quad (3.29)$$

Onde: R – Resistência a ser inserida no circuito;

R_c – Resistência de amortecimento crítico

2.6.2 Função de Transferência do Circuito RLC em Série

Sabendo-se que a função de transferência do circuito RLC em série é descrito pela equação 3.30.

$$G(s) = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (3.30)$$

Ao se igualar $2\zeta\omega_o$ da equação 2.24 com R/L da equação 3.30, pode-se chegar na seguinte relação:

$$2\zeta\omega_o = \frac{R}{L} \quad (3.31)$$

$$R = 2\zeta\sqrt{L/C} \quad (3.32)$$

Onde:

$$R_c = 2\sqrt{L/C} \quad (3.33)$$

Então:

$$R = \zeta R_c \quad (3.34)$$

Onde: R – Resistência a ser inserida no circuito;

R_c – Resistência de amortecimento crítico

Nos Anexos IV e V, está presente o gráfico da relação $R/R_c \times fa$ tanto para o circuito RLC em série e o em paralelo.

2.7 Determinação dos Parâmetros Representativos da TRT

Por causa das várias formas que a TRT pode assumir, para efeito de simplificação na parametrização, ela deve ser constituída de dois seguimentos lineares consecutivos quando a onda se aproximar do caráter amortecido. Essa oscilação deve refletir o mais próximo possível a forma real da tensão.

Para traçar essa envoltória de acordo com as normas ABNT NBR 8669/1984 [14] e IEC 60282-1:2009 [1], primeiro traça-se uma linha que passa pela origem e tangencia sem cortar a curva. Após, faz-se uma linha horizontal tangente à curva no seu ponto mais alto da crista. Esse procedimento pode ser visto na figura 5.

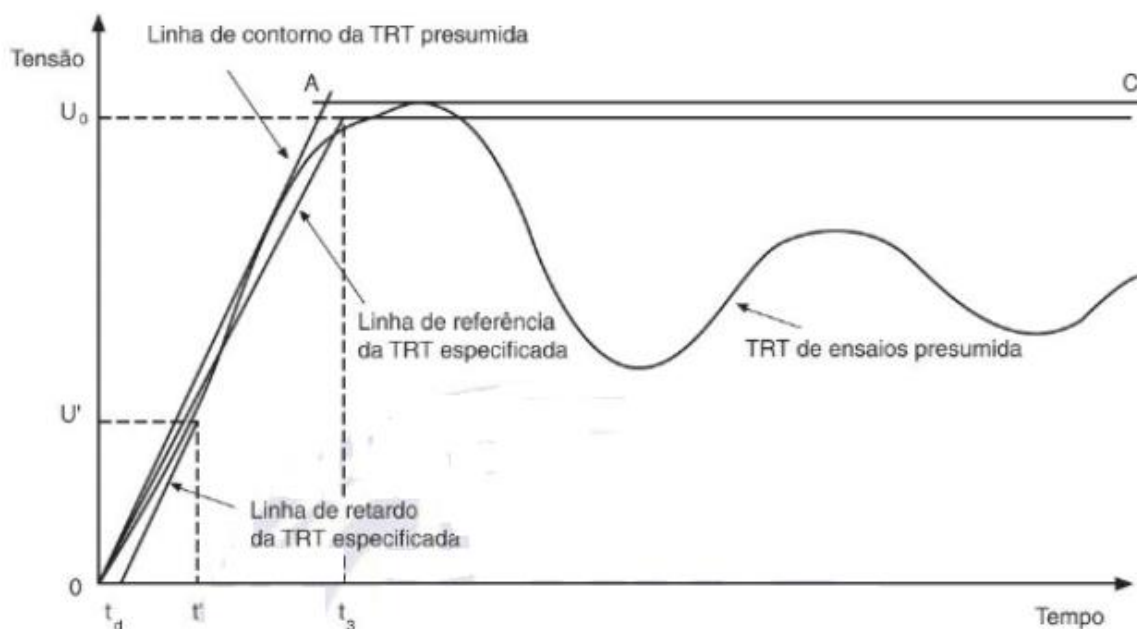


Figura 5 - Exemplo de TRT

Fonte: ABNT NBR 7282:2011 [6]

As coordenadas de interseção do seguimento das linhas descritas acima são os parâmetros da TRT, que determinam os parâmetros U_c , representados na figura 5 como U_o , e t_3 , que podem ser achados nas tabelas 4 e 5, retirados da norma ABNT NBR 7282:2011 [6].

3 PARAMETRIZAÇÃO DO ARRANJO DE ENSAIO

Na análise da parametrização de um dispositivo fusível com valores nominais de 15 kV / 1,4 kA classe A, as correntes serão divididas nos grupos de ensaio 1, 2, 3, 4 e 5, em que serão calculadas as TRT previstas é feito uma modelagem dessa TRT por meio computacional, e no capítulo seguinte será efetuada uma comparação da TRT por meio computacional com a aplicação do degrau unitário.

Cada grupo de ensaio tem a finalidade de representar vários tipos de curto-circuito e as características mecânicas do equipamento, onde, de acordo com a NBR 7282 [6], são:

- Grupo 1: Verificação da capacidade de interrupção nominal;
- Grupo 2 e 3: Verificação da capacidade de interrupção nas faixas de correntes de falta – grupo 2 de 60 a 80% da corrente nominal de interrupção, grupo 3 de 20 a 30% da corrente nominal de interrupção;
- Grupo 4 e 5: Verificação da capacidade de interrupção para correntes de falta relativamente baixas – grupo 4 de 400 a 500 A e grupo 5 de 2,7 a 3,3 da corrente nominal do elo fusível, com mínimo de 15 A.

Conforme as normas ABNT NBR 7282:2011 [6] e IEC 60282-2:2008 [2], o circuito de ensaio é composto pelas figuras 6, 7 e 8.

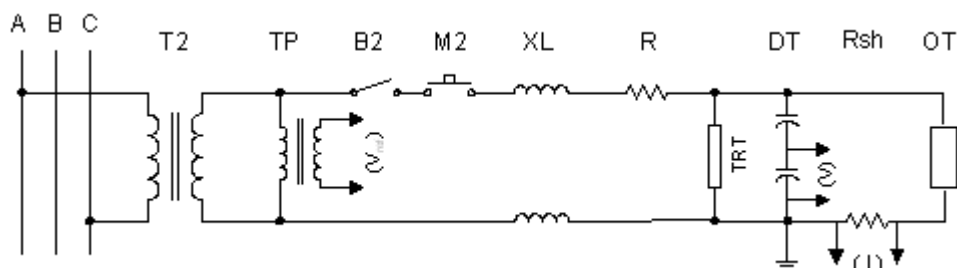


Figura 6 - Circuito de ensaio para sequências de ensaio 1, 2 e 3

Fonte: Ensaio de verificação da capacidade de interrupção em chaves fusíveis de distribuição [17]

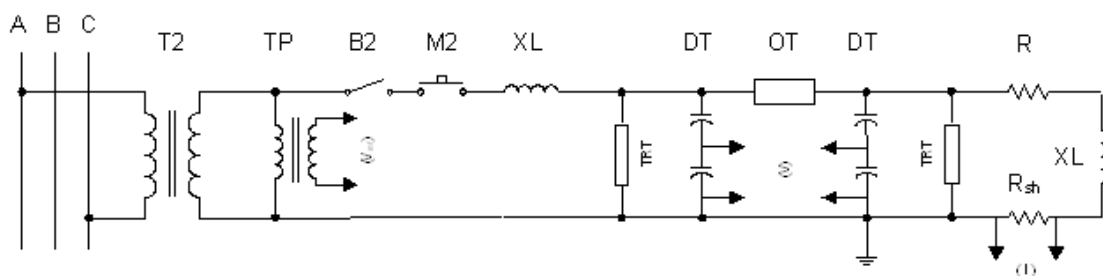


Figura 7 - Circuito de ensaio para seqüência de ensaio 4

Fonte: Ensaio de verificação da capacidade de interrupção em chaves fusíveis de distribuição [17]

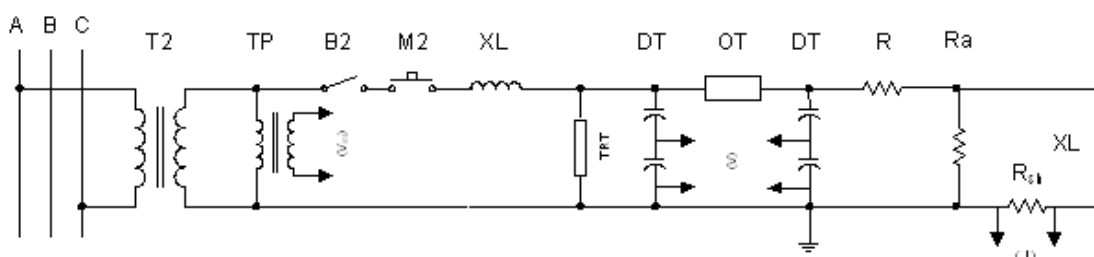


Figura 8 - Circuito de ensaio para seqüência de ensaio 5

Fonte: Ensaio de verificação da capacidade de interrupção em chaves fusíveis de distribuição [17]

Onde:

ABC - Barramento de 138 kV;

B2 - Disjuntor;

DT - Divisor de tensão;

M2 - Chave de estabelecimento de corrente com fechamento síncrono;

OT - Objeto sob teste.

R - Resistor para controle do fator de potência;

Ra - Resistor para amortecimento crítico;

Rsh - Derivador de corrente;

T2 - Transformador de curto-circuito;

TP - Transformador de potencial para visualização da tensão de referência;

TRT - Parâmetros para controle da tensão de restabelecimento transitória; e

XL - Reator limitadores de corrente.

3.1 Gerador de Degrau Unitário

A forma de onda da TRT é devida unicamente às características do circuito, que constituem a TRT presumida. Visto que todo dispositivo de medição tem influência sobre a forma de onda da TRT presumida, são necessárias precauções e, eventualmente, correções convenientes. Existem métodos para a avaliação da TRT presumida, tanto para o circuito dos laboratórios de ensaio de curto-circuito quanto para sistemas de alta-tensão, ou seja, [15]:

- Interrupção direta da corrente de curto-circuito;
- Injeção de corrente à frequência industrial;
- Injeção de corrente de descarga de capacitor;
- Modelos de sistema;
- Cálculo a partir dos parâmetros do circuito;e
- Manobra em vazio de sistemas de ensaio incluindo transformadores.

Levando em consideração as características da TRT, o método escolhido foi pela injeção de corrente capacitiva. Através deste método, consegue-se usar um circuito totalmente isolado do outro, conseguindo, assim, uma resposta transitória real do circuito a ser utilizado no ensaio do dispositivo fusível do lado da carga e do lado da fonte.

O circuito ficará, de maneira resumida, como mostrado na figura 9.

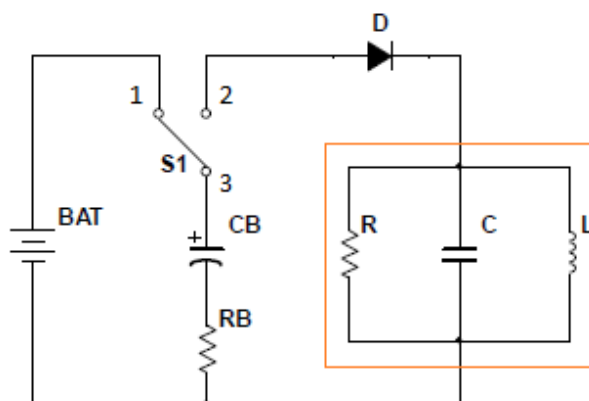


Figura 9 - Circuito Equivalente do TRTômetro

Fonte: Autor

Onde os componentes “C”, “R” e “L”, são definidos pelos parâmetros do circuito do arranjo de ensaio, “D” é um diodo de corte rápido, os componentes “CB” e “RB”, são definidos pelo banco de capacitores a ser usado, e “BAT” é a bateria para carregar o banco de capacitores.

Com esse circuito é possível fazer com que a chave “S1”, estando na posição 1-3, carregue o banco de capacitores até uma determinada tensão; após o carregamento do banco de capacitores, ao se trocar a chave “S1” de 1-3 para 2-3, o circuito fica habilitado para que capacitor descarregue a sua energia acumulada no circuito “RLC”; porém, quando o semi-ciclo da corrente passar de seu valor positivo para o negativo, o diodo “D” impedirá a passagem de corrente de retorno, isolando, assim, o circuito “RLC” do banco de capacitores, impedindo que estes interfiram nos parâmetros da TRT, e, desta forma, confinando a energia descarregada pelo banco de capacitores no circuito RLC, gerando uma frequência de oscilação que caracteriza o TRT, conforme a forma apresentada da tensão e corrente na fonte, mostrada na Figura 10, e conforme, de acordo com a Figura 5, o formato da onda de TRT presumida pela injeção de corrente.

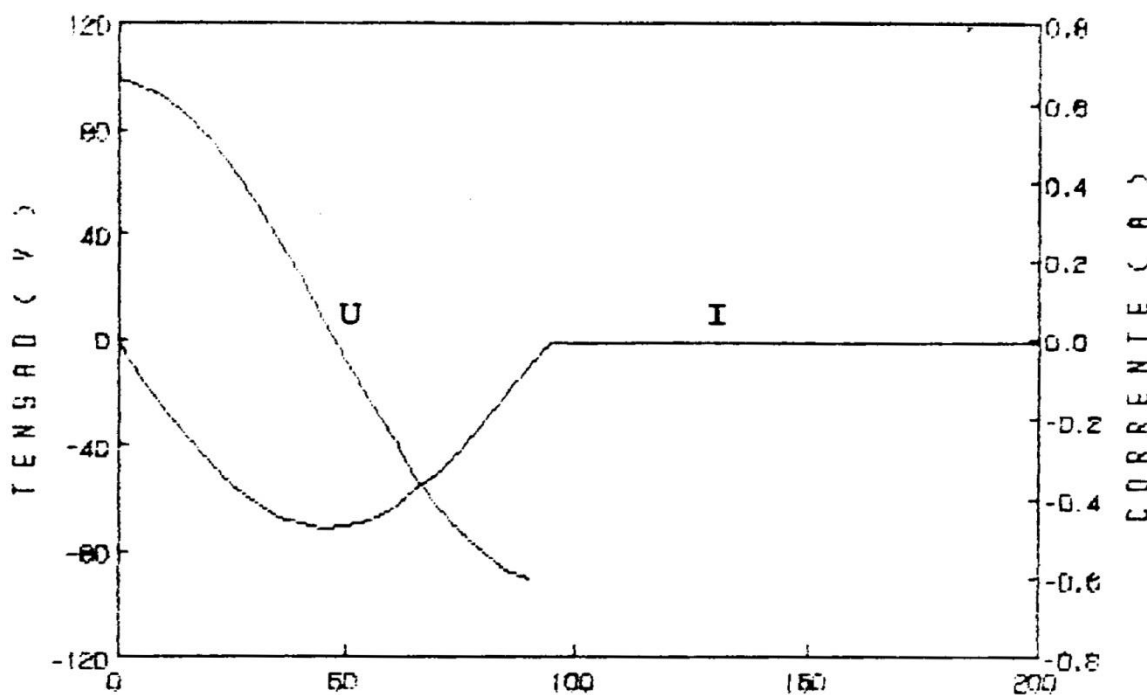


Figura 10 - Tensão e corrente esperada na fonte

Fonte: Procedimento PR/3002.11 [9]

Para adquirir todos os dados, o CEPEL possui um sistema próprio de medição, o qual é utilizado para o teste da resposta da TRT. O Sistema se resume basicamente ao descrito na Figura 11.

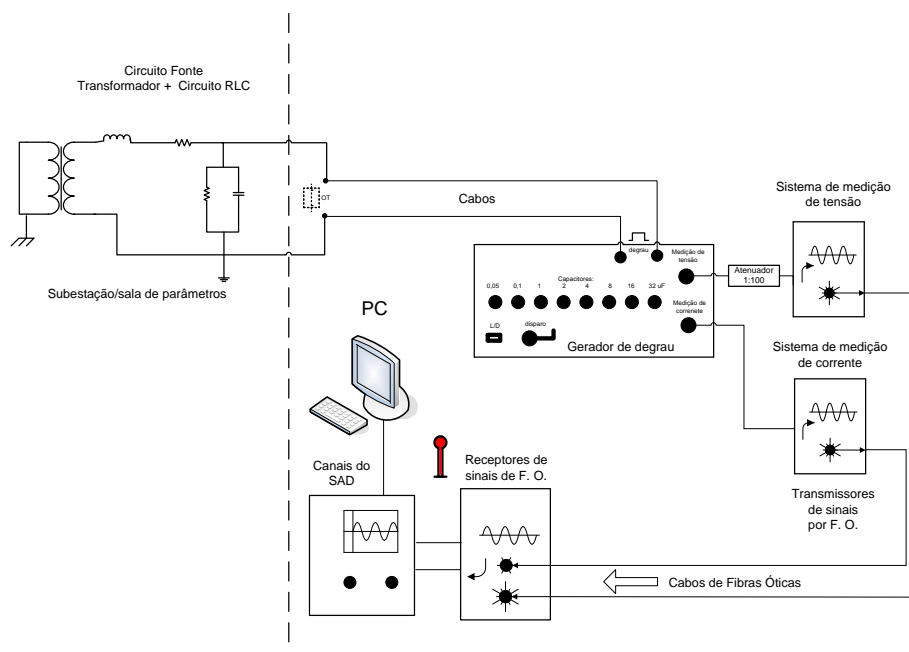


Figura 11 - Circuito de Medição dos Parâmetros da TRT

Fonte: Procedimento PR/3002.11 [16]

Para a montagem do equipamento, será necessário dividi-lo em partes:

1. Fonte
2. Banco de Capacitores
3. Circuito de controle

3.1.1 Circuito da Fonte

O circuito da fonte receberá uma alimentação de 127 Vac, que será retificada por uma ponte de onda completa de diodos para que se possa carregar o banco de capacitores em regime contínuo de cerca de 180 Vcc . A segunda parte do TRTômetro, passará por um transformador abaixador, que reduzirá o nível de tensão de 127 Vac para 9 Vac e, em seqüência, esta tensão será retificada por uma ponte de diodos para alimentar o circuito dos relés de 12 Vcc.

Os circuitos de fonte, bem como o dos contatos de relés para poder isolar os circuitos entre si, estão representados pela Figura 12.

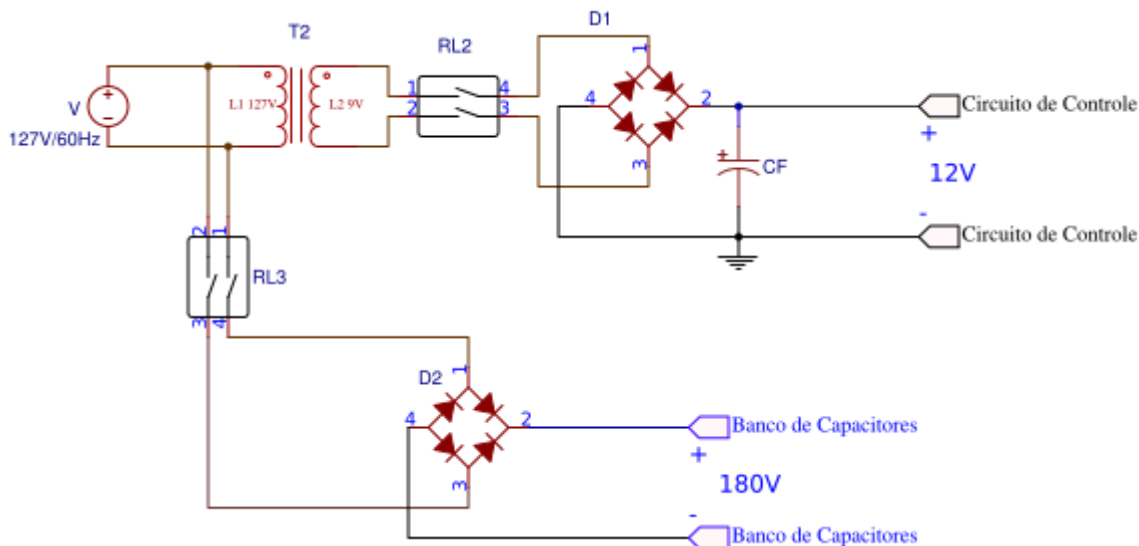


Figura 12 - Circuito da fonte de Alimentação e seus Subcircuitos

Fonte: Autor

Onde RL2 e RL3, são relés que serão acionados pelo circuito de controle para pode isolar os circuitos da fonte durante a descarga. Após a retificação, a tensão para o banco de capacitores será de 180 Vcc e a tensão do circuito de controle será de 12 Vcc.

3.1.2 Circuito Injetor de Corrente

Para o circuito de injeção de corrente, é necessário um circuito como o mostrado na figura 13, onde os capacitores precisam de uma corrente de fuga extremamente baixa, pois essa corrente pode causar interferência na TRT esperada. O banco de capacitores tem que ter uma capacitância cerca de 60 vezes maior que a capacitância total do circuito a ser analisado, por causa disso, o equipamento será composto por vários bancos de capacitores de valores diferentes e selecionáveis, caso surja a necessidade de se ter uma maior capacitância, poderá ser adicionado ao circuito, décadas capacitivas externas ao equipamento, onde poderá providenciar a capacitância total do banco de capacitores.

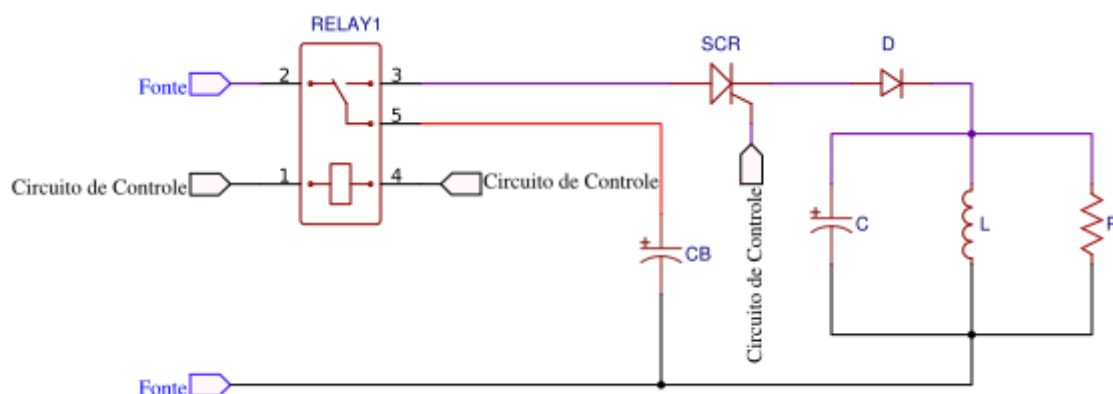


Figura 13 - Circuito injetor de Corrente

Fonte: Autor

Para se poder fazer o chaveamento do circuito, tirar-se-á a alimentação, e conectar-se-á diretamente o banco de capacitores carregado ao circuito de teste.

3.1.3 Circuito de Controle

O circuito de controle tem por finalidade fazer os disparos dos relés e assim possibilitar a injeção de corrente no circuito a ser testado. O chaveamento dos relés e o disparo dos tiristores são feitos contando com o tempo que se demora para o chaveamento ser concluído, não permitindo, com isto, o efeito do repique dos relés causarem influência (ruídos) no teste.

3.2 Escolha do TAP do Transformador

Para a determinação dos parâmetros da TRT, primeiro temos que determinar os parâmetros de cada componente do arranjo de ensaio, em que se sabe que a tensão nominal do dispositivo é de $15 \text{ kV}_{\text{ef}}$ e, conseguindo-se o valor da corrente de curto (I_{cc}) pela tabela 2, encontra-se o valor de I_{cc} é de $7,1 \text{ kA}_{\text{ef}}$, e o fator de potência de 0,12, o que dará um ângulo de $83,1^\circ$.

Sabendo que a tensão da fonte varia, se faz uma correção para a escolha do tap do transformador, que é definida pela equação 5.2.

$$\frac{V}{V_{tap}} = \frac{V_{furnas}}{V_{nominal}} \quad (5.1)$$

$$V_{tap} = V * \frac{V_{nominal}}{V_{furnas}} \quad (5.2)$$

Onde:

$V_{nominal}$ – Tensão nominal do transformador (KV);

V – Tensão nominal do equipamento (KV);

V_{tap} – Tensão do tap (KV);

V_{furnas} – Tensão de furnas (KV).

$$V_{tap} = 15 * \frac{138}{140}$$

$$V_{tap} = 14,79 \text{ KV}_{ref}$$

Com o valor da tensão, pode-se determinar qual TAP do transformador é mais adequado.

3.3 Grupo de Ensaio 1

3.3.1 Inerentes do Circuito

Com a escolha do TAP adequado, pode-se determinar a impedância do circuito pela equação 5.3:

$$Z = \frac{V}{I_{cc}} \angle \cos^{-1} \varphi \quad (5.3)$$

Onde:

Z – Impedância do circuito (Ω);

V – Tensão do equipamento (KV);

I_{cc} – Corrente de curto circuito (KA);

φ – Ângulo do fator de potência.

$$Z = \frac{15}{7,1} \angle \cos^{-1}(0,12)$$

$$Z = 0,2535 + j2,0974 \Omega$$

Com isso, se acha uma impedância de $0,25 + j2,097 \Omega$. Para poder selecionar os reatores a serem utilizados, deve-se levar em conta as reatâncias inerentes do circuito, cujos valores variam de acordo com a escolha do TAP do transformador, esses valores podem ser encontrados no anexo I.

Para o TAP que será usado no ensaio, o valor das inerentes do circuito é de $0,3487 \Omega$. Com isso podemos determinar os reatores a serem utilizados, que será de $X_{Reatores} = 1,7483 \Omega$, assim chegando à impedância total do circuito, podendo então definir os parâmetros da TRT.

3.3.2 Parâmetros de Controle da TRT

Sabe-se que pela tabela 4, o tempo de subida da TRT tem que ser de $187 \mu s$ e um fator de amplitude de 1,30. Disto, pode-se começar os cálculos do parâmetro da TRT, tendo-se como base a fórmula da frequência de oscilação natural do circuito, e, assim, determinar a capacitância a ser inserida no circuito para que o mesmo possa oscilar na frequência determinada pela norma.

Como o circuito tem uma reatância indutiva de $2,0974 \Omega$, pode-se achar a indutância presente através da equação 5.4.

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (5.4)$$

Onde: X_L – Reatância (Ω)

f – Frequência da fonte (Hz)

L – Indutância (H)

$$L = \frac{2,0974}{2\pi * 60}$$

$$L = 5,5635 \text{ mH}$$

Sabendo que o fator de amplitude desejado é de 1,30, o valor da taxa de amortecimento pode ser calculado pela equação 3.19.

$$\zeta = \frac{-\ln(1,30 - 1)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(1,30 - 1)^2}} = 0,3579$$

Sabendo que o tempo para se chegar ao pico da TRT tem que ser de 187 μs , pela equação 3.23, pode-se chegar ao valor da frequência natural amortecida.

$$\omega_d = \frac{\pi}{187 * 10^{-6}}$$

$$\omega_d = 16,8 \text{ krad/s} \leftrightarrow 2674 \text{ Hz}$$

E sabendo que a frequência de oscilação deverá ser de 2.674 Hz, através da relação ω_d/ω_o da equação 3.18, pode-se determinar a frequência de oscilação natural do circuito.

$$\frac{\omega_d}{\omega_o} = \frac{f_d}{f_o} = \sqrt{1 - \zeta^2}$$

$$f_o = \frac{f_d}{\sqrt{1 - 0,3579^2}}$$

$$f_o = \frac{2674}{0,9485}$$

$$f_o = 2863 \text{ Hz} \leftrightarrow \omega_o = 17,8 * 10^3 \text{ rad/s}$$

Com isso pode-se determinar o valor da capacitância para acoplar no circuito para que se haja a ressonância, através da equação 5.5.

$$C = \frac{1}{(2\pi f_o)^2 * L} \quad (5.5)$$

$$C = \frac{1}{(2\pi * 2863)^2 * 5,5635 * 10^{-3}}$$

$$C = 555,27 \text{ nF}$$

Sabendo que a frequência de oscilação natural do circuito (ω_0) e a frequência de Neper (α) têm que ser iguais para que a TRT seja criticamente amortecida, basta se igualar as duas frequências. Porém, o circuito de controle da TRT pode ser montado de duas maneiras, em série ou em paralelo; o que, a seguir, será analisado qual a melhor opção.

3.3.2.1 Controle em Paralelo

Para poder se definir a resistência a fim de se ter um amortecimento crítico, deve-se igualar as equações 3.5 e 3.6, chegando-se na equação 5.6.

$$R_c = \frac{1}{2} \sqrt{L/C} \quad (5.6)$$

$$R_c = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{5,5635 * 10^{-3}}{555,27 * 10^{-9}}}$$

$$R_c = 50,05 \Omega$$

Sabendo que a função de transferência desse circuito é definida pela equação 3.24, em que a resistência de amortecimento é definida pela equação 3.27 ou pela equação 3.29, então:

$$R = \frac{50,04}{0,3579}$$

$$R = 139,84 \Omega$$

Após isso, se chega numa relação entre o amortecimento crítico da TRT com o fator de amplitude, sendo preciso inserir, assim, uma resistência de 139,84 Ω no circuito da TRT, para se conseguir atingir o fator de amplitude e, ao mesmo tempo, se possibilitar chegar o mais perto de um estado criticamente amortecido. Com isso, para o ensaio do grupo 1, chegou-se aos seguintes valores dos parâmetros de ensaio, em se escolhendo um circuito em paralelo:

$$R_{TRT} = 139,84 \Omega$$

$$L = 5,5635 \text{ mH}$$

$$C = 555,29 \text{ } \mu\text{F}$$

E na função de transferência a seguir:

$$G_{(s)} = \frac{323,70 * 10^6}{s^2 + 12,878 * 10^3 s + 323,70 * 10^6}$$

Que, ao aplicar a um degrau unitário nessa função de transferência, utilizando o *software* Matlab, aparecerá a seguinte resposta transitória, mostrada pela figura 14.

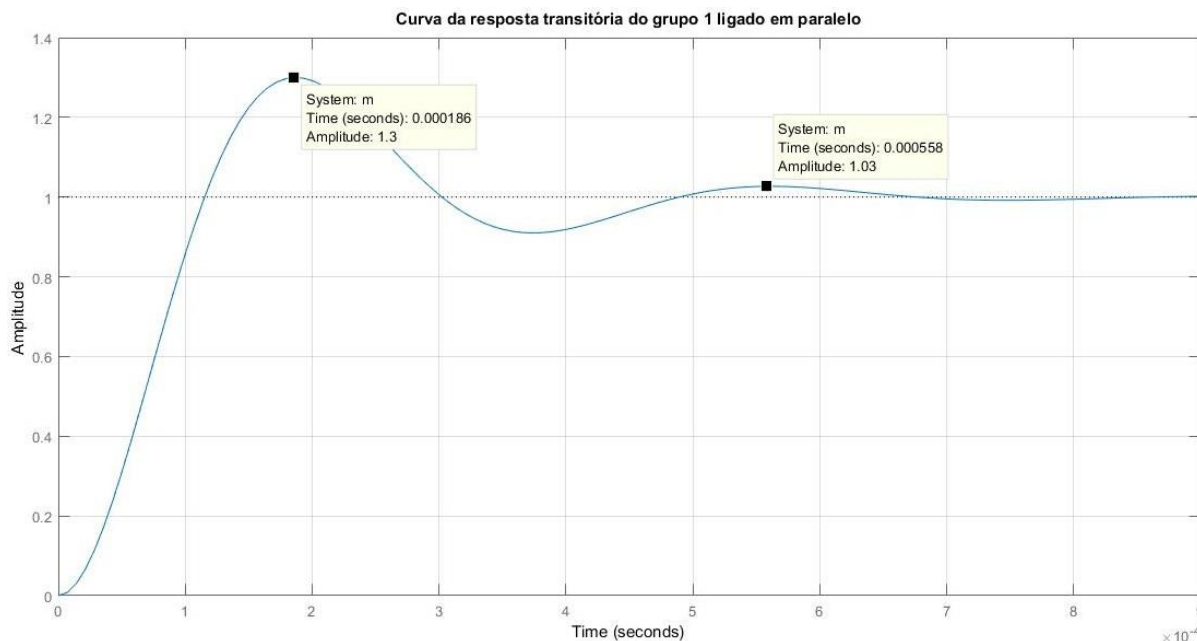


Figura 14 - Resposta Transitória do Circuito do Grupo 1 em Paralelo

Fonte: Autor

Fazendo-se uma simulação pelo ATPDraw, chega-se ao resultado mostrado na figura 16 para o circuito da figura 15. Onde na figura 16, a linha em verde representa a tensão no objeto de teste e a linha em azul representa a corrente no objeto de teste.

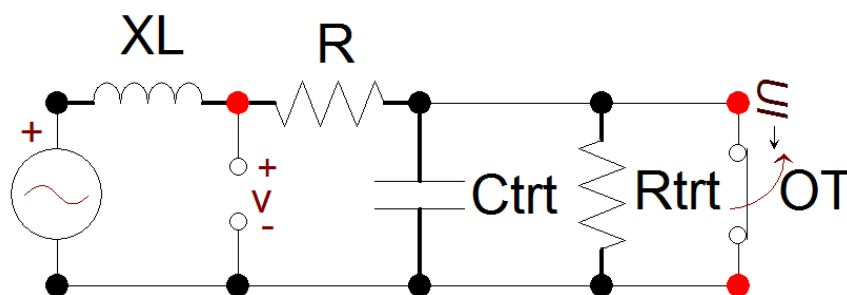


Figura 15 - Circuito simulado no ATPDraw

Fonte: Autor

Legenda: XL – Reatores;

R – Resistencia de fator de potência;

C_{TRT} – Capacitores para controle da TRT;

R_{TRT} – Resistores para controle da TRT;

OT – Objeto de teste.

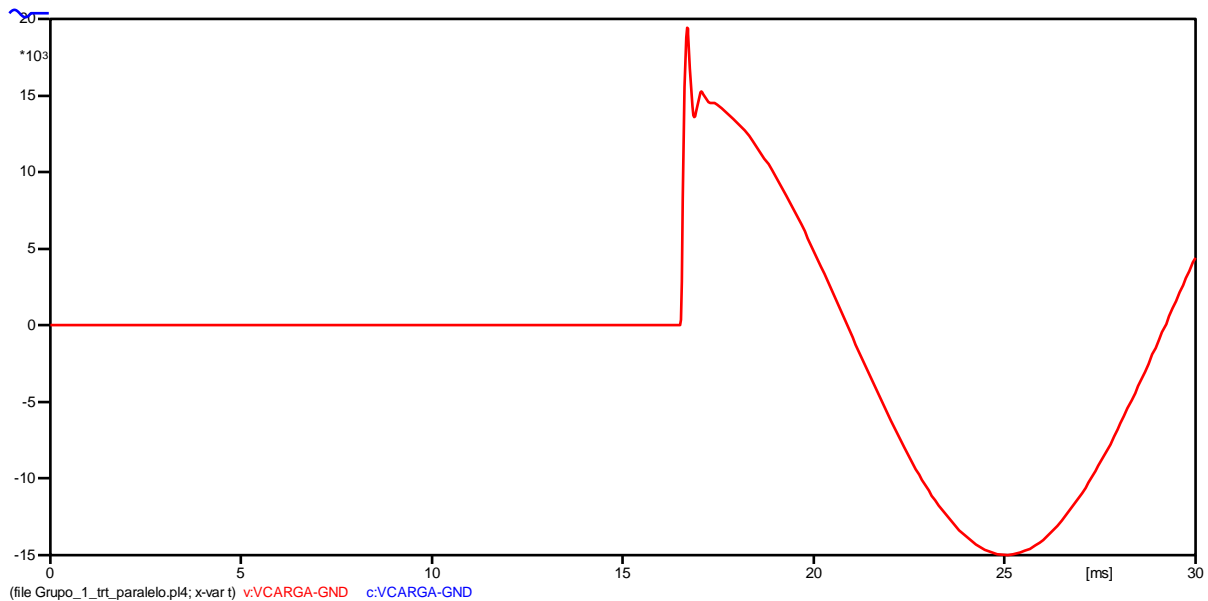


Figura 16 - Do circuito simulado no ATPDraw

Fonte: Autor

Pode-se verificar que pela aplicação do degrau unitário utilizando o software Matlab, consegue-se uma resposta transitória de 2.688 Hz e um fator de amplitude 1,30, e pode-se verificar que pela simulação no ATPDraw teve-se uma resposta transitória de 2.688 Hz com um fator de amplitude de 1,30 com um tempo de t_3 de 189 μ s. Mostrando um resultado satisfatório em ambas simulações.

3.3.2.2 Controle em Série

Para poder se definir a resistência a fim de se ter um amortecimento crítico, deve-se igualar as equações 3.13 e 3.14, chegando-se na equação 5.7.

$$R_c = 2\sqrt{L/C} \quad (5.7)$$

$$R_c = 2\sqrt{\frac{5,5635 * 10^{-3}}{555,24 * 10^{-9}}}$$

$$R_c = 200,20 \Omega$$

Sabendo que a função de transferência desse circuito é definida pela equação 3.24, em que a resistência de amortecimento é definida pela equação 3.32 ou pela equação 3.34, então:

$$R = 0,3579 * 200,20$$

$$R = 71,65 \Omega$$

Após isso, se chega numa relação entre o amortecimento crítico da TRT com o fator de amplitude, sendo preciso inserir, assim, resistência de 71,65 Ω no circuito da TRT, para se conseguir atingir o fator de amplitude e, ao mesmo tempo, se possibilitar chegar o mais perto de um estado criticamente amortecido. Com isso, para o ensaio do grupo 1, chegou-se aos seguintes valores dos parâmetros de ensaio, em se escolhendo um circuito em série será:

$$R_{trt} = 71,65\Omega$$

$$C = 555,24 \eta F$$

$$L = 5,5635 mH$$

E na função de transferência a seguir:

$$G_{(s)} = \frac{323,70 * 10^6}{s^2 + 12,878 * 10^3 s + 323,70 * 10^6}$$

Que ao aplicar a um degrau unitário nessa função de transferência, aparecerá a seguinte resposta transitória, mostrada pela figura 17.

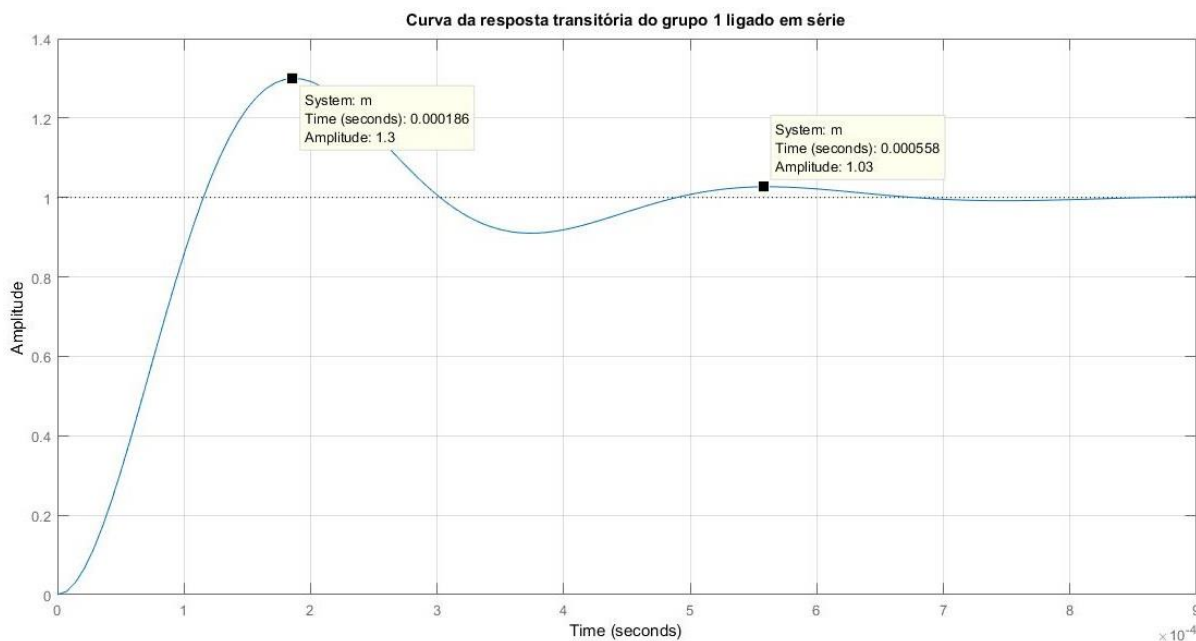


Figura 17 - Resposta Transitória do Circuito do Grupo 1 em Série

Fonte: Autor

Fazendo-se uma simulação pelo ATPDraw, chega-se ao resultado mostrado na figura 19 para o circuito da figura 18. Onde na figura 19, a linha em verde representa a tensão no objeto de teste e a linha em azul representa a corrente no objeto de teste.

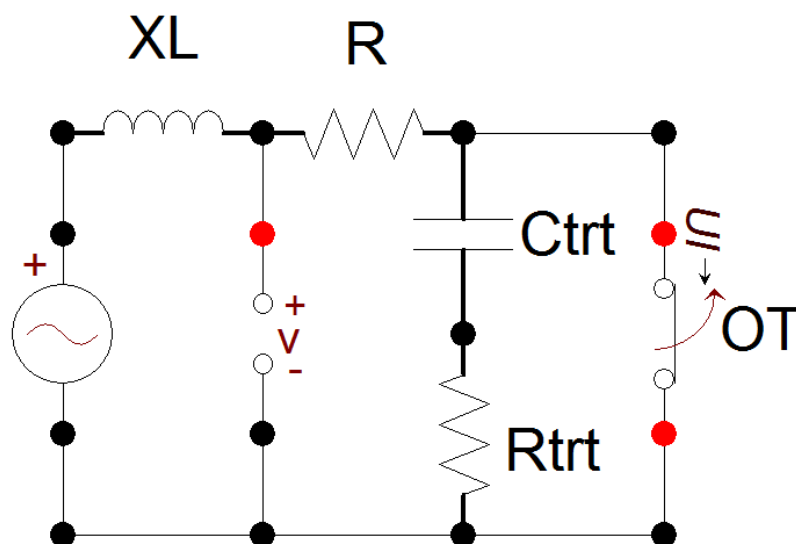


Figura 18 - Circuito simulado no ATPDraw

Fonte: Autor

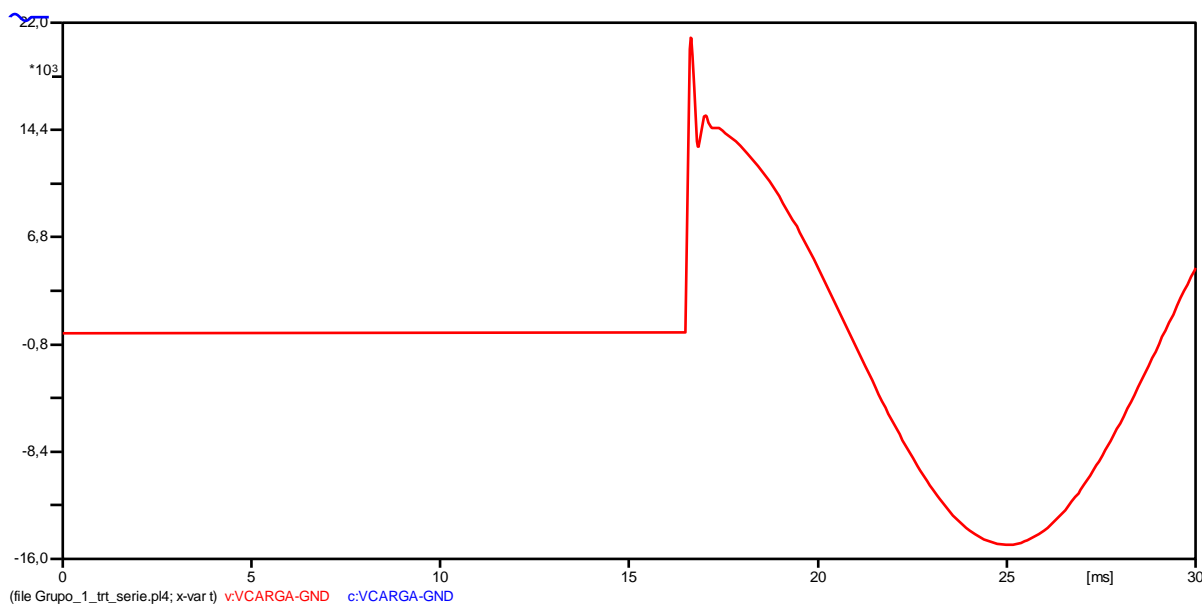


Figura 19 - Resposta Transitória do Circuito do Grupo 1 em Série

Fonte: Autor

Pode-se verificar que pela aplicação do degrau unitário utilizando o software Matlab, consegue-se uma resposta transitória de 2.688 Hz e um fator de amplitude 1,30, e pode-se verificar que pela simulação no ATPDraw teve-se uma resposta transitória de 2.703 Hz com um fator de amplitude de 1,39 com um tempo de t_3 de 145 μ s. Mostrando certa divergência de resultados entre as simulações. Sendo assim a melhor escolha, através da simulação computacional, é pela montagem do circuito da TRT em paralelo.

3.4 Grupo de Ensaio 2 e 3

Para os grupos de ensaio 2 e 3, basta repetir o mesmo processo do grupo de ensaio 1, porem com valores de corrente de 60 a 80% e 20 a 30% da corrente nominal para os grupos 2 e 3 respectivamente. Chegando assim nos valores descritos na tabela 7 abaixo.

Tabela 6 - Parâmetros de ensaio dos grupos 1, 2 e 3

Grupo de Ensaio						
Componentes	1		2		3	
	Paralelo	Série	Paralelo	Série	Paralelo	Série
R (Ω)	0,2535		0,3621		1.0141	
L (mH)	5,5635		7,9478		22,2536	
C (η F)	555,24		388,6932		193,563	
R _{trt} (Ω)	139,84	71,65	199,7691	102,3556	559,3470	286,5924

Fonte: Autor

3.5 Grupo de Ensaio 4

3.5.1 Lado Fonte

Para o circuito do lado da fonte, teremos que colocar uma impedância para caso de alguma falha e a corrente na linha de 138 KV não ultrapasse o permitido. Com isso para determinar a impedância do lado da fonte, usará a equação 5.9 e a potência máxima permitida pela equação 5.8.

$$S_{max} = \sqrt{3} * V_{furnas} * I_{max} \quad (5.8)$$

$$Z_{fonte} = \frac{V_{tap}^2}{S_{max}} - Z_{tap} \quad (5.9)$$

Substituindo a equação 5.8 na equação 5.9 teremos a equação 5.10 para definir a impedância presente do lado da fonte.

$$Z_{fonte} = \frac{V^2}{\sqrt{3} * V_{furnas} * I_{max}} - Z_{tap} \quad (5.10)$$

$$Z_{fonte} = \frac{15^2}{\sqrt{3} * 140 * 0,8} - 0.3487$$

$$Z_{fonte} = 0,8112 \Omega$$

Após a escolha dos reatores limitadores de corrente a serem inseridos no circuito no lado da fonte, deve-se montar um circuito para determinar a TRT no lado da fonte. Esse circuito terá uma f_a e uma frequência de oscilação igual à dos grupos 1, 2 e 3, ou seja, $f_a=1,30$ e $t_3=187 \mu s$. Sabe-se que a impedância total do lado da fonte é de $1,1599 \Omega$, e que é puramente indutiva, pode-se calcular a indutância presente no circuito através da equação 3.4.

$$L = \frac{1,1599}{2\pi * 60}$$

$$L = 3,0767 \text{ mH}$$

Sabendo que o fator de amplitude desejado é de 1,30, o valor da taxa de amortecimento pode ser calculado pela equação 3.19.

$$\zeta = \frac{-\ln(1,50 - 1)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(1,50 - 1)^2}}$$

$$\zeta = 0,2155$$

$$\omega_d = \frac{\pi}{18 * 10^{-6}}$$

$$\omega_d = 174,53 * 10^3 \text{ rad/s} \leftrightarrow 27,7 \text{ kHz}$$

E sabendo que a frequência de oscilação deverá ser de 27,7 kHz, através da relação ω_d/ω_o da equação 3.18, pode-se determinar a frequência de oscilação natural do circuito.

$$\frac{\omega_d}{\omega_o} = \frac{f_d}{f_o} = \sqrt{1 - \zeta^2}$$

$$f_o = \frac{f_d}{\sqrt{1 - 0,2155^2}}$$

$$f_o = \frac{27777,78}{0,9765}$$

$$f_o = 28,45 \text{ kHz} \leftrightarrow \omega_o = 178,732 * 10^3 \text{ rad/s}$$

Com isso pode-se determinar o valor da capacitância para acoplar no circuito para que se haja a ressonância, através da equação 5.5.

$$C = \frac{1}{(2\pi * 28446,16)^2 * 3,0767 * 10^{-3}}$$

$$C = 10,17 \text{ nF}$$

3.5.1.1 Controle em Paralelo

Para poder se definir a resistência a fim de se ter um amortecimento crítico, deve-se igualar as equações 3.5 e 3.6, chegando-se na equação 5.6.

$$R_c = \frac{1}{2} \sqrt{L/C}$$

$$R_c = 275,01 \text{ } \Omega$$

Sabendo que a função de transferência desse circuito é definida pela equação 3.24, em que a resistência de amortecimento é definida pela equação 3.27 ou pela equação 3.29, então:

$$R = \frac{1}{2\zeta} \sqrt{L/C}$$

$$R = \frac{R_c}{\zeta}$$

$$R = \frac{275,01}{0,21559}$$

$$R = 1276,15 \Omega$$

Após isso, se chega numa relação entre o amortecimento crítico da TRT com o fator de amplitude, sendo preciso inserir, assim, uma resistência de 1276Ω no circuito da TRT para se conseguir atingir o fator de amplitude e, ao mesmo tempo, se possibilitar chegar o mais perto possível de um estado criticamente amortecido. Com isso, para o circuito do lado fonte do grupo 4, chegou-se aos seguintes valores dos parâmetros de ensaio para um circuito montado em paralelo será:

$$R_{TRT} = 1276 \Omega$$

$$L = 3,0767 \text{ mH}$$

$$C = 10,17 \text{ } \mu\text{F}$$

E na função de transferência a seguir:

$$G_{(s)} = \frac{3,194 * 10^{10}}{s^2 + 76996s + 3,194 * 10^{10}}$$

Que ao aplicar a um degrau unitário nessa função de transferência, utilizando o software Matlab, aparecerá a seguinte resposta transitória, mostrada pela figura 20.

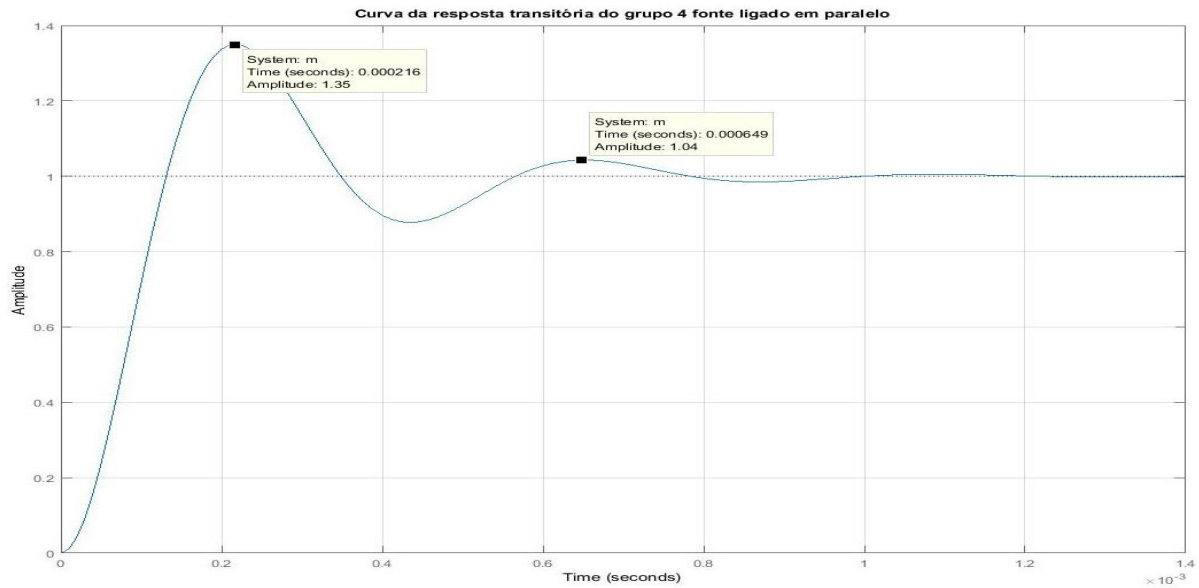


Figura 20 - Resposta Transitória do Circuito do Lado Fonte em Paralelo

Fonte: Autor

Pode-se verificar que pela aplicação de um degrau unitário na função de transferência utilizando o software Matlab, obteve-se uma resposta transitória de 2.326 Hz com um fator de amplitude de 1,35.

3.5.1.2 Controle em Série

Para poder se definir a resistência a fim de se ter um amortecimento crítico, deve-se igualar as equações 3.13 e 3.14, chegando-se na equação 5.7.

$$R_c = 2\sqrt{L/C}$$

$$R_c = 1100 \Omega$$

Sabendo que a função de transferência desse circuito é definida pela equação 3.24, em que a resistência de amortecimento é definida pela equação 3.32 ou pela equação 3.34, então:

$$R = \zeta R_c$$

$$R = 237,06 \Omega$$

Chegando assim em uma relação entre o amortecimento crítico da TRT com o fator de amplitude, assim inserindo uma resistência de 237Ω no circuito da TRT para se conseguir atingir o fator de amplitude e, ao mesmo tempo, se possibilitar chegar o mais perto possível de um estado criticamente amortecido. Com isso, para o circuito do lado fonte do grupo 4, chegou-se aos seguintes valores dos parâmetros de ensaio para um circuito montado em série será:

$$R_{TRT} = 237 \Omega$$

$$L = 3,0767 \text{ mH}$$

$$C = 10,17 \text{ } \eta\text{F}$$

E na função de transferência a seguir:

$$G(s) = \frac{3,194 * 10^{10}}{s^2 + 76996s + 3,194 * 10^{10}}$$

Que ao aplicar a um degrau unitário nessa função de transferência, utilizando o software Matlab, aparecerá a seguinte resposta transitória, mostrada pela figura 21.

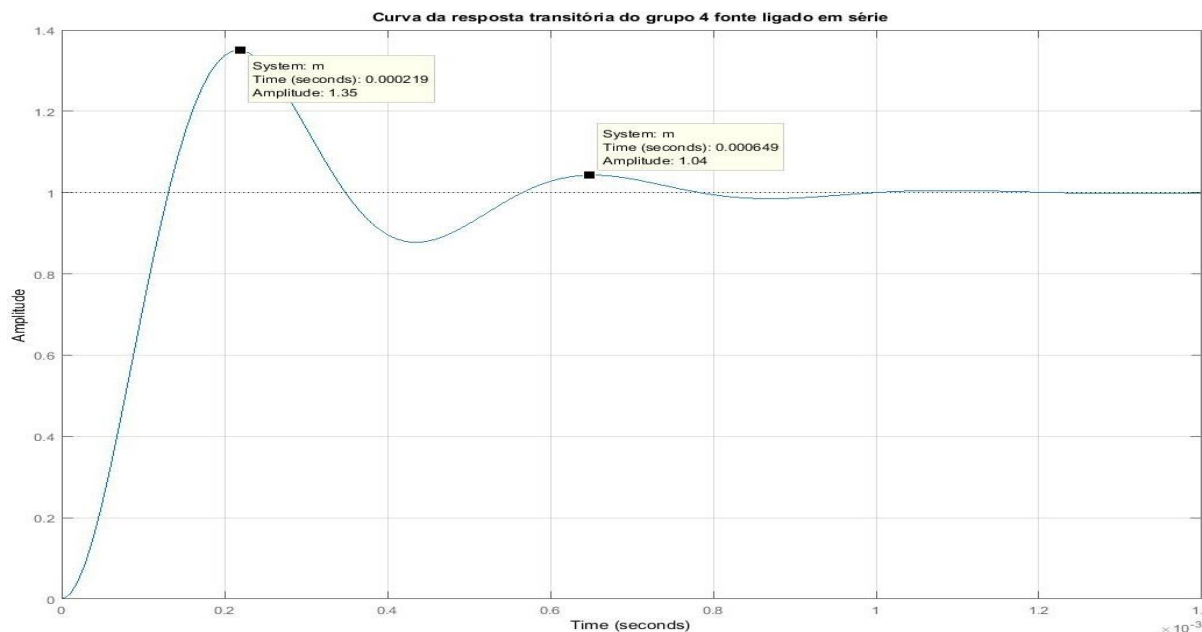


Figura 21 - Resposta Transitória do Circuito do Lado Fonte em Série

Fonte: Autor

Pode-se verificar que pela aplicação de um degrau unitário na função de transferência utilizando o software Matlab, obteve-se uma resposta transitória de 2.326 Hz com um fator de amplitude de 1,35.

3.5.2 Lado carga

Para o grupo de ensaio 4, será usado as mesmas fórmulas, porem para uma corrente de 450 A_{ef}. Com pode-se dar início a modelagem matemática, onde a tensão de referência continua 14,79 KV e com o fator de potência, de acordo com a tabela 3, será de 0,5 e uma reatância já presente no circuito do lado da fonte de $j1,1599 \Omega$. Com isso terá uma impedância de:

$$Z = \frac{15}{0,450} \angle \cos^{-1}(0,4) - j1,1599$$

$$Z = 13,33 + j29,3906\Omega$$

Como o circuito tem uma reatância indutiva de 29,3906 Ω , pode-se achar a indutância presente através da equação 5.4.

$$L = \frac{29,3906}{2\pi * 60}$$

$$L = 77,9592 \text{ mH}$$

Sabendo que o fator de amplitude desejado é de 1,50, o valor da taxa de amortecimento pode ser calculado pela equação 3.19.

$$\zeta = \frac{-\ln(1,50 - 1)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(1,50 - 1)^2}}$$

$$\zeta = 0,2155$$

Sabendo que o tempo para se chegar ao pico da TRT tem que ser de 18 μs , pela equação 3.23 pode-se chegar ao valor da frequência natural amortecida.

$$\omega_d = \frac{\pi}{18 * 10^{-6}}$$

$$\omega_d = 174,53 * 10^3 \text{ rad/s} \leftrightarrow 27,7 \text{ kHz}$$

E sabendo que a frequência de oscilação deverá ser de 27,7 kHz, através da relação ω_d/ω_o da equação 3.18, pode-se determinar a frequência de oscilação natural do circuito.

$$\frac{\omega_d}{\omega_o} = \frac{f_d}{f_o} = \sqrt{1 - \zeta^2}$$

$$f_o = \frac{f_d}{\sqrt{1 - 0,2155^2}}$$

$$f_o = \frac{27777,78}{0,9765}$$

$$f_o = 28,45 \text{ kHz} \leftrightarrow \omega_o = 178,732 * 10^3 \text{ rad/s}$$

Com isso pode-se determinar o valor da capacitância para acoplar no circuito para que se haja a ressonância, através da equação 5.5.

$$C = \frac{1}{(2\pi * 28446,16)^2 * 77,9592 * 10^{-3}}$$

$$C = 401,54 \text{ pF}$$

3.5.2.1 Controle em Paralelo

Para poder se definir a resistência a fim de se ter um amortecimento crítico, deve-se igualar as equações 3.5 e 3.6, chegando-se na equação 5.6.

$$R_c = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{77,9592 * 10^{-6}}{401,54 * 10^{-12}}}$$

$$R_c = 6967 \Omega$$

Sabendo que a função de transferência desse circuito é definida pela equação 3.24, em que a resistência de amortecimento é definida pela equação 3.27 ou pela equação 3.29, então:

$$R = \frac{6967}{0,2155}$$

$$R = 32,33 \text{ K}\Omega$$

Chegando assim em uma relação entre o amortecimento crítico da TRT com o fator de amplitude, assim inserindo uma resistência de 32,33kΩ no circuito da TRT para se conseguir atingir o fator de amplitude e, ao mesmo tempo, se possibilitar chegar o mais perto possível de um estado criticamente amortecido. Com isso, para

o circuito do lado carga do grupo 4, chegou-se aos seguintes valores dos parâmetros de ensaio para um circuito montado paralelo será:

$$R_{TRT} = 32,33 \text{ k}\Omega$$

$$L = 77,9592 \text{ mH}$$

$$C = 401,54 \text{ pF}$$

E na função de transferência a seguir:

$$G(s) = \frac{3,194 * 10^{10}}{s^2 + 77031s + 3,194 * 10^{10}}$$

Que ao aplicar a um degrau unitário nessa função de transferência, utilizando o software Matlab, aparecerá a seguinte resposta transitória, mostrada pela figura 22.

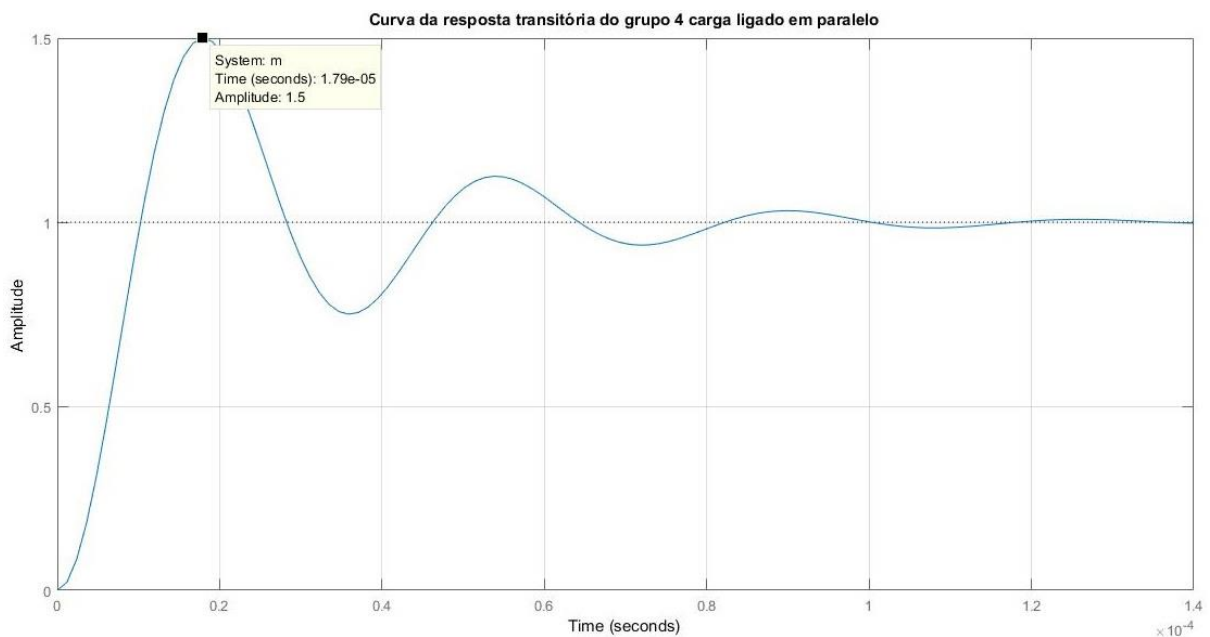


Figura 22 - Resposta Transitória do Circuito do Lado Carga em Paralelo

Fonte: Autor

Pode-se verificar que pela aplicação de um degrau unitário na função de transferência utilizando o software Matlab, obteve-se uma resposta transitória de 23.923 Hz com um fator de amplitude de 1,64.

3.5.2.2 Controle em Série

Para poder se definir a resistência a fim de se ter um amortecimento crítico, deve-se igualar as equações 3.13 e 3.14, chegando-se na equação 5.7.

$$R_c = 2 \sqrt{\frac{77,9592 * 10^{-6}}{401,54 * 10^{-12}}}$$

$$R_c = 27868 \Omega$$

Sabendo que a função de transferência desse circuito é definida pela equação 3.24, em que a resistência de amortecimento é definida pela equação 3.32 ou pela equação 3.34, então:

$$R = 0,2155 * 26272$$

$$R = 6,0 \text{ k}\Omega$$

Chegando assim em uma relação entre o amortecimento crítico da TRT com o fator de amplitude, assim inserindo uma resistência de 6,0 kΩ no circuito da TRT para se conseguir atingir o fator de amplitude e, ao mesmo tempo, se possibilitar chegar o mais perto possível de um estado criticamente amortecido. Com isso, para o circuito do lado carga do grupo 4, chegou-se aos seguintes valores dos parâmetros de ensaio para um circuito montado em série será:

$$R_{TRT} = 6,0 \text{ k}\Omega$$

$$L = 77,9592 \text{ mH}$$

$$C = 401,54 \text{ pF}$$

E na função de transferência a seguir:

$$G_{(s)} = \frac{3,194 * 10^{10}}{s^2 + 77031s + 3,194 * 10^{10}}$$

Que ao aplicar a um degrau unitário nessa função de transferência, utilizando o software Matlab, aparecerá a seguinte resposta transitória, mostrada pela figura 23.

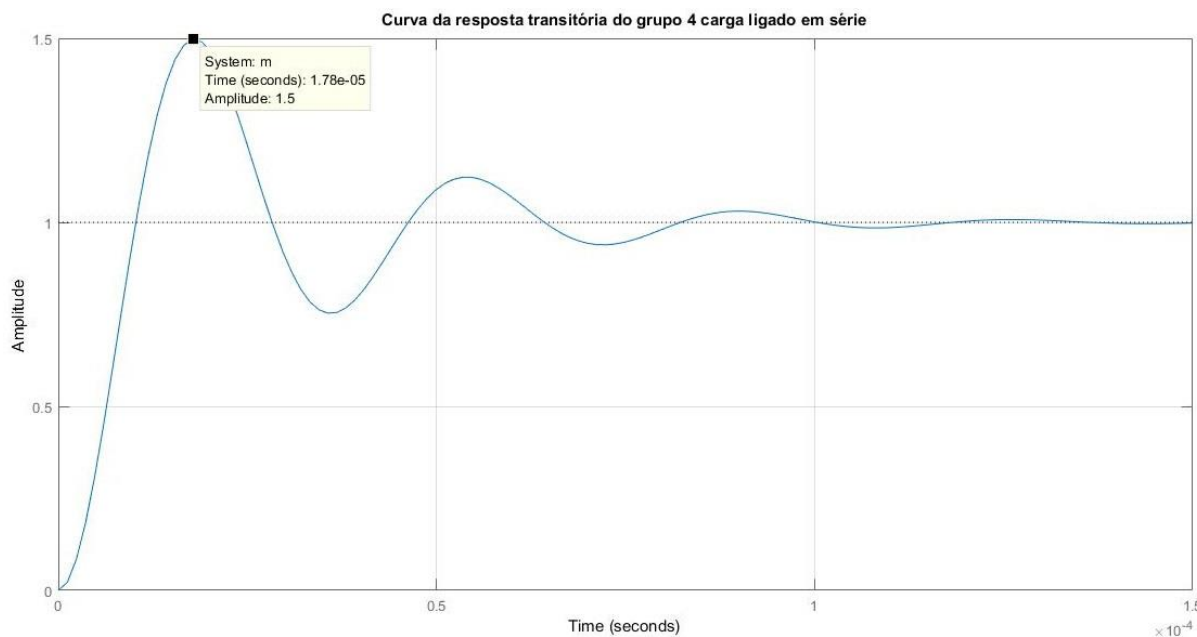


Figura 23 - Resposta Transitória do Circuito do Lado Carga em Série

Fonte: Autor

Pode-se verificar que pela aplicação de um degrau unitário na função de transferência utilizando o software Matlab, obteve-se uma resposta transitória de 23.923 Hz com um fator de amplitude de 1,64.

3.5.3 Simulações no ATPDraw

Após ser calculado os parâmetros para todos os tipos de arranjo do circuito para o grupo 4 do ensaio de dispositivo fusível pode-se fazer as simulações de todas as combinações possíveis, assim, analisando o resultado esperado para o ensaio. Os circuitos simulados são mostrados nas figuras 24, 26, 28 e 30, e as ondas nas figuras 25, 27, 29 e 31.

- Legenda: XL – Reatores de carga;
 XF – Reatores de fonte
 R – Resistencia de fator de potência;
 C_{TRT} – Capacitores para controle da TRT;
 R_{TRT} – Resistores para controle da TRT

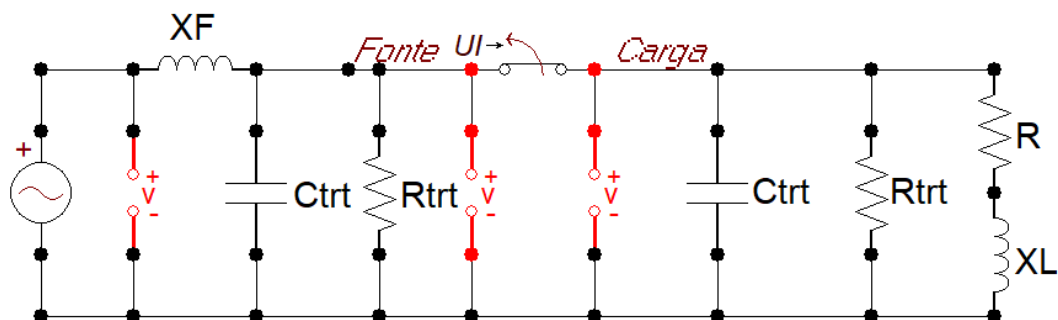


Figura 24 - Circuito paralelo- paralelo

Fonte: Autor

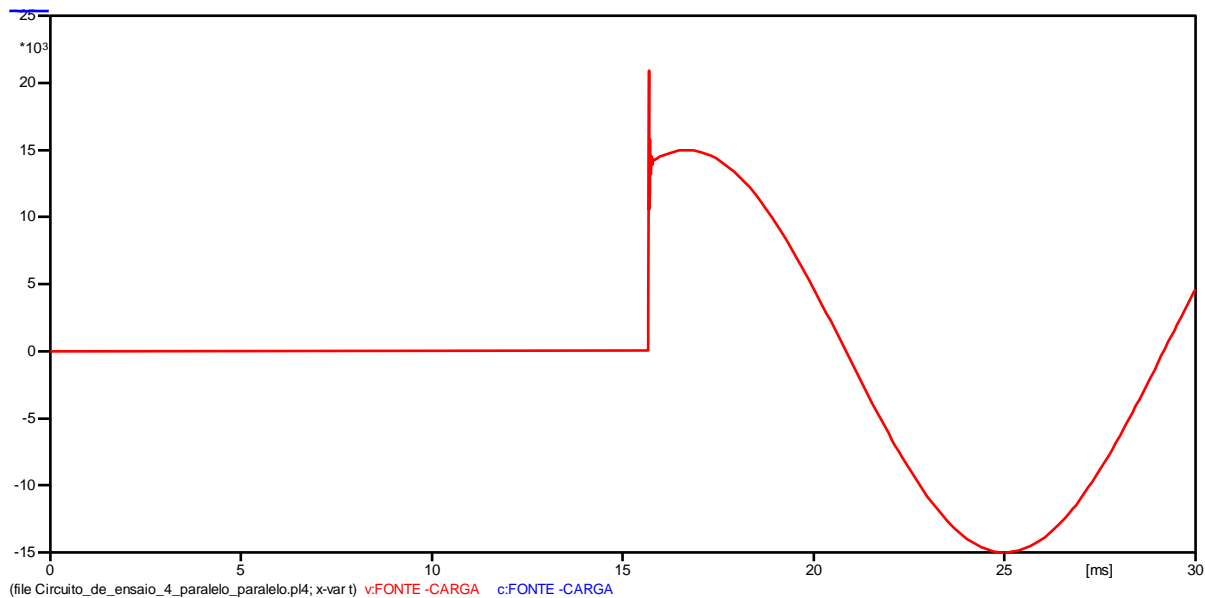


Figura 25 - Resposta do circuito paralelo- paralelo

Fonte: Autor

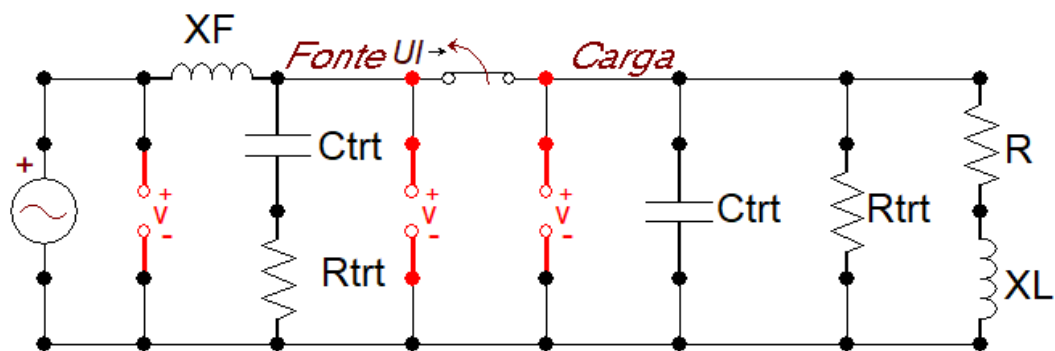


Figura 26 - Circuito série-paralelo

Fonte: Autor

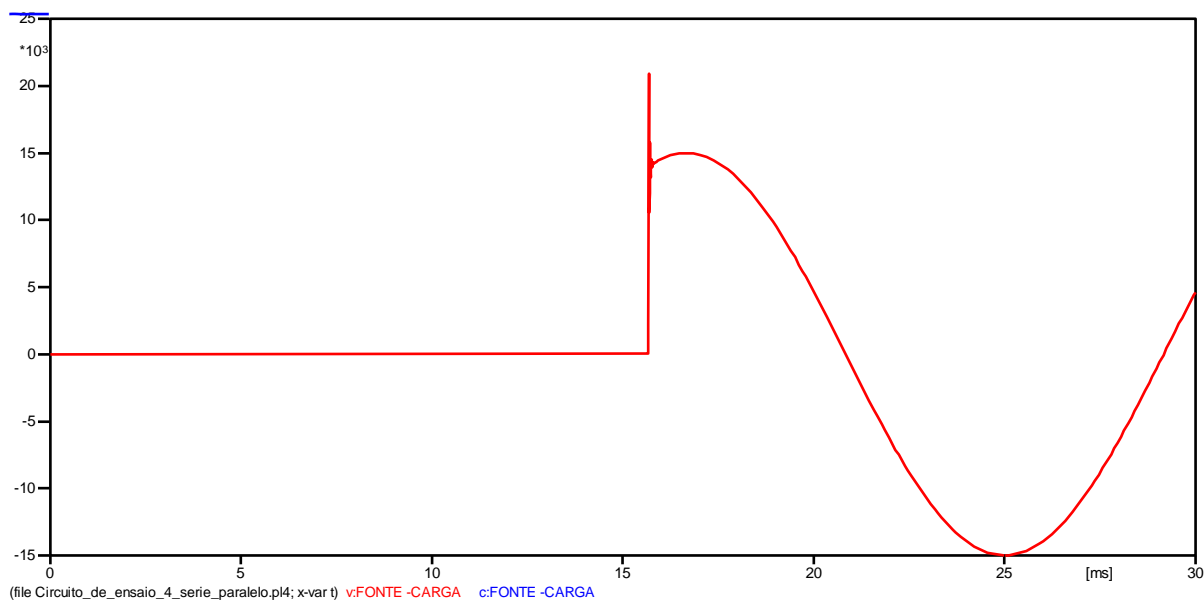


Figura 27 - Resposta do circuito série-paralelo

Fonte: Autor

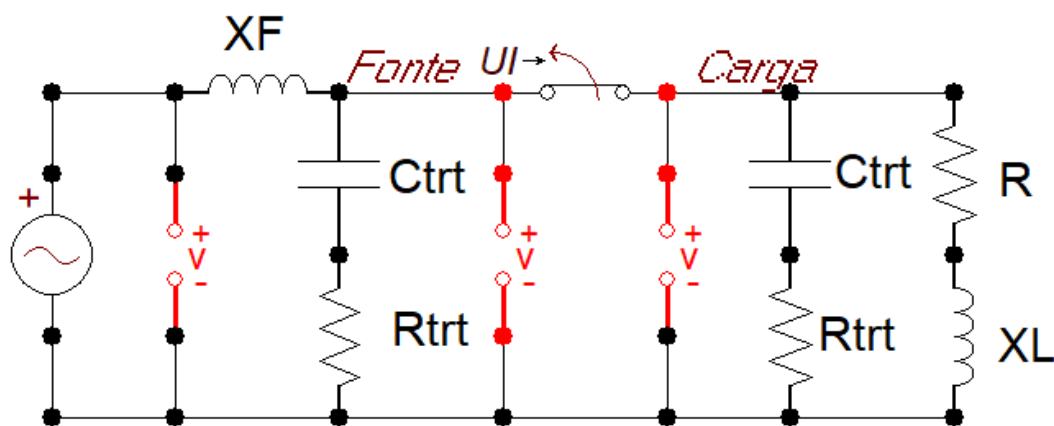


Figura 28 - Circuito série-série

Fonte: Autor

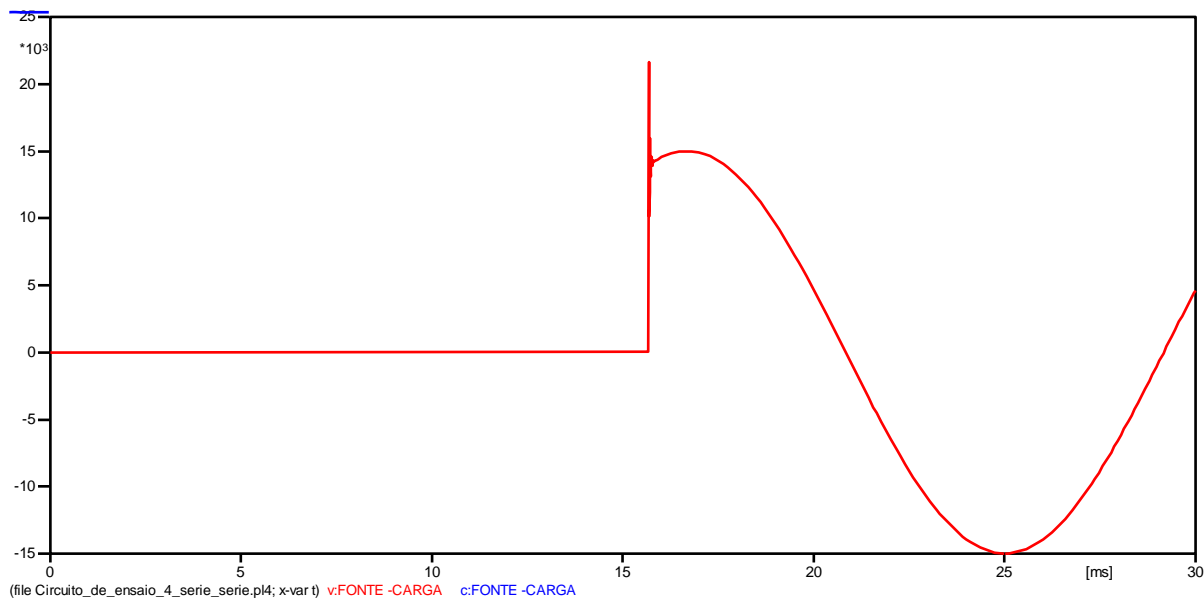


Figura 29 - Reposta do circuito série-série

Fonte: Autor

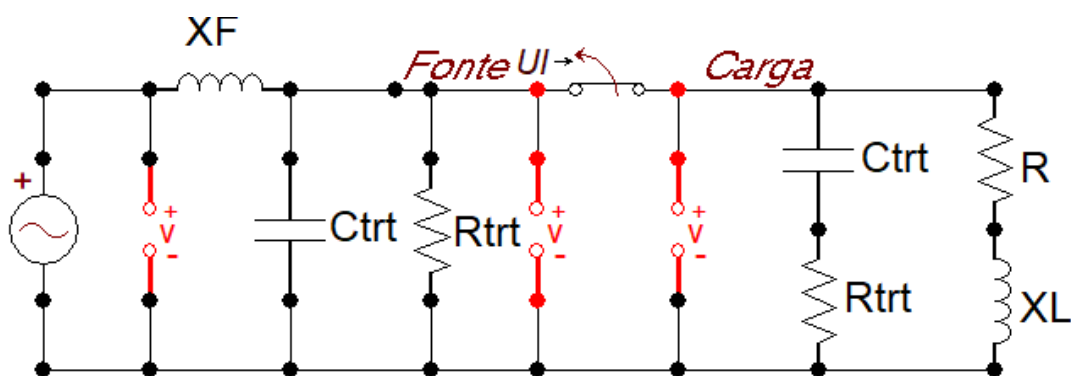


Figura 30 - Circuito paralelo-série

Fonte: Autor

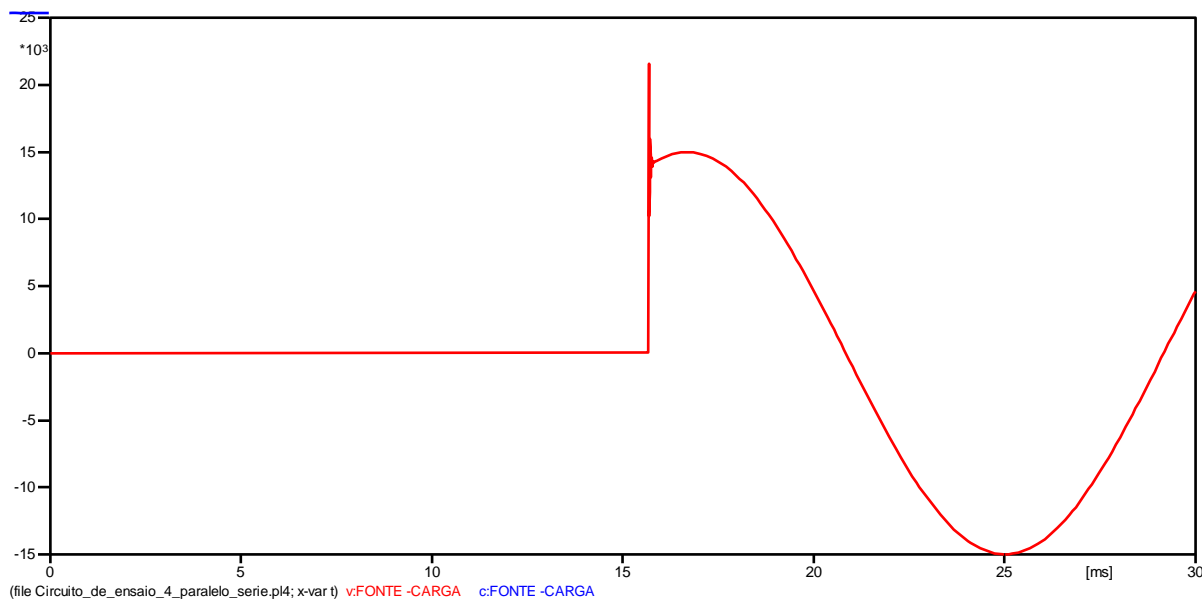


Figura 31 - Resposta do circuito paralelo-série

Fonte: Autor

Através destas simulações pode-se chegar aos resultados do fator de amplitude (f_a) e de t_3 que foi colocado na tabela 7.

Tabela 7 - Resultados das simulações

Circuito	Fator de Amplitude - f_a	Tempo de Pico - t_3 (μ s)
Paralelo-paralelo	1,3936	18
Série-paralelo	1,3937	18
Série-série	1,44	16
Paralelo-série	1,44	15

Fonte: Autor

Verifica-se que pelas simulações houve uma melhor resposta, de acordo com o que a norma ABNT define, para o t_3 quando o circuito do lado carga foi montado em paralelo, e uma melhor resposta, de acordo com o que a norma ABNT define, para o f_a quando o circuito do lado carga foi montado em série. E foi mostrado que a montagem do circuito do lado fonte não interfere muito nos resultados das simulações.

4 ESTUDO DE CASO

Após a abordagem matemática e modelagem elétrica teórica, tais cálculos, valores e modelos foram transpostos para um programa computacional (ATPDraw - *Electromagnetic Transients Program*) de modelagem de circuitos elétricos. Depois destas duas etapas, foram realizados um conjunto de ensaios práticos com aplicações reais de correntes em dispositivos fusíveis, que contribuirão para comparar os cálculos e simulações computacionais e ajudarão a refinar e dimensionar o circuito de controle da TRT e a comparação entre os cálculos com a aplicação do TRTômetro

4.1 Aplicação com Degrau Unitário

Para que se possa verificar o circuito montado para o ensaio do dispositivo fusível, utiliza-se um equipamento chamado TRTômetro, que tem como finalidade injetar uma corrente no circuito para assim verificar a resposta transitório do mesmo. O arranjo para esse teste pode ser visto na figura 32.



Figura 32 - Arranjo de ensaio para teste

Fonte: Autor

Os parâmetros do circuito usado para o teste foram os mais próximos possíveis dos calculados no capítulo 5 para o grupo 1, e os valores utilizados estão descritos a seguir:

- $X_{L_{Reatores}} = 1,75 \Omega$
- $X_{L_{TAP}} = 0,507 \Omega$
- $R = 0,2717 \Omega$
- $C = 555,2 \mu F$
- $R_{TRT} = 134,53 \Omega \rightarrow$ Paralelo
- $R_{TRT} = 72,48 \Omega \rightarrow$ Série

Através destes parâmetros, foi aplicado um degrau unitário no circuito onde se teve as seguintes respostas transitórias mostrada nas figuras a seguir, onde a figura 33 é para o circuito de TRT em paralelo e 34 é para o circuito TRT em série.

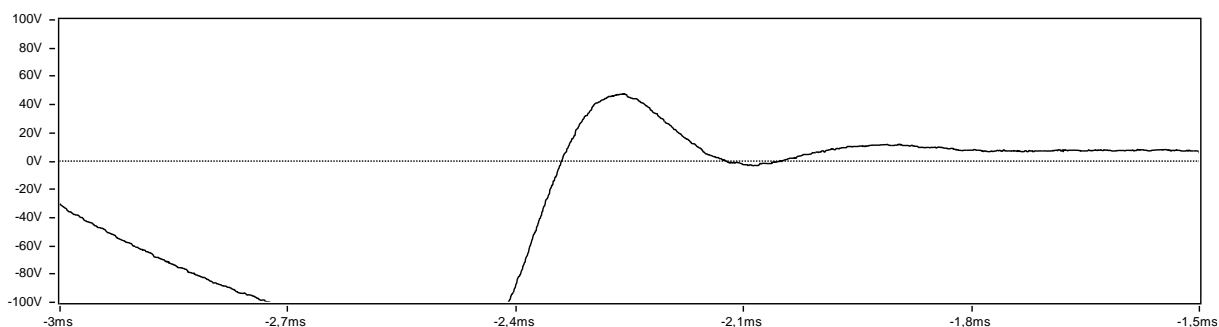


Figura 33 - Forma de onda da tensão

Fonte: Autor

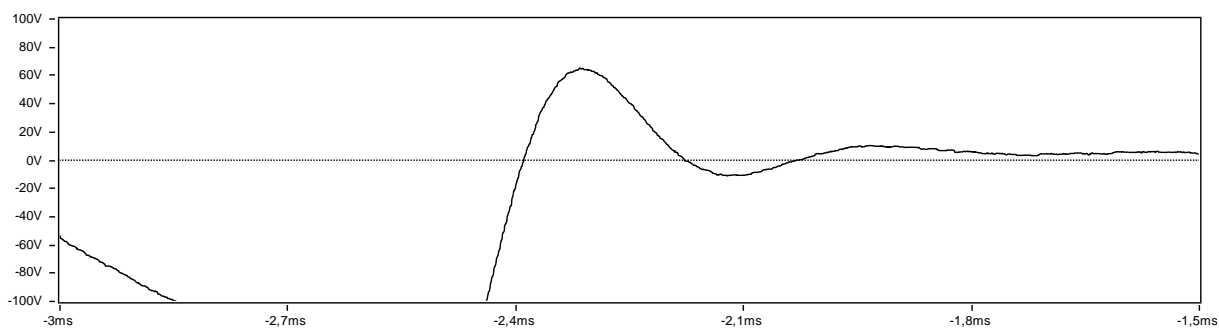


Figura 34 - Forma de onda da tensão

Fonte: Autor

Na aplicação com o circuito em paralelo teve um fator de amplitude de 1,39 e um tempo de pico de pico (t_3) de 189,7 μ s e na aplicação em série teve um fator de amplitude de 1,64 com um tempo de pico de 147 μ s. Através destas aplicações pode-se ter uma resposta transitória diferente da calculada provocada devido a resistências e reatâncias parasitas que não puderam ser mensuradas por estarem fora do banco de resistores e capacitores.

4.2 Análise Reversa

Fazendo a análise dos resultados, pode-se obter, fazendo os mesmos passos do dimensionamento do circuito, os reais valores do circuito. Por que por mais que se aproxime os valores calculados nos bancos de resistores e de capacitores, é existente a presença de resistências e capacitâncias parasitas provenientes do local onde é montado o circuito, com isso fazendo a variação da resposta da TRT.

Utilizando os valores de XL – Adotando que a existência de indutância parasitas é quase zero devido as correntes relativamente baixas – e de t_3 e f_a , pode-se chegar os reais valores do circuito que são descritos na tabela 8.

Tabela 8 - Reais valores do circuito

	t_3 (μ s)	f_a	C (η F)	R_{TRT} (Ω)
Paralelo	189,7	1,39	609,02	172,67
Série	147	1,64	365,71	454,86

Fonte: Autor

4.3 Aplicação com Dispositivo Fusível

Ouve-se a possibilidade de se ter uma aplicação com um dispositivo fusível no grupo 1 e analisar os resultados da TRT, onde esse dispositivo era de 36 kV / 3,5 kA. Pela análise feita no item 6.1, teve-se uma resposta mais próxima a norma no circuito da TRT em paralelo, assim todo o teste foi feito nesse circuito.

Os valores calculados para o circuito do grupo 1 foram:

- $X_{L_{Reatores}} = 8,9449 \Omega \rightarrow$ Reatores 3, 4, 5, 8, 11, 12 e 13
- $X_{L_{TAP}} = 1,3232 \Omega$
- $R = 1,24 \Omega$
- $C = 264,8 \eta F$
- $R_{TRT} = 505,92 \Omega \rightarrow$ Paralelo

Através destes parâmetros, foi aplicado um degrau unitário no circuito, se teve a seguinte resposta transitória mostrada na figura 37. Se teve uma resposta com um fa de 1,45 e um t_3 de 290 μs .

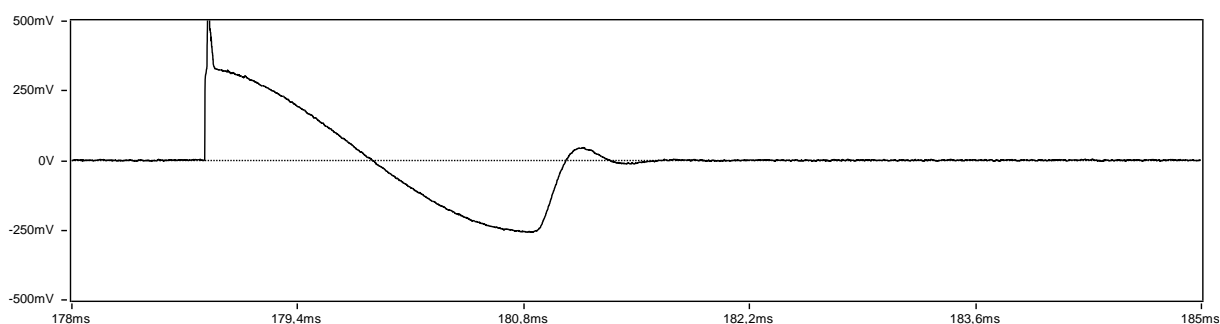


Figura 35 - Forma de onda da tensão

Fonte: Autor

Fazendo uma análise de como está o circuito através dessa resposta, se baseando nos mesmo cálculos para se poder dimensionar o circuito – descrito no capítulo 3 e 5 – chega-se à conclusão que no circuito, há na realidade, os seguintes valores: 312,85 ηF e 145,37 Ω . Se tem essa variação devido a capacitâncias parasitas e resistência que estão presentes fora do banco de resistências.

Partindo assim para o ensaio com os mesmos valores calculados, onde a resposta pode ser vista na figura 38, se teve uma resposta com um fa de 1,12 e um t_3 de 286,45 μs . Fazendo assim, uma análise reversa, conclui-se que se tem na realidade: 305,24 ηF e 334.21 Ω .

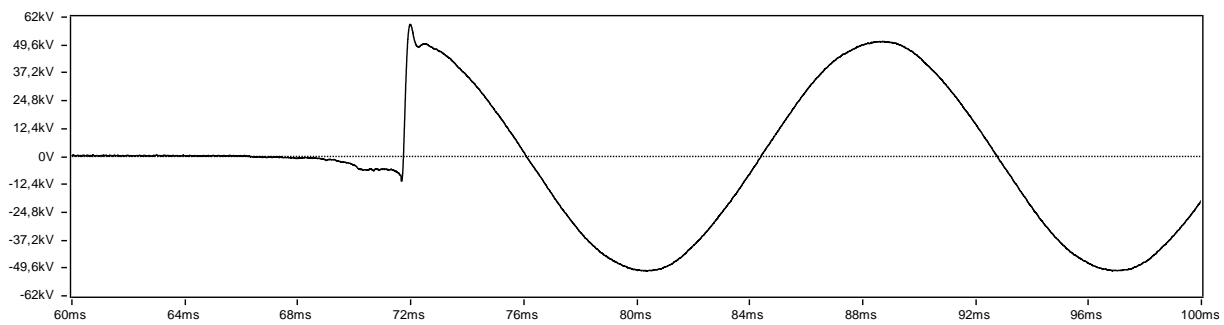


Figura 36 - Forma de onda da tensão

Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Pode-se concluir que pelos os cálculos chegam-se na mesma função de transferência entre os circuitos série e paralelo de cada grupo, com isso pode-se fazer uma verificação da resposta transitória do circuito através do Matlab aplicando um degrau unitário e uma simulação dos circuitos pelo ATPDraw. Porém pela simulação feita no software ATPDraw, teve um resultado mais satisfatório para o circuito paralelo nos grupos 1, 2 e 3, porém para o grupo 4, houve-se uma divergência dos resultados, mostrando que o arranjo com o circuito do lado carga em paralelo se tem uma resposta satisfatória com o pedido pela norma para o tempo de pico (t_3) e em série uma melhor resposta para o fator de amplitude (f_a).

Durante a aplicação em um circuito real com o gerador de degrau unitário, houve uma variação causada, possivelmente, devida a capacitâncias parasitas do circuito e do circuito do gerador de degrau unitário.

Com isso fica como propostas para trabalhos futuros:

- Mensurar essas capacitâncias parasitas e tabelar essas mesmas de acordo com o tamanho do circuito a ser montado, e realizar uma comparação com o ensaio real, pois devido a disponibilidade do laboratório não foi possível realizar esses testes;
- Quais ajustes para melhorar o circuito do grupo 4.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COMMISSION, I. E. **IEC 60282-1: High-voltage Fuses - Part 1: Current-limiting Fuses**. Geneva. 2009.
2. COMMISSION, I. E. **IEC 60282-2: High-voltage Fuses - Part 2: Explosion Fuses**. [S.l.]. 2008.
3. ENGINEERS, I. O. E. A. E. **C37.42: Specifications for High-voltage (>1000 V) Explosion-type Distribution-class Fuses, Fuse and Disconnecting Cut outs, Distribution Enclosed Single-pole Air Switches, Fuse Disconnecting Switches and Fuse Links and Accessories Used With These Devices**. New York. 2009.
4. ENGINEERS, I. O. E. A. E. **C37.40: Conditions and Definitions for High-voltage Fuses, Distribution Enclosed Single-pole Air Switches, Fuses Disconnecting Switches and Accessories**. New York. 2003.
5. ENGINEERS, I. O. E. A. E. **C37.41: Design Tests for High-voltage (>1000 V) Fuses, Fuse and Disconnecting Cutouts, Distribution Enclosed Single-pole Air Switches, Fuse Disconnecting Switches and Fuse Links and Accessories Used With These Devices**. New York. 2009.
6. TÉCNICAS, A. B. D. N. **NBR 7282: Dispositivos Fusíveis de Alta-tensão - Dispositivos Tipo Explosão - Requisitos e Métodos de Ensaio**. Rio de Janeiro. 2011.
7. CONSTRUNORMAS. Subestações – Dispositivos Fusíveis de Alta Tensão e Limitadores de Corrente. **Construnormas**. Disponível em: <<http://construnormas.pini.com.br/engenharia-instalacoes/instalacoes-eletricas/subestacao-dispositivos-fusiveis-de-alta-tensao-e-limitadores-de-341135-1.aspx>>. Acesso em: 1 Março 2018.
8. ELÉTRICA, W. Elo Fusível 10K 50mm. **WK Elétrica**. Disponível em: <<http://www.wkeletrica.com.br/loja/produto/elo-fusivel-10k-500mm>>. Acesso em: 1 março 2018.
9. ALMEIDA, M. A. D. D. **Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos**. Natal: [s.n.], 2000. 14 p.
10. ALVES, M. R. D. C. **A proteção da rede de distribuição contra sobrecorrentes**. Belo Horizonte: [s.n.], 2009. Disponível em:

<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgOpMAK/a-protecao-rede-distribuicao-contra-sobrecorrentes?part=3>>. Acesso em: 10 Abril 2018.

11. NILSSON, J. W.; RIDEL, S. A. **Circuitos Elétricos**. 8ª. ed. [S.l.]: Pearson, 2009.
12. OGATA, K. **Engenharia de Controle de Sistemas**. 5ª. ed. São Paulo: Pearson , 2010.
13. NISE, N. S. **Engenharia de Controle de Sistemas**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
14. TÉCNICAS, A. B. D. N. **NBR 8669: Dispositivos Fusíveis Limitadores de Corrente**. Rio de Janeiro. 1984.
15. CEPEL. **Procedimento PR/3002.11 Medição TRT**. Nova Iguaçu. 2014.
16. CEPEL. **Procedimento PR/3002.02: Ensaio de Verificação da Capacidade de Interrupção em Chaves Fusíveis de Distribuição**. Nova Iguaçu. 2012.
17. CEPEL. **Artigo C320-3002-002: Ensaio de Verificação da Capacidade de Interrupção em Chaves Fusíveis de Distribuição**. Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. Nova Iguaçu. 2004.
18. ALVES, R. D. O. **Tensão de Restabelecimento Transitória**. Belo Horizonte: Uiversidade de Minas Gerais, 2012.
19. BRAGA, I. N. Como Funcionam os Relés de Estado Sólido – ART651. **INSTITUTO NEWTON BRAGA**. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/4915-art651>>. Acesso em: 15 Março 2018.

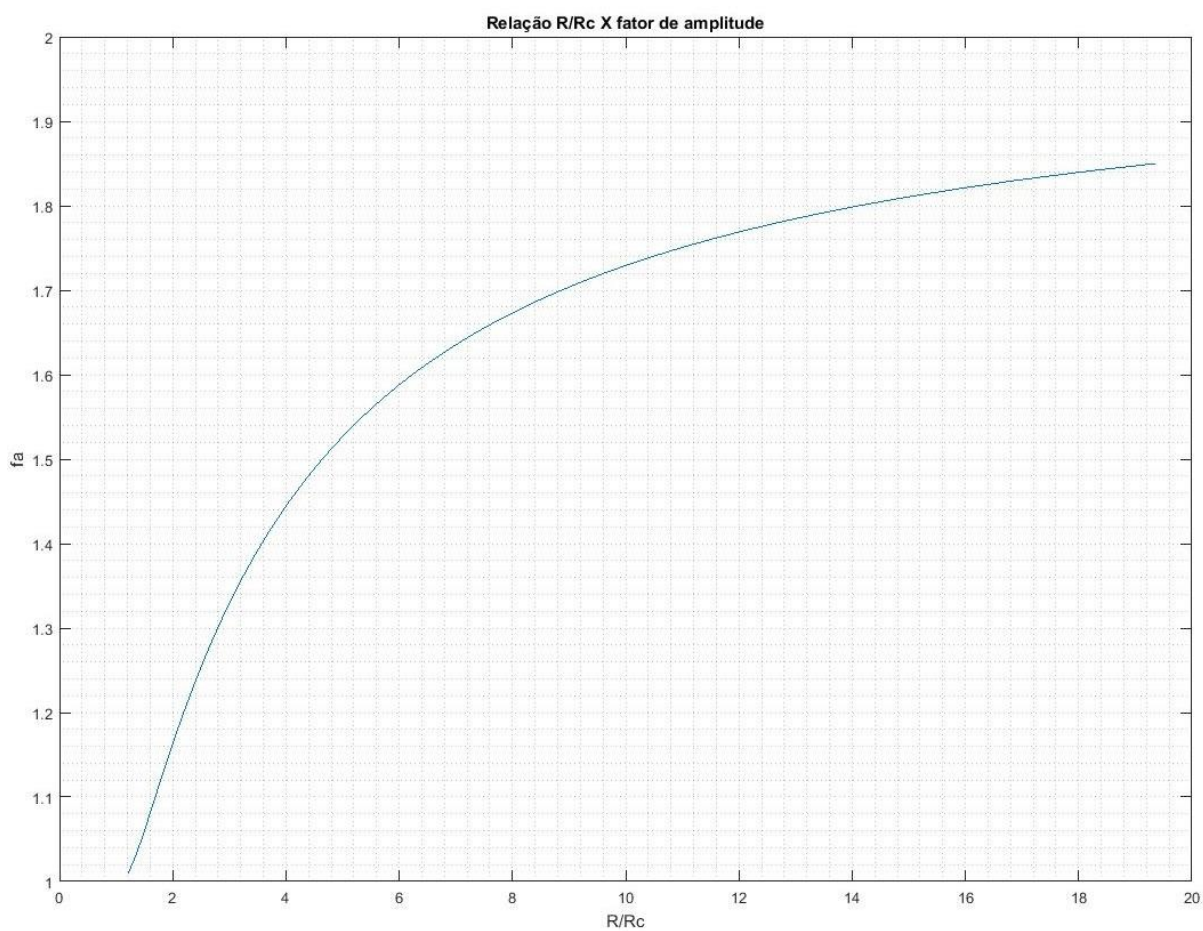
ANEXO I – Reatores

Reator Número	Reatância Ω	Tolerância %	BIL KV	I_Simétrica (1s) KA (cada 12 min)	I_Permanente A	I_Acidental KA (0,2s)
1	20	± 1	250	2	81	4,5
2	10	± 1	250	3,5	144	7,5
3	5	± 1	250	6	228	12
4	2,5	± 1	250	9	242	16,5
5	1,25	± 2	250	13,5	537	23
6	0,64	± 2	250	19	755	34
7	0,32	± 2	250	28	1133	46
8	0,16	± 2	250	40	1523	66
9	0,08	± 2	200	53	2168	88
10	0,04	± 2	125	55	2115	91
11	0,02	± 4	75	55	2127	100
12	0,01	± 6	50	55	2154	104
13	0,005	± 8	20	55	2778	107
14	0,002	± 25	15	55	3002	108
15	0,001	± 30	10	55	3600	108

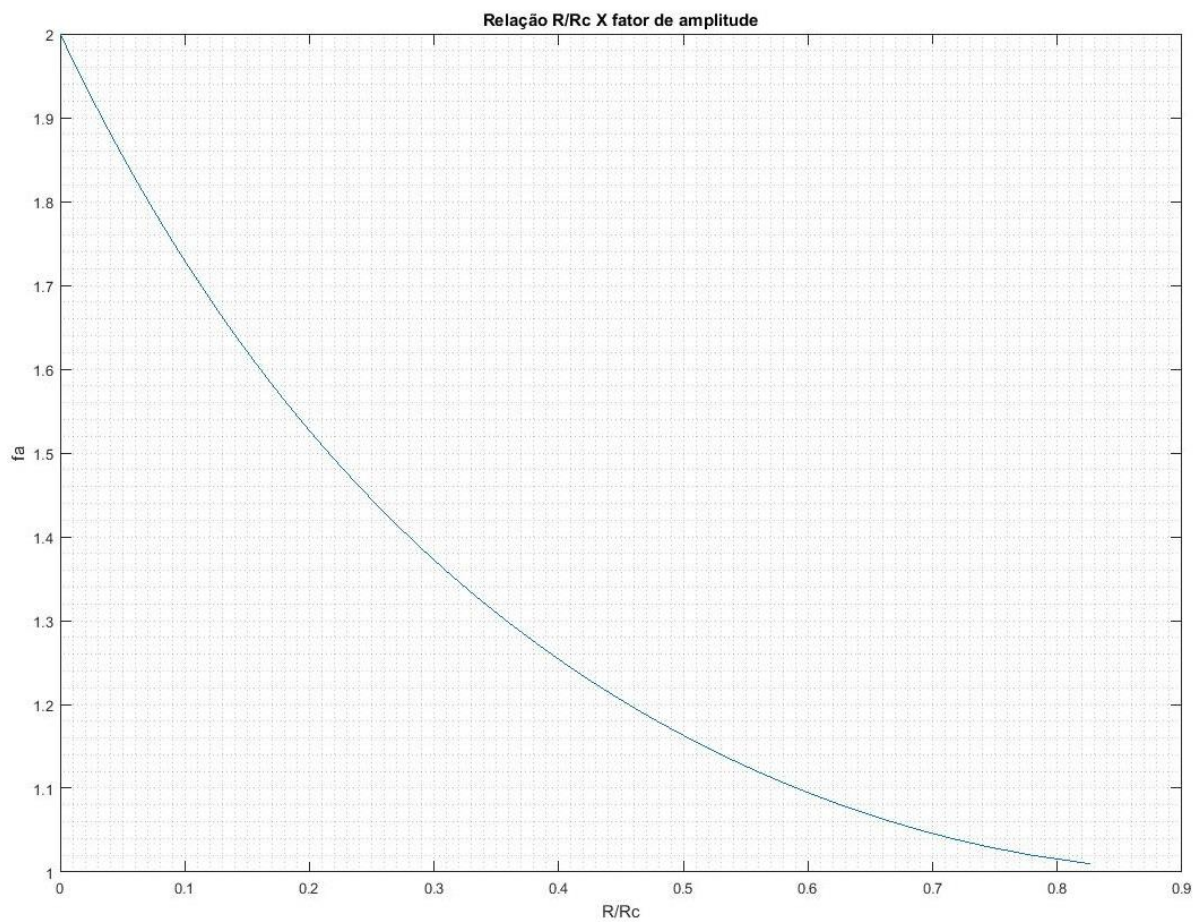
ANEXO II – Reatores de Carga

Reator Número	Reatância Ω	Tolerância %	BIL KV	I_Simétrica (1s) KA (cada 12 min)	I_Permanente A	I_Acidental KA (0,2s)
1	250	± 2	250	0,14	0,14	0,248
2	125	± 1	250	0,28	0,028	0,63
3	64	± 1	250	0,55	0,056	1,23
4	32	± 1	250	1,1	0,11	2,46
5	16	± 1	200	2	0,2	4,47
6	8	± 1	150	2	0,2	4,47
7	4	± 1	100	2	0,2	4,47
8	2	± 1	50	2	0,2	4,47
9	1	± 1	25	2	0,2	4,47
10	0,50	± 2	20	2	0,2	4,47
11	0,25	± 2	20	2	0,2	4,47

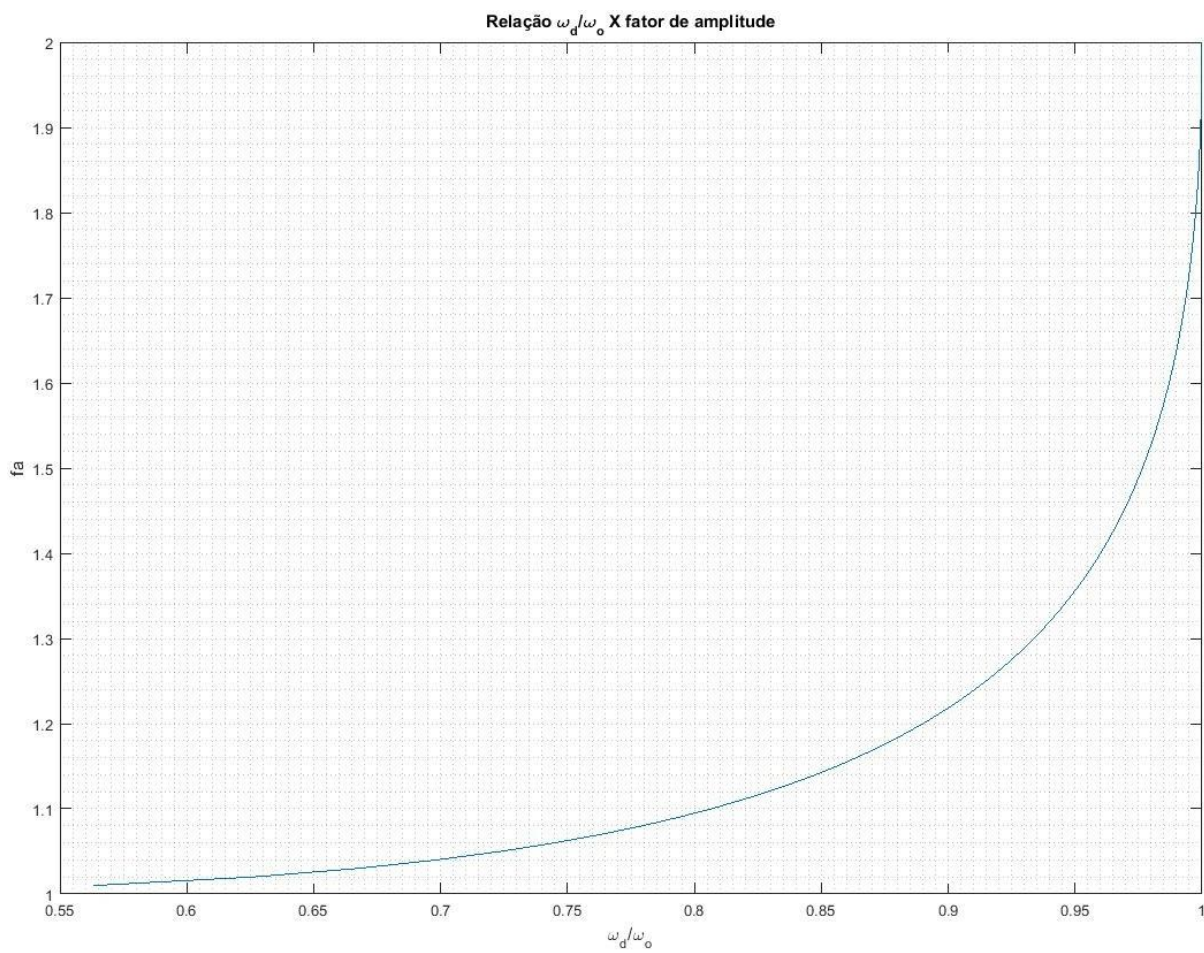
Anexo III – Regulação em Paralelo



Anexo IV – Regulação em Série



Anexo V – Regulação da Frequência Amortecida



Anexo VI – Programação para Cálculo Automático do Circuito de Ensaio no MatLab

```

%Inicio
clc
clear all

%Dados do equipamento
disp('Cálculo dos parametros do ensaio de Chave Fusível')
Vfurnas=input('\nEntre com o valor da tensão \nde furnas (KV): ')*10^(3);
%Tensão de Furnas
Vcc=input('\nEntre com o valor da tensão do \nobjeto de teste (KV):
')*10^(3);          %Tensão nominal do OT
Icc=input('\nEntre com o valor da corrente do \nobjeto de teste (KA):
')*10^(3);          %Corrente nominal do OT

%TRAFO
%Tensão de Referência
Vref=Vcc*138000/Vfurnas;
fprintf('\nSelecionar o TAP mais próximo de %g kV',Vref)
%Inerentes dos circuito
Zlinha=input('\nInsira o valor das inerentes do \ncircuito de
acordo com o TAP do \ntransformados a ser utilizado: ')*i;

%Fator de amortecimento
fa=input('\nEntre com o valor do fator de amplitude necessário para os
grupo 1 a 3: '); %Fator de Amplitude da TRT grupos 1 a 3
fa4=input('\nEntre com o valor do fator de amplitude necessário para o
grupo 4: '); %Fator de Amplitude da TRT grupo 4
zeta=-log(fa-1)/sqrt(pi^(2)+log(fa-1)^(2));
zeta4=-log(fa4-1)/sqrt(pi^(2)+log(fa4-1)^(2));

%Ajuste da Ferquencia
t3=input('\nEntre com o valor do tempo de pico (t3) para o grupo 1 ao 3 em
us: ')*10^(-6);
t34=input('\nEntre com o valor do tempo de pico (t3) para o grupo 4 em us:
')*10^(-6);
fd=pi/(2*pi*t3);
fd4=pi/(2*pi*t34);

%Valores tabelados
if Vcc==7.2*10^3
    FP=0.12; FP2=0.60;
elseif Vcc==15*10^3
    FP=0.12; FP2=0.40;
elseif Vcc==24.2*10^3
    FP=0.08; FP2=0.40;
elseif Vcc==36.2*10^3
    FP=0.07; FP2=0.25;
else
    fprintf('\nVALORES NÃO COMPATIVELIS COM A NORMA');
end

%Ajuste de frequência
fo=fd/sqrt(1-zeta^(2));
fo2=fd4/sqrt(1-zeta4^(2));

```

```

%Tabela de Reatores
%Fonte - 25~0.001 - 15 reatores
    rf1=20; rf2=10; rf3=5; rf4=2.5; rf5=1.25; rf6=0.64; rf7=0.32; rf8=0.16;
    rf9=0.08; rf10=0.04; rf11=0.02; rf12=0.01; rf13=0.005; rf14=0.002;
    rf15=0.001;
%Carga - 250~0.25 - 11 reatores
    rcarga1=250; rcarga2=125; rcarga3=64; rcarga4=32; rcarga5=16;
    rcarga6=8;
    rcarga7=4; rcarga8=2; rcarga9=1; rcarga10=0.5; rcarga11=0.25;

%GRUPOS DE ENSAIOS

%GRUPO #1
%Cálculo
    fprintf('\n');
    disp('-Grupo de ensaio 1')
    Zcal=Vcc*(FP+sin(acos(FP))*i)/Icc;
    XL=imag(Zcal-Zlinha);
%Escolha dos Reatores
    disp('Utilizar reatores: ')
if XL>=rf1
        disp('#1'), B=XL-rf1;
else
        B=XL;
end
if B>=rf2
        disp('#2'), C=B-rf2;
else
        C=B;
end
if C>=rf3
        disp('#3'), D=C-rf3;
else
        D=C;
end
if D>=rf4
        disp('#4'), E=D-rf4;
else
        E=D;
end
if E>=rf5
        disp('#5'), F=E-rf5;
else
        F=E;
end
if F>=rf6
        disp('#6'), G=F-rf6;
else
        G=F;
end
if G>=rf7
        disp('#7'), H=G-rf7;
else
        H=G;
end
if H>=rf8
        disp('#8'), I=H-rf8;
else
        I=H;
end
if I>=rf9

```

```

disp('#9'), J=I-rf9;
else
    J=I;
end
if J>=rf10
    disp('#10'), K=J-rf10;
else
    K=J;
end
if K>=rf11
    disp('#11'), L=K-rf11;
else
    L=K;
end
if L>=rf12
    disp('#12'), M=L-rf12;
else
    M=L;
end
if M>=rf13
    disp('#13'), N=M-rf13;
else
    N=M;
end
if N>=rf14
    disp('#14'), O=N-rf14;
else
    O=N;
end
if O>=rf15
    disp('#15'), P=O-rf15;
else
    P=N;
end
Zreal=XL-P;
%Cálculo TRT paralelo
L=imag(Zcal)/(2*pi*60);
C=((2*pi*fo)^(2)*L)^(-1);
Rtrt=0.5*sqrt(L/C)/zeta;
%Resultados
fprintf('Os valores calculados para o circuito são:\nR=%g ohms
\nC=%g F \nRtrt=%g ohms \n\n ',real(Zcal),C,Rtrt)

%GRUPO #2
%Cálculo
disp('-Grupo de ensaio 2')
Zcal=Vcc*(FP+sin(acos(FP))*i)/(0.75*Icc);
XL2=imag(Zcal-Zlinha);
%Escolha dos Reatores
disp('Utilizar reatores: ')
if XL>=rf1
    disp('#1'), B=XL-rf1;
else
    B=XL;
end
if B>=rf2
    disp('#2'), C=B-rf2;
else
    C=B;
end
if C>=rf3

```

```

else
    disp('#3'), D=C-rf3;
end
if D>=rf4
    D=C;
else
    disp('#4'), E=D-rf4;
end
if E>=rf5
    E=D;
else
    disp('#5'), F=E-rf5;
end
if F>=rf6
    F=E;
else
    disp('#6'), G=F-rf6;
end
if G>=rf7
    G=F;
else
    disp('#7'), H=G-rf7;
end
if H>=rf8
    H=G;
else
    disp('#8'), I=H-rf8;
end
if I>=rf9
    I=H;
else
    disp('#9'), J=I-rf9;
end
if J>=rf10
    J=I;
else
    disp('#10'), K=J-rf10;
end
if K>=rf11
    K=J;
else
    disp('#11'), L=K-rf11;
end
if L>=rf12
    L=K;
else
    disp('#12'), M=L-rf12;
end
if M>=rf13
    M=L;
else
    disp('#13'), N=M-rf13;
end
if N>=rf14
    N=M;
else
    disp('#14'), O=N-rf14;
end
if O>=rf15
    O=N;
else
    disp('#15'), P=O-rf15;
end

```

```

else
    P=N;
end
    Zreal=XL-P;
%Cálculo TRT
    L=imag(Zcal)/(2*pi*60);
    C=((2*pi*fo)^(2)*L)^(-1);
    Rc=0.5*sqrt(L/C)/zeta;
%Resultados
    fprintf('Os valores calculados para o circuito são:\nR=%g ohms
\nC=%g F \nRtrt=%g ohms \n\n ',real(Zcal),C,Rtrt)

%GRUPO #3
%Cálculo
disp('-Grupo de ensaio 3')
Zcal=Vcc*(FP+sin(acos(FP))*i)/(0.25*Icc);
XL=imag(Zcal-Zlinha);
%Escolha dos Reatores
    disp('Utilizar reatores: ')
if XL>=rf1
    disp('#1'), B=XL-rf1;
else
    B=XL;
end
if B>=rf2
    disp('#2'), C=B-rf2;
else
    C=B;
end
if C>=rf3
    disp('#3'), D=C-rf3;
else
    D=C;
end
if D>=rf4
    disp('#4'), E=D-rf4;
else
    E=D;
end
if E>=rf5
    disp('#5'), F=E-rf5;
else
    F=E;
end
if F>=rf6
    disp('#6'), G=F-rf6;
else
    G=F;
end
if G>=rf7
    disp('#7'), H=G-rf7;
else
    H=G;
end
if H>=rf8
    disp('#8'), I=H-rf8;
else
    I=H;
end
if I>=rf9
    disp('#9'), J=I-rf9;

```

```

else
    J=I;
end
if J>=rf10
    disp('#10'), K=J-rf10;
else
    K=J;
end
if K>=rf11
    disp('#11'), L=K-rf11;
else
    L=K;
end
if L>=rf12
    disp('#12'), M=L-rf12;
else
    M=L;
end
if M>=rf13
    disp('#13'), N=M-rf13;
else
    N=M;
end
if N>=rf14
    disp('#14'), O=N-rf14;
else
    O=N;
end
if O>=rf15
    disp('#15'), P=O-rf15;
else
    P=N;
end
    Zreal=XL-P;
%Cálculo TRT
L=imag(Zcal)/(2*pi*60);
C=((2*pi*fo)^(2)*L)^(-1);
Rtrt=0.5*sqrt(L/C)/zeta;
%Resultados
fprintf('Os valores calculados para o circuito são:\nR=%g ohms \nC=%g F
\nRtrt=%g ohms \n\n ',real(Zcal),C,Rtrt)

%GRUPO #4
disp('-Grupo de ensaio 4')
Zcal=Vcc*(FP2+sin(acos(FP2))*i)/(450);
%Circuito Fonte
%Cáculo
    Sf=Vfurnas*900;
    Imax=Sf/Vcc;
    Xcc=Vcc/Imax;
    XL_fonte=Xcc-imag(Zlinha);
    %Potência máxima na linha
    %Corrente máxima no circuito
    %Impedância de limite
    %Valor dos reatores
%Escolha dos Reatores
    disp('Utilizar reatores: ')
if XL_fonte>=rf1
    disp('#1'), B=XL_fonte-rf1;
else
    B=XL_fonte;
end
if B>=rf2
    disp('#2'), C=B-rf2;
else

```

```

end
if C>=rf3
    C=B;
    disp('#3'), D=C-rf3;
else
    D=C;
end
if D>=rf4
    disp('#4'), E=D-rf4;
else
    E=D;
end
if E>=rf5
    disp('#5'), F=E-rf5;
else
    F=E;
end
if F>=rf6
    disp('#6'), G=F-rf6;
else
    G=F;
end
if G>=rf7
    disp('#7'), H=G-rf7;
else
    H=G;
end
if H>=rf8
    disp('#8'), I=H-rf8;
else
    I=H;
end
if I>=rf9
    disp('#9'), J=I-rf9;
else
    J=I;
end
if J>=rf10
    disp('#10'), K=J-rf10;
else
    K=J;
end
if K>=rf11
    disp('#11'), L=K-rf11;
else
    L=K;
end
if L>=rf12
    disp('#12'), M=L-rf12;
else
    M=L;
end
if M>=rf13
    disp('#13'), N=M-rf13;
else
    N=M;
end
if N>=rf14
    disp('#14'), O=N-rf14;
else
    O=N;
end

```

```

end
if O>=rf15
    disp('#15'), P=O-rf15;
else
    P=N;
end
Zreal=XL_fonte-P;
%Cálculo TRT Fonte série
Lfonte=(Xcc)/(2*pi*60);
Cfonte=((2*pi*fo)^(2)*Lfonte)^(-1);
Rtrt_fonte=2*zeta*sqrt(Lfonte/Cfonte);

%Circuito Carga
%Cálculo
XL4=imag(Zcal-Zlinha);
XL_carga=(XL4-Xcc);
%Escolha dos Reatores
disp('Utilizar reatores (lado da carga): ')
if XL_carga>=rcarga1
    disp('#1'), B=XL_carga-rcarga1;
else
    B=XL_carga;
end
if B>=rcarga2
    disp('#2'), C=B-rcarga2;
else
    C=B;
end
if C>=rcarga3
    disp('#3'), D=C-rcarga3;
else
    D=C;
end
if D>=rcarga4
    disp('#4'), E=D-rcarga4;
else
    E=D;
end
if E>=rcarga5
    disp('#5'), F=E-rcarga5;
else
    F=E;
end
if F>=rcarga6
    disp('#6'), G=F-rcarga6;
else
    G=F;
end
if G>=rcarga7
    disp('#7'), H=G-rcarga7;
else
    H=G;
end
if H>=rcarga8
    disp('#8'), I=H-rcarga8;
else
    I=H;
end
if I>=rcarga9
    disp('#9'), J=I-rcarga9;
else

```



```

                                J=I;
end
if J>=rcarga10
                                disp('#10'), K=J-rcarga10;
else
                                K=J;
end
if K>=rcarga11
                                disp('#11'), L=K-rcarga11;
else
                                L=K;
end
%Cálculo TRT Carga paralelo
                                Lcarga=XL_carga/(2*pi*60);
                                Ccarga=((2*pi*fo2)^(2)*Lcarga)^(-1);
                                Rtrt_carga=0.5*sqrt(Lcarga/Ccarga)/zeta4;
%Resultados
                                fprintf('Os valores calculados para o circuito são: \n *Fonte
\n-Reator=%d \n-C=%d F \n-Rtrt=%d ohms \n *Carga \n-Reator=%d \n-R=%d ohms
\n-C=%d F \n-Rtrt=%d ohms
\n\n',Xcc,Cfonte,Rtrt_fonte,XL_carga,real(Zcal),Ccarga,Rtrt_carga)

```

Eu, ALEXANDRE NEVES DA SILVA Chefe do Departamento de Laboratórios de Adrianópolis – DLA do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, matrícula 0476, venho por meio deste, autorizar o aluno Daniel dos Santos Alves a utilizar em citações e descrições, os métodos e processos utilizados nesta empresa, que estejam vinculados ao tema a ser abordado em sua Monografia sobre “ANÁLISE DE TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIO” desde que o aluno, assegure ao final da pesquisa, encaminhar um volume do trabalho com as abordagens e conclusões do referido Trabalho Acadêmico.



ALEXANDRE NEVES DA SILVA - 0476

Alexandre Neves da Silva
Chefe do Departamento de
Laboratórios de Adrianópolis
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL
Telefones: 55(0)212666-6273 / 2666-5000
neves@cepel.br

Nova Iguaçu, 2018.