

DISSSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº. 140

**ATERRAMENTO DO NEUTRO DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO  
BRASILEIROS: UMA PROPOSTA DE MUDANÇA**

Paulo Fernandes Costa

DATA DA DEFESA: 18.12.95

**ATERRAMENTO DO NEUTRO DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO  
BRASILEIROS: UMA PROPOSTA DE MUDANÇA**

*Paulo Fernandes Costa*

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 18 de dezembro de 1995.

Por:

*José Osvaldo Saldanha Paulino*  
Dr. Prof. PPGEE/UFMG - Orientador

*Gláudio Costa de Miranda*  
Dr. Prof. PPGEE/UFMG

*Hugo Luiz Sepúlveda*  
Titular Prof. EE/UFMG

*Wallace do Couto Boaventura*  
Mestre Prof. DEE/UFMG

*Aurio Gilberto Falcone*  
Titular Prof. USP

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

**ATERRAMENTO DO NEUTRO DOS SISTEMAS DE  
DISTRIBUIÇÃO BRASILEIROS:  
UMA PROPOSTA DE MUDANÇA**

Autor: Paulo Fernandes Costa

Orientador: Prof. José Osvaldo Saldanha Paulino

Belo Horizonte - 1995

“Tende em vós o mesmo sentimento que houve também em Cristo Jesus, pois Ele subsistindo em forma de Deus não julgou por usurpação o ser igual a Deus. Antes a si mesmo se esvaziou, assumindo a forma de servo, tornando-se em semelhança de homem, e, reconhecido em figura humana. A si mesmo se humilhou, tornando-se obediente até a morte, e morte de cruz. Pelo que Deus o exaltou sobremaneira, e lhe deu um nome que está acima de todo nome, para que diante do nome de Jesus se dobre todo joelho, nos céus, na terra e debaixo da terra; e toda língua confesse que Jesus Cristo é Senhor, para a glória de Deus Pai”.

Filipenses 2:5-11

Bíblia Sagrada

## Agradecimentos

Tenho profunda consciência de que esta é uma tese comunitária, pois foi graças a centenas de pessoas que ela tornou-se possível.

A meus pais (in memoriam), que, embora com pequena instrução secular, possuíam uma profunda sabedoria a ponto de investir todos os seus bens na educação dos filhos.

Aos meus onze irmãos, companheiros de lutas da vida, especialmente minha irmã mais velha Branca, e o irmão mais velho José Maria, que assumiram desde jovens, com grandes sacrifícios pessoais a paternidade dos demais irmãos.

Ao meu irmão João Azevedo Costa (in memoriam), grande engenheiro, exemplo de trabalho e de fé.

Ao Governo Brasileiro e a Universidade Federal de Minas Gerais que me forneceram ensino gratuito de excelente qualidade, em quase toda a minha trajetória estudantil.

Aos meus professores, desde a minha professora rural Almezinda, que me introduziu nas primeiras letras, incluindo-se sem exceções, todos os professores dos cursos de graduação e pós-graduação em engenharia Elétrica.

A minha querida esposa Lúcia Estela, e aos meus filhos amados Ana Paula, Laura, Cláudia, Adriana e Timóteo, pelo carinho e compreensão.

Ao meu professor orientador e companheiro José Osvaldo, pela competência, paciência, exemplo e orientações.

Aos meus sócios José Eustáquio Borel, João Luiz e Ilden Marques, pelo apoio, participação e incentivo.

A Marcia e a Jacqueline pela datilografia, e ao Júlio pelo serviço de CAD e aos demais colegas da Senior.

Ao Professor Hugo Luiz Sepúlveda, amigo de longa data, que me ensinou o gosto pelos livros e pela biblioteca, e ao Professor Thomaz Taveira que me ensinou o gosto pela engenharia elétrica.

Aos demais amigos e a todos os esquecidos que têm sido humilhados pela ignorância, fome e miséria deste país, dedico esta tese.

## RESUMO DA TESE

Esta dissertação foi desenvolvida com o objetivo de estudar aspectos do aterramento do neutro dos sistemas elétricos, com destaque para os sistemas de distribuição.

Procurou-se também, abordar os sistemas de distribuição brasileiros quanto ao seu desempenho e mostrar que é possível minimizar seus desligamentos, alterando-se o método de aterramento do neutro.

Dentro desta abordagem o trabalho sugere modificações na forma de aterramento do neutro dos sistemas de distribuição brasileiros, passando-o de solidamente ou diretamente aterrado, método atualmente utilizado, para aterramento por meio de Bobina Ressonante, também denominada Bobina de Petersen.

Inicialmente é feita uma revisão dos métodos de aterramento do neutro. Segue-se então uma análise de desempenho dos sistemas de distribuição brasileiros. Finalmente são destacadas as vantagens da utilização da Bobina de Petersen, sendo apresentado um caso prático de sua aplicação.

## ABSTRACT

The present work was set to study neutral grounding specially in the distribution systems.

The aim was to make an assessment of the Brazilian distribution system performance and show that it is possible to minimize their outages, by introducing a new method of neutral earthing.

The paper suggests changes in the neutral grounding, from the solid or direct earthed method that has been widely adopted, to the resonant or Petersen coil earthing.

Initially a review of the neutral grounding system is made. That is followed by an analysis of the distribution line lightning performance in Brazil. Finally, it is pointed out the advantages of the Petersen coil application.

CAPÍTULO 1 ..... INTRODUÇÃO ..... 7

CAPÍTULO 2 ..... IMPORTÂNCIA DO ATERRAMENTO DO NEUTRO NOS  
SISTEMAS ELÉTRICOS EM GERAL: MÉTODOS DE  
ATERRAMENTO - DEFINIÇÕES - CONCEITOS -  
VANTAGENS E DESVANTAGENS ..... 11

CAPÍTULO 3 ..... ATERRAMENTO DO NEUTRO DOS SISTEMAS DE  
DISTRIBUIÇÃO ..... 71

CAPÍTULO 4 ..... ATERRAMENTO DO NEUTRO DOS SISTEMAS  
DE DISTRIBUIÇÃO BRASILEIROS -  
CARACTERÍSTICAS BÁSICAS E INCONVENIENTES ..... 84

CAPÍTULO 5 ..... POSSIBILIDADES E VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO  
DA BOBINA DE PETERSEN ..... 105

CAPÍTULO 6 ..... RESULTADOS: UM EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO  
DA BOBINA DE PETERSEN ..... 124

CAPÍTULO 7 ..... CONCLUSÃO - PROPOSTAS DE CONTINUIDADE  
DO TRABALHO ..... 131

CAPÍTULO 8 ..... BIBLIOGRAFIA ..... 133

SUMÁRIO



## INTRODUÇÃO

Sabe-se que a paralisação intempestiva dos sistemas elétricos de distribuição constitui-se em evento de consequências cada vez mais graves face principalmente a fenomenal escalada da informática e a presença de equipamentos eletrônicos sensíveis em geral, alimentados através destas redes. A necessidade de alimentar adequadamente estes equipamentos gerou o conceito recente de "QUALIDADE DE ENERGIA" (POWER QUALITY) que, dentre outros aspectos contempla aquele de se obter uma redução drástica nos desligamentos da rede.

No Brasil, praticamente a totalidade dos sistemas de distribuição são aéreos e possuem o neutro diretamente aterrado (ligação à terra sem nenhuma impedância intencional).

Neste caso, observa-se que as descargas atmosféricas diretas e principalmente indiretas, são responsáveis por cerca de 30% dos desligamentos da rede. O mecanismo é bem conhecido.

Uma vez que as descargas atmosféricas provocam sobretensões impulsivas nos isoladores acima do valor suportável, ocorre em geral um arco de fase para terra. Este arco fornece uma via de escoamento para a corrente de frequência industrial do sistema, de tal forma que fica caracterizado um curto fase terra, que obriga a operação do sistema de proteção com a consequente abertura do disjuntor do circuito.

De fato este curto pode ocorrer no seu valor máximo (curto metálico de fase para neutro) ou com valores bem inferiores a corrente nominal da rede, no denominado "Curto de Alta Impedância". Devido a complexidade dos fenômenos envolvidos neste curto circuito (presença de ruídos e harmônicos) e as particularidades das redes com neutro diretamente aterrado, verifica-se que, apesar dos sistemas de distribuição com o neutro diretamente aterrado apresentarem vantagens (como eliminação de sobretensões transitórias, possibilidade de se obter sensibilidade e seletividade para curtos fase-terra dentro de certa faixa de valor de curto fase-terra) eles apresentam também desvantagens consideradas graves.

Um outro aspecto relevante é que nos sistemas com neutro diretamente aterrado, pode ocorrer intensa variação no valor do curto fase-terra.

Nesta situação, os curtos fase-terra provocam significantes avarias na rede telefônica, obrigando a adoção de soluções muito onerosas, como, dentre outras, a isolação da rede telefônica, e o emprego de protetores de surto de alta capacidade.

Um outro grave inconveniente do nosso atual sistema de distribuição provem de que os postes das suas linhas aéreas são compartilhados pelo sistema de telefonia.

Segue-se então uma tentativa de religamento, que embora na maioria das vezes possa ser coroada de sucesso, não evita a paralisção temporária do circuito, com os seus inconvenientes.

No exterior existem sistemas de distribuição, com o neutro aterrado por meio de resistor de baixo valor (França, Espanha), isolado (Japão, Finlândia, Áustria), e aterrado com bobina de Petersen (Alemanha, Suécia, Rússia). Em alguns destes países convivem mais de um sistema.

Portanto, é pertinente (e diríamos até vigente) que sejam estudadas novas formas de se aterrar o neutro dos sistemas de distribuição brasileiros, explorando as características peculiares de nosso país, e adotando-se novas soluções que permitam a melhoria considerável no seu desempenho.

Em 1981 este autor tomou conhecimento do programa de pesquisa visando a melhoria do desempenho das redes de distribuição da África do Sul, país este assolado, como o nosso, por elevado número de descargas atmosféricas.

Fornecemos então ao professor José Osvaldo, orientador desta tese, uma cópia de um dos artigos escritos pela equipe de pesquisa da África do Sul.

À partir deste artigo, surgiu na U.F.M.G. um vivo interesse na pesquisa a respeito do desempenho das linhas de transmissão (e de distribuição em especial) face as descargas atmosféricas.

Foi criado um programa de pesquisa e convênios com a CEMIG que resultaram em inúmeros trabalhos e teses.

Nesta dissertação são enfocados aspectos gerais do aterramento do neutro dos sistemas elétricos e discutidos os inconvenientes do aterramento do neutro dos sistemas de distribuição brasileiros, sendo proposta sua modificação, utilizando-se a Bobina de Petersen.

Nossa tese é a de que, com os recursos técnicos atuais, o emprego da Bobina de Petersen pode solucionar, a custos menores do que a solução anterior, muitos dos inconvenientes das redes de distribuição brasileiras, principalmente aqueles ligados ao desempenho face as descargas atmosféricas.

A solução de aumento da T.S.I. das estruturas provou ser uma boa solução mas apresenta ainda inconvenientes, como será demonstrado ao longo deste trabalho.

As pesquisas apontaram para a melhoria da T.S.I. (Tensão suportável de impulso, antigo N.B.I.) das estruturas, resultando, inclusive, em modificações das normas de construção das redes de distribuição desta concessionária.

IMPORTÂNCIA DO ATERRAMENTO DO NEUTRO NOS SISTEMAS ELÉTRICOS EM  
 GERAL: MÉTODOS DE ATERRAMENTO - DEFINIÇÕES - CONCEITOS -  
 VANTAGENS E DESVANTAGENS

2.1 Importância do aterramento do neutro - Métodos

É importante perceber que, de uma forma geral, o método ou filosofia de aterramento do neutro não possui nenhuma influência durante a operação normal do sistema elétrico, mas é de importância fundamental quando ocorre uma falha na qual a terra é inserida no circuito.

Do ponto de vista estatístico de 70% a 90% dos curtos circuitos são de fase para a terra, e os curtos entre duas ou três fases, em geral, são iniciados por um curto fase-terra, o qual provoca ionizações ou sobretensões que propiciam a evolução do defeito [1].

Portanto, o estudo da forma de aterrar o neutro requer considerações cuidadosas, pois o sistema elétrico deve ser projetado de forma a suportar as sobretensões normais e transitórias e as correntes resultantes do defeito fase-terra, e, na maioria das vezes, o sistema de proteção deve ser capaz de detectar e isolar a falta em tempo hábil.

Os níveis de sobretensões normais e transitórias e o valor das correntes que surgem durante uma falta à terra são profundamente influenciados pelo método de aterramento do

neutro. Em termos gerais, se o sistema é diretamente aterrado ou aterrado através de baixa impedância, a corrente de falta à terra é alta. Conseqüentemente a destruição e os inconvenientes causados no local da falta são consideráveis. Por outro lado as tensões desenvolvidas das fases sãs (fases sem defeito) para a terra, são reduzidas e completamente suportáveis.

Se o sistema possui o neutro isolado ou aterrado através de impedância de alto valor, a corrente de falta à terra é reduzida, mas as tensões das fases sãs para terra podem atingir valores perigosos ou mesmo insuportáveis. Isto pode resultar em evolução do curto para as outras fases se não forem adotadas precauções especiais.

Os métodos de aterramento do neutro mais usuais são os seguintes [2][3]:

- Neutro isolado
- Neutro solidamente aterrado
- Neutro aterrado por meio de resistência de baixo valor
- Neutro aterrado com resistência de alto valor
- Neutro aterrado por meio de reatância (não sintonizada)
- Neutro aterrado por meio de reatância sintonizada (Bobina de Petersen)

Os sistemas com neutro isolado ou com neutro aterrado por meio de impedância de alto valor (resistência ou reatância não sintonizada) são utilizados geralmente nas classes de baixa tensão (até 1000 V) e média tensão (tensões até 34,5 kV).

Nestas tensões, o custo na isolação dos componentes do sistema não é tão crítico, de forma que o mesmo pode ser isolado de forma a suportar razoavelmente as sobreensões originadas durante curtos de fase para terra. Esta é a filosofia da maioria dos países do norte da Europa e de alguns outros fora da Europa, como o Japão [4].

Por outro lado, para sistemas de alta e extra alta tensão, o custo para fornecer a isolação necessária torna-se proibitivo e estes sistemas são normalmente do tipo solidamente aterrado ou aterrado através de baixa impedância.

O aterramento com Bobina de Petersen pode ser usado até 138kV, desde que sejam feitas as considerações de isolamento necessárias, como indicado em [2].

Pelo exposto até o momento, verifica-se que é possível utilizar uma variedade de métodos de aterramento, desde que sejam considerados os aspectos do valor da corrente do curto fase-terra, as tensões normais e transitórias que surgem durante este defeito, as facilidades de detecção do defeito e de seu local de ocorrência, a possibilidade de obtenção de seletividade, e outros aspectos inerentes a cada classe de tensão e da natureza do sistema elétrico em questão. Desta forma os sistemas de geração, transmissão e distribuição de concessionárias podem requerer e, em geral requerem, métodos diferentes de aterramento. Quando se examina os sistemas elétricos industriais os critérios podem modificar-se completamente. Também para uma mesma classe de sistema (distribuição por exemplo) a natureza dos aspectos envolvidos altera-se de país para país.

Na figura 2.1 podem ser vistos o diagrama unifilar simplificado e os diagramas de sequência positiva, negativa e zero de um sistema elétrico composto de um gerador associado ao seu transformador elevador e a linha de transmissão correspondente, sendo esta submetida a um curto fase-terra. Os parâmetros do sistema são identificados da seguinte forma:

Como já explicitado, os valores das correntes e das tensões que surgem durante uma falta à terra são fundamentais na escolha do aterramento do neutro. É necessário portanto descrever os parâmetros do sistema elétrico que influenciam nos mesmos, a fim de se obter uma melhor visão física dos fenômenos que ocorrem.

## 2.2 Correntes e tensões durante uma falta de fase para terra

Estas considerações auxiliam na compreensão do fato de que dois sistemas de mesma classe podem, dentro ou fora de um mesmo país, serem aterrados de formas diferentes com desempenho aceitável. Não existe portanto, um método ideal de aterramento, sendo de responsabilidade do engenheiro projetista decidir a respeito do método mais conveniente. Para tanto é necessário conhecer de forma adequada as características do sistema elétrico em estudo, bem como as vantagens e desvantagens que cada um dos métodos propiciam. Algumas considerações dos itens seguintes certamente serão úteis no auxílio a tomadas de decisões quanto ao aterramento do neutro.



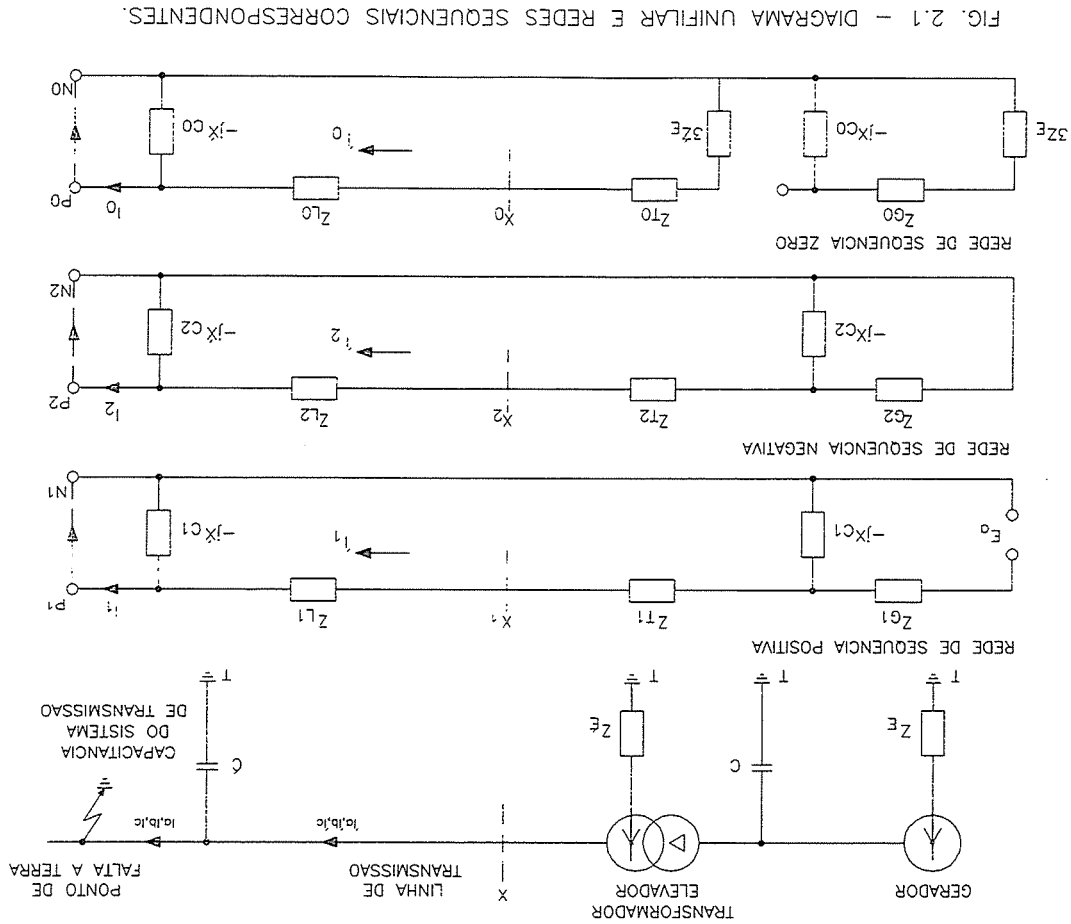


FIG. 2.1 - DIAGRAMA UNIFILAR E REDES SEQUENCIAIS CORRESPONDENTES.

da L.T. As capacitâncias  $C$  e  $C'$  são uniformemente distribuídas nos seus respectivos sistemas, mas para efeito de análise elas podem ser consideradas como parâmetros concentrados. Consideraremos ainda que  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_0$  são as impedâncias seqüenciais equivalentes de Thévenin vistas do ponto de defeito [5].

- $Z_E$  → Impedância de aterramento do gerador
- $Z_E'$  → Impedância de aterramento do secundário do transformador elevador
- $C$  → Capacitância equivalente fase-terra de uma fase do gerador
- $C'$  → Capacitância equivalente fase-terra de uma fase da L.T.

FIG. 2.3 - CONEXAO DOS DIAGRAMAS SEQUENCIAIS PARA UM CURTO FASE-TERRA.

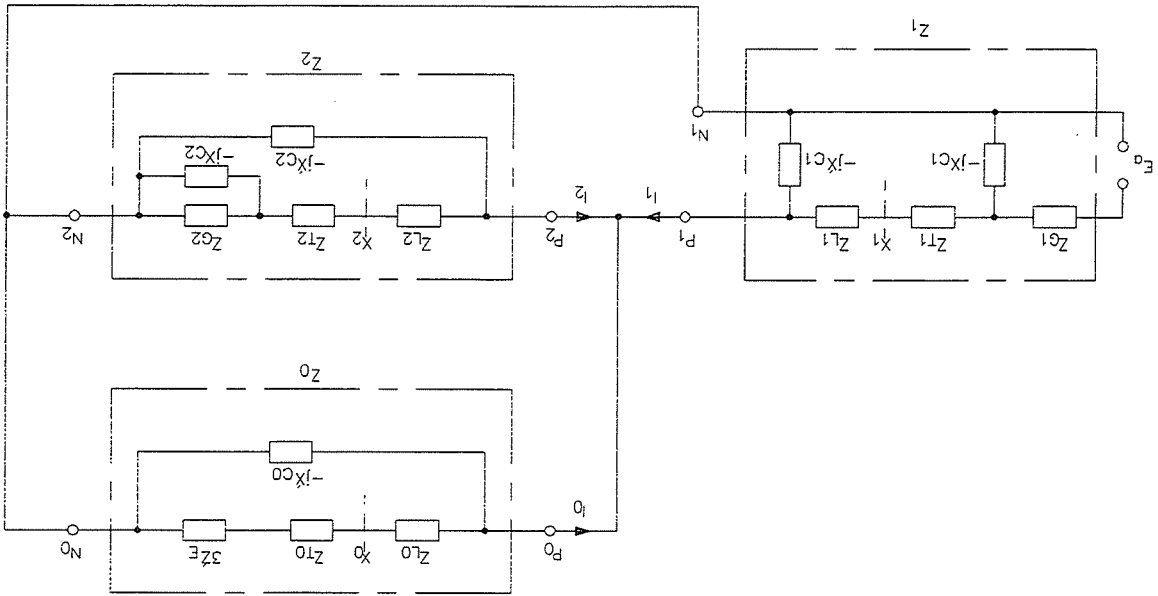
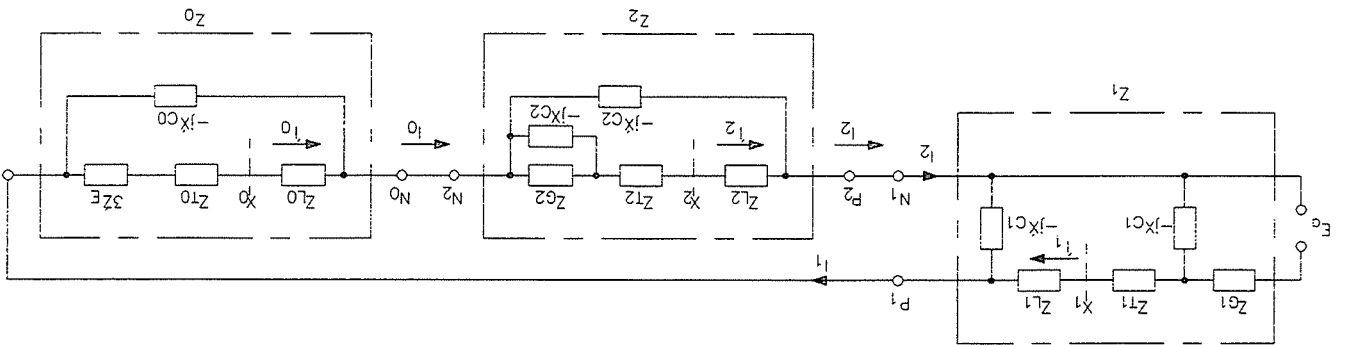


FIG. 2.2 - CONEXAO DOS DIAGRAMAS SEQUENCIAIS PARA UM CURTO DE UMA FASE PARA TERRA.



Nas figuras 2.2 e 2.3 são vistos os diagramas de conexões de seqüenciais, obtidos a partir das condições de contorno dos defeitos fase terra e fase-fase-terra.

A partir destas relações todos os valores das correntes e das tensões que surgem durante a ocorrência do defeito fase-terra e fase-fase-terra podem ser determinados. A tabela 2.1 seguinte, mostra os resultados obtidos. Nota-se claramente que todos os valores de corrente e tensão podem ser postos em função de  $k_0, k_2, I_{3\phi}$ , do operador  $\alpha$ , e das tensões de fase para neutro, ou entre fases, de geração

$$\alpha = 1 \angle 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.2)$$

Desígnando por:

$I_a, I_b, I_c$  = Correntes nas fases, no momento do defeito  
 $V_a, V_b, V_c$  = Tensões das fases para terra, no ponto de defeito  
 $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$  = Tensões entre as fases no ponto de defeito  
 $E_{ab}, E_{bc}, E_{ca}$  = Tensões entre fases no ponto de geração.  
 $E_a, E_b = \alpha^2 E_a, E_c = \alpha E_a$  = Tensões fase neutro, de geração, sendo  $\alpha$  o operador, tal que:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = K_2 \quad e \quad \frac{Z_1}{Z_0} = K_0 \quad (2.1)$$

Podemos definir dois coeficientes,  $K_0$  e  $K_2$ , em função de  $Z_0, Z_1, e Z_2$ , da seguinte forma:

Tensões e correntes de regime normal (60Hz) durante curto circuito de uma fase ou duas fases para terra.

TABELA 2.1

PARA- MÉTROS	TIPO DE CIRCUITO	FASE PARA TERRA (a-T)	DUPLA CURTO À TERRA (b-c-T)
$I_a$	0	$\frac{3}{1+K_2+K_0} \cdot I_{3\phi}$	0
$I_b$	0	$K_2(\alpha^2-1)+K_0(\alpha^2-\alpha) \cdot I_{3\phi}$	$\frac{K_2+K_0+K_2K_0}{K_2+K_0+K_2K_0} \cdot I_{3\phi}$
$I_c$	0	$\frac{K_2(\alpha-1)+K_0(\alpha-\alpha^2)}{K_2+K_0+K_2K_0} \cdot I_{3\phi}$	$\frac{-3K_2}{K_2+K_0+K_2K_0} \cdot I_{3\phi}$
$I_{RES}$	$I_a$ Igual a $I_a$	0	$\frac{3K_2K_0}{K_2+K_0+K_2K_0} \cdot E_a$
$V_a$	0	$E_b - \frac{\alpha^2 + \alpha K_2 + K_0}{1 + K_2 + K_0} \cdot E_a$	0
$V_b$	0	$E_c - \frac{\alpha + \alpha^2 K_2 + K_0}{1 + K_2 + K_0} \cdot E_a$	0
$V_c$	0	$E_a - \frac{1 + K_2 + K_0}{1 + K_2 + K_0} \cdot E_a$	0
$V^{ab}$	0	$E_b - \frac{1 + K_2 + K_0}{1 + K_2 + K_0} \cdot E_a$	0
$V^{bc}$	0	$E_c - \frac{1 + K_2 + K_0}{1 + K_2 + K_0} \cdot E_a$	0
$V^{ca}$	0	$E_a - \frac{1 + K_2 + K_0}{1 + K_2 + K_0} \cdot E_a$	0
$V_{RES}$	0	$E_a - \frac{1 + K_2 + K_0}{1 + K_2 + K_0} \cdot E_a$	0

sistemas elétricos de potência

As seguintes considerações são importantes para entendimento e avaliação dos fenômenos que ocorrem durante curtos fase-terra [3]:

- As impedâncias de sequência positiva e sequência negativa de linhas de transmissão e transformadores são iguais entre si.

- A reatância de sequência positiva de geradores modifica-se durante o período de curto-circuito, somente se o regulador automático de tensão (A.V.R) não estiver em operação. Nestas circunstâncias (Regulador Automático de Tensão Inoperante) as reatâncias dos geradores modificam-se de subtransitória para transitória, alcançando o valor síncrono poucos ciclos após o início do defeito.

- Normalmente considera-se que nas máquinas síncronas a reatância de sequência negativa possui o mesmo valor que a reatância subtransitória de sequência positiva. A afirmação é verdadeira para máquinas de pólos cilíndricos, mas para máquinas de pólos salientes, elas podem diferir ( $X_2/X_1$  varia de 1 a 1,4 aproximadamente). Entretanto, é usual considerar que  $X_2=X_1$  para qualquer um dos tipos de geradores síncronos.

- A reatância de sequência zero de geradores síncronos é

pelo exposto no item anterior, verificamos que o fator  $K_2$

Como as tensões e correntes durante faltas a terra são dependentes dos fatores  $K_2=Z_2/Z_1$  e  $K_0=Z_0/Z_1$ , é importante analisar de que forma eles variam no sistema elétrico.

#### 2.4 Variação dos fatores $K_2$ e $K_0$

• A impedância de sequência zero das linhas de transmissão é dependente de vários fatores, principalmente do circuito de retorno, que ocorre geralmente via terra. Assim, parâmetros como resistividade do solo e espaçamento dos condutores entre si e para o solo são significativos. Também a presença do condutor neutro e/ou cabo para-raios multi-aterçados, modificam de forma significativa o valor da impedância de sequência zero das linhas de transmissão.

• A impedância de sequência zero de um transformador depende do tipo de conexão primária, secundária ou terciária (se existente) do mesmo. Se a conexão é realizada de tal forma a permitir a circulação de correntes de sequência zero, então o valor desta impedância é igual à de sequência positiva.

$$(X_0 \approx X_1/3)$$

positiva.

Muito menor que a reatância subtransitória de sequência