

**FACULDADE DOCTUM
LUCAS CAETANO DE SOUZA**

**DISPONIBILIDADE E SEGURANÇA NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO POR MEIO
DO NEUTRALIZADOR DE FALTAS À TERRA**

Juiz de Fora
2018

LUCAS CAETANO DE SOUZA

**DISPONIBILIDADE E SEGURANÇA NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO POR MEIO
DO NEUTRALIZADOR DE FALTAS À TERRA**

Monografia de Conclusão de Curso,
apresentado à Faculdade Doctum de Juiz
de Fora, como requisito parcial para
conclusão do curso de Engenharia Elétrica
Orientação: MSc. Pedro Laguardia
Tavares
Projeto: Lucas Caetano de Souza

Juiz de Fora
2018

de Souza, Lucas.
Disponibilidade e segurança nas redes de
distribuição por meio do neutralizador de faltas à terra / Lucas
Caetano de Souza - 2018.
44 folhas.

Monografia (Curso de Engenharia Elétrica) –
Faculdade Doctum Juiz de Fora.

1. Neutralizador de Faltas à Terra. 2. Bobina de
Petersen
I. Neutralização de faltas. II Faculdade Doctum Juiz de
Fora

LUCAS CAETANO DE SOUZA

**DISPONIBILIDADE E SEGURANÇA NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO POR MEIO
DO NEUTRALIZADOR DE FALTAS À TERRA**

Monografia de Conclusão de Curso,
apresentado à Faculdade Doctum de Juiz
de Fora, como requisito parcial para
conclusão do curso de Engenharia Elétrica
e aprovada pela seguinte banca
examinadora:

Prof. MSc. Pedro Laguardia Tavares
Orientador e Docente da Faculdade Doctum - Unidade Juiz de Fora

Guilherme Henrique Gonçalves
Sócio Diretor da Sonnenwind Energie

Prof. MSc. Mozart Ferreira Braga Júnior
Docente da Faculdade Doctum - Unidade Juiz de Fora

Examinada em: ___/___/___.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Agradeço aos meus pais e à minha esposa, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Agradeço ao meu professor orientador pelo auxílio na preparação desse trabalho.

RESUMO

As buscas por melhores índices de disponibilidade e segurança nas redes de distribuição de energia elétrica levam concessionárias, grandes indústrias e pesquisadores a investigarem novos meios para aperfeiçoamento dessas instalações. As pesquisas apontam as faltas monofásicas transitórias como de maior recorrência no SEP contribuindo para as elevadas taxas de desligamentos e acidentes no cenário atual. Um recurso que une a bobina de Petersen a um compensador de corrente residual, chamado de Neutralizador de Faltas à Terra, é capaz de reduzir as correntes de falta monofásica a valores extremamente baixos, a ponto de não ser necessário o desligamento da energia para preservar os equipamentos da rede e a vida humana. As principais vantagens dessa técnica, em relação aos métodos de aterramento de neutro convencionais, são apresentadas no trabalho como uma alternativa para se obter melhores níveis de disponibilidade e segurança nas redes. Um modelo de aterramento ressonante com neutralizador de faltas instalado no país é citado no trabalho para expor seus resultados alcançados comparando com os eventos estatísticos, bem como as principais dificuldades para aplicação dessa tecnologia. Através de simulações computacionais, o trabalho mostra os diferentes níveis de curtos-circuitos monofásicos para cada topologia de rede citada.

Palavras-chave: Neutralizador de Faltas à Terra. Bobina de Petersen. Distribuição elétrica. Proteção elétrica. Aterramento ressonante.

ABSTRACT

The search for better indexes of availability and security in the electricity distribution networks encourage concessionaires, large industries and scientists to investigate new ways to improve these facilities. The researches point out the transient monophasic faults as of higher recurrence in electric power system contributing to the high rates of disconnections and accidents these days. A feature that unites the Petersen coil to a residual current compensator, called the Ground Fault Neutralizer, can reduce single-phase fault currents to extremely low values that not requiring power shutdown to preserving network equipment and human life. The main advantages of this technique in relation to conventional neutral grounding methods, are presented in the paper as an alternative to obtain better levels of availability and security in the networks. A resonant grounding model with faults neutralizer installed in Brazil is cited in the paper to expose its results achieved comparing with the statistical events, as well as the main difficulties for application of this technology. Through computational simulations, the paper shows the different levels of short-circuits monophasic for each network topology cited.

KEYWORDS: Ground Fault Neutralizer. Petersen Coil. Eletrical distribution. Electrical protection. Resonant ground.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Sistema com Neutro Solidamente Aterrado.....	17
Figura 2: Sistema com Neutro Solidamente Aterrado sob Falta.....	18
Figura 3: Diagrama Fasorial das Tensões no Sistema sem Falta.....	19
Figura 4: Diagrama Fasorial das Tensões no Solidamente Aterrado sob Falta.....	19
Figura 5: Sistema com Neutro Isolado.....	20
Figura 6: Sistema com Neutro Isolado sob Falta.....	21
Figura 7: Diagrama Fasorial das Tensões no Neutro Isolado sob Falta.....	22
Figura 8: Sistema com Neutro Ressonante sob Falta.....	23
Figura 9: Circuito Ressonante Equivalente.....	23
Figura 10: Diagrama de Funcionamento do Sistema Neutralizador de Faltas.....	24
Figura 11: Circuito Equivalente Neutralizador de Faltas à Terra.....	25
Figura 12: Neutralizador com By-pass.....	27
Figura 13: Comparativo FEC da Subestação de Canudos.....	27
Figura 14: Circuito com Neutro Solidamente Aterrado.....	31
Figura 15: Correntes de Falta em Neutro Solidamente Aterrado.....	32
Figura 16: Tensões de Falta em Neutro Solidamente Aterrado.....	32
Figura 17: Correntes de Falta em Neutro Isolado.....	33
Figura 18: Relação I_F e I_{ST} em Neutro Isolado.....	34
Figura 19: Tensões de Falta em Neutro Isolado.....	34
Figura 20: Circuito com Neutro Ressonante.....	35
Figura 21: Correntes de Falta em Neutro Ressonante.....	35
Figura 22: Relação de Ressonância de I_N e I_{ST}	36
Figura 23: Tensões de Falta em Neutro Ressonante.....	36
Figura 24: Circuito com Neutralizador de Faltas à Terra.....	37
Figura 25: Correntes de Falta em Neutro com GFN.....	38
Figura 26: Relação das Correntes de Neutro e Capacitivas em GFN.....	38
Figura 27: Tensões de Falta em GFN.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados das Simulações.....	39
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abracopel	Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade
AES Sul	Distribuidora Gaúcha de Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
GFN	<i>Ground Fault Neutralizer</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
RGE Sul	Rio Grande Energia
SEP	Sistema Elétrico de Potência

LISTA DE SÍMBOLOS

A	<i>Amper</i>
V	<i>Volt</i>
S	Segundos
Hz	<i>Hertz</i>
VA	Potência aparente
Z	Impedância
Ω	<i>Ohm</i>
S	<i>Siemens</i>
F	<i>Faraday</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Considerações iniciais	12
1.2	Motivação do trabalho	12
1.3	Objetivo	13
1.4	Metodologia de apresentação do trabalho	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	Desligamentos da rede por faltas monofásicas transitórias	14
2.2	Acidentes nas redes de distribuição	15
2.3	Comportamento das redes de distribuição durante faltas monofásicas	16
2.3.1	Considerações iniciais	16
2.3.2	Redes com neutro solidamente aterrado	16
2.3.3	Redes com neutro isolado	20
2.3.4	Redes com neutro ressonante	23
2.4	Projeto neutro ressonante AES Sul	26
2.5	Considerações finais	28
3	SIMULAÇÕES DOS COMPORTAMENTO DAS REDES	30
3.1	Considerações iniciais	30
3.2	Sistema com neutro solidamente aterrado	31
3.3	Sistema com neutro isolado	33
3.4	Sistema com neutro ressonante	34
3.5	Sistema com neutralizador de faltas à terra	37
3.6	Resultados e considerações das simulações	39
4	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
4.1	Conclusões gerais	40
4.2	Sugestões para trabalhos futuros	41
	REFERÊNCIAS	42
	APÊNDICES	44

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

As buscas por melhores índices de disponibilidade e segurança nas redes de distribuição elétrica levam concessionárias, grandes indústrias e pesquisadores a investigarem novos meios para aperfeiçoamento dessas instalações. Os estudos avaliam as principais causas de faltas e desligamentos das redes e as mais adequadas maneiras de controle do problema.

Por possuir seus condutores nus e expostos, as redes aéreas estão susceptíveis a contatos com pessoas, galhos de árvores, animais e descargas atmosféricas que, quando ocorrem, produzem faltas. As pesquisas apontam as faltas monofásicas transitórias como de maior recorrência no SEP, justificando o estudo para mitigação de ocorrência dessas faltas na rede de distribuição.

Uma invenção em 1917 na Alemanha (DARMSTADT, 2014) fundamenta na atualidade sistemas sofisticados de proteção capazes de reduzir significativamente os níveis de curto-circuito de fase-terra. A bobina de Petersen, equipamento que levou o nome de seu criador, é o principal componente dos modelos de aterramento ressonante famosos por propiciarem índices de disponibilidade e segurança satisfatórios às redes que os utilizam.

1.2 Motivação do trabalho

Os indicadores que apontam a falta monofásica transitória como causa majoritária de desligamentos e acidentes nas redes elétricas motivam o trabalho na busca por meios viáveis para reduzir esses índices. A capacidade do aterramento ressonante em evitar faltas monofásicas é primordial na escolha para a proposta do trabalho. Além disso, a minimização de correntes de faltas reduz danos a componentes de redes e a consumidores, propicia ampliação da segurança de pessoas próximas à rede, continuidade e confiabilidade de fornecimento de energia elétrica, bem como a qualidade do produto.

1.3 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o estudo de redução do nível de curto-circuito em faltas monofásicas nas redes de distribuição de energia elétrica através do aterramento ressonante via Neutralizador de Faltas à Terra (GFN – *Ground Fault Neutralizer*). Este estudo compreende a descrição das características da topologia de aterramento proposta (funcionamento, processo de implementação e comparação com as demais configurações de aterramento), bem como simulações computacionais de configurações de aterramento diferenciadas para consolidação de estudos.

1.4 Metodologia de apresentação do trabalho

O segundo capítulo deste trabalho inicia a abordagem do tema com a contextualização da proposta embasada em eventos estatísticos que confirmam o problema. Em seguida, expõe-se o referencial teórico utilizado para fundamentar as afirmações de que uma rede com o Neutralizador de Faltas à Terra apresenta melhores índices de disponibilidade e segurança do que redes com topologias convencionais. Apresenta ainda, uma aplicação prática de um sistema com aterramento ressonante e faz comparações de seus resultados com os eventos estatísticos mencionados na problematização. É exposto no terceiro capítulo simulações em PSIM que ilustram o comportamento das redes durante uma falta monofásica nas topologias citadas no capítulo anterior. No quarto e último capítulo é apresentada as conclusões obtidas no trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Desligamentos da rede por faltas monofásicas transitórias

As faltas monofásicas, também chamadas de faltas fase-terra, representam 78% dos desligamentos por falha (MAMEDE FILHO 2011), e ocorrem quando há contato de um cabo fase energizado, direto ou indiretamente, à terra. Existem duas maneiras de ocorrer essas faltas: permanentes e transitórias. As permanentes ocorrem quando o contato persiste por um longo tempo e necessita de uma ação corretiva, por exemplo, uma secção de condutor. As faltas transitórias ocorrem quando o contato é passageiro e o sistema volta a seu estado natural, sem intervenções externas, como por exemplo, galho de árvore e animais em contato com cabos energizados. Mamede Filho (2011) também afirma que as faltas transitórias são responsáveis por 80% do total de falhas. A análise desses dados revela que cerca de 62,4% dos desligamentos da energia elétrica são causados por defeitos monofásicos passageiros.

O uso dos dispositivos de religamento automático na rede permite que, assim que detectada uma corrente de curto, interrompa e religue o circuito a um tempo determinado, caso a falta tenha se extinguido, o sistema permanece ligado (MOURA, 2010). Porém, as correntes de curto-circuito de fase-terra nesse intervalo podem atingir valores na ordem de 10 kA (SWEDISH NEUTRAL, 2012), provocando danos aos componentes da rede (derretimento de cabos e isoladores, queima de fusíveis e diminuição de vida útil de disjuntores). Além de que, mesmo que momentânea, a interrupção da energia provoca prejuízos financeiros para as empresas que utilizam a eletricidade como principal fonte em seu processo produtivo. Uma pesquisa da Confederação Nacional da Indústria – CNI, revela que 67% das empresas que dependem de eletricidade são impactadas de forma significativa em razão das interrupções de serviço (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2016). Isso se deve ao tempo que se leva para reestabelecer os equipamentos que desligam ou queimam componentes eletrônicos durante a instabilidade da energia. Esses desligamentos comprometem a qualidade do serviço e afeta diretamente as metas de satisfação dos clientes, estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, demandando

custos financeiros e danos à imagem corporativa das concessionárias de energia (FREITAS JÚNIOR, 2013).

2.2 Acidentes nas redes de distribuição

Desde 2005 a Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade – Abracopel, divulga estatísticas e campanhas sobre acidentes de origem elétrica. Em 2017, foram divulgadas 628 mortes por choque elétrico em todo o Brasil, das quais, 181 foram em redes aéreas de distribuição (ABRACOPEL, 2018). Esses números apontam que 28,8% do total de mortes são nas redes aéreas de distribuição, ficando atrás apenas das mortes em residências, que lidera com 34,7%, segundo a própria associação.

Quando uma pessoa sofre um choque elétrico por tocar, direto ou indiretamente um ponto energizado, parte de seu corpo se torna caminho da corrente até a terra. Nota-se a gravidade de um choque na rede de distribuição, quando se compara a corrente de falta monofásica (ordem de 10 kA) com a corrente mínima para produzir fibrilação ventricular no corpo humano que é a partir de 50 mA, para frequências entre 15 e 100 Hz (UNESP, 2006).

O anuário estatístico da Abracopel (2018) também indica as profissões das vítimas por choque elétrico nas redes de distribuição. Os profissionais da área de construção e manutenção civil somam 35% das mortes (incluindo pedreiro/ajudante e pintor/ajudante), esse aspecto alerta os riscos de serviços próximos à rede. Em seguida, os eletricitas (incluindo autônomos e profissionais da empresa) com 22,2% das mortes, o que implica que mesmo com os conhecimentos e cuidados inerentes à profissão, ainda há índices relevantes de acidentes.

2.3 Comportamento das redes de distribuição durante faltas monofásicas

2.3.1 Considerações iniciais

O comportamento da rede de distribuição elétrica durante uma falta monofásica depende, principalmente, da forma de equipotencialização do ponto zero da fonte à massa, ou seja, da forma de aterramento do neutro de seu transformador. Essa forma irá afetar os níveis de corrente de curto-circuito e de sobretensão que surgem durante essa falta. A forma de aterramento do neutro não influencia no funcionamento do sistema elétrico. O aterramento tem caráter principal de proteção do sistema e das pessoas quanto às falhas envolvendo a terra (COSTA, 1995).

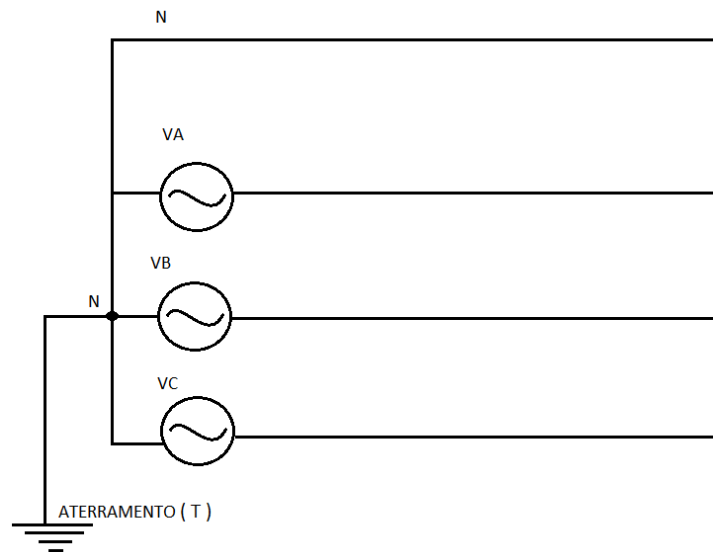
Dentre as formas de aterramentos existentes, as que possuem características antagônicas e que servem de base fundamental às demais, são as de neutro solidamente aterrado e de neutro isolado (TEIXEIRA, 2012). Enquanto o sistema com neutro solidamente aterrado apresenta elevadas correntes e baixas sobretensões em curtos-circuitos monofásicos, quando o neutro é isolado as correntes são relativamente baixas e as sobretensões entre as fases sãs e a terra são elevadas (ROBERTS 2001). As demais formas de aterramento convencionais estão entre esses dois extremos.

O aterramento ressonante é empregado em redes de distribuição com intuito de evitar os desligamentos de energia oriundos de faltas monofásicas transitórias. Sabido que essas classes de faltas ocorrem majoritariamente nos sistemas, como já citado, o método concede benefícios de confiabilidade à rede. O Neutralizador de Faltas à Terra é uma forma evoluída do aterramento ressonante e é capaz de anular as correntes de faltas monofásicas com mais eficiência.

2.3.2 Redes com neutro solidamente aterrado

Neutro solidamente ou diretamente aterrado significa que não existe nenhuma impedância intencional entre o ponto zero da fonte e a massa (SILVEIRA 2013). É realizada uma ligação física do cabo neutro que sai do transformador a um aterramento, como indica a figura 1.

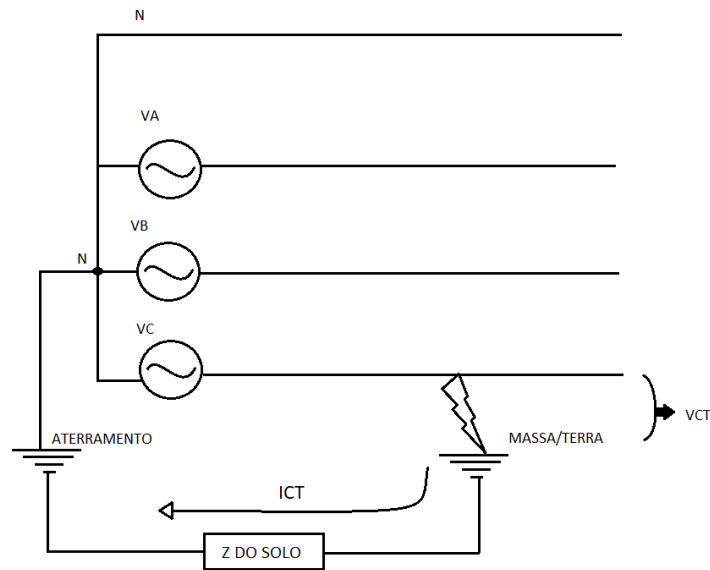
Figura 1: Sistema com Neutro Solidamente Aterrado



A situação ideal para esse método, é a fusão do neutro à terra, ou seja, ambos ser o mesmo ponto e possuir o mesmo potencial elétrico, assim, $V_{AN} = V_{AT}$, $V_{BN} = V_{BT}$ e $V_{CN} = V_{CT}$.

Dessa forma, o contato de uma fase à massa, surtirá o mesmo efeito de um contato de uma fase ao neutro. Isso remete ao fechamento de um circuito com uma tensão que, em rede primária, pode ser de 1,3 kV a 25,4 kV, ou ainda, em rede de subtransmissão, de 39,8 kV a 79,7 kV (tensões fase-terra) (ABRADEE, 2018), submetido a impedâncias próximas de zero. A consequência desse evento é o surgimento da elevada corrente de curto-circuito já mencionada. A impedância do solo e a resistência intrínseca que há no contato entre o cabo fase e a terra, contradizem a união direta de fase e neutro afirmada acima, no entanto, não impedem que a corrente de curto-circuito permaneça elevada. Porém, é pertinente relevar que quanto mais a falta está distante do aterramento, maior será a impedância e, portanto, menor a corrente de curto-circuito. A figura 2 ilustra o circuito fechado nessa circunstância.

Figura 2: Sistema com Neutro Solidamente Aterrado sob Falta



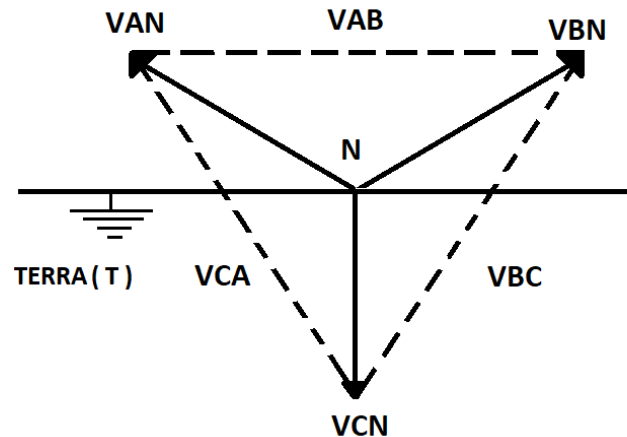
Aplicando a lei de Ohm obtém-se o valor de corrente de falta:

$$I_{CT} = \frac{V_{CT}}{Z \text{ DO SOLO}} \quad (2.1)$$

A referida forma de aterramento apresenta correntes de curto-circuito monofásico elevadas, amplitudes na ordem de 10 kA como já mencionado. Correntes a qual proporcionam maior probabilidade de danos a componentes da rede e, conseqüentemente, mais chances de desligamento. As lesões provocadas por acidente com esse nível de corrente são graves e podem levar a óbito em poucos segundos (UNESP, 2006). À vista desses dados, constata-se uma vulnerabilidade para disponibilidade e segurança nessa topologia. No entanto, essas altas correntes é consequência da condutibilidade natural do solo e isso possibilita a instalação de cargas monofilares, que utilizam apenas um cabo em toda a extensão da linha e a terra como condutor de retorno, o que torna o ramal mais barato.

As tensões de uma rede de distribuição, independente da forma de aterramento, operando sem faltas, exibem um comportamento de acordo com o diagrama fasorial ilustrado na figura 3.

Figura 3: Diagrama Fasorial das Tensões no Sistema sem Falta



O potencial de neutro (N) e de massa são nulos, as tensões de fase (V_{AN} , V_{BN} e V_{CN}) é a diferença de potencial entre fase e neutro e as tensões de linha (V_{AB} , V_{BC} e V_{CA}) é a diferença de potencial entre fases. As tensões de linha são $\sqrt{3}$ vezes maiores que as tensões de fase, sendo as seguintes expressões verificadas:

$$V_{AN} = \frac{V_{AB}}{\sqrt{3}} \quad (2.2)$$

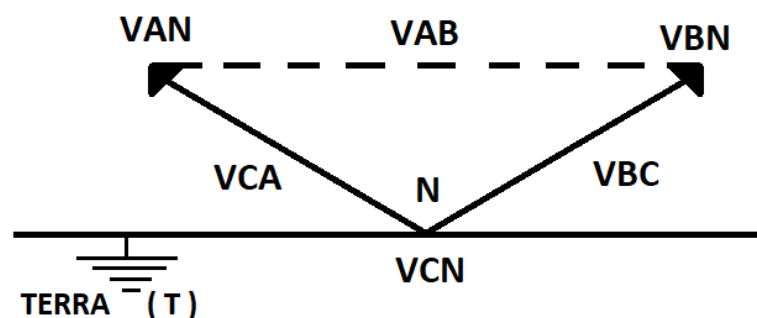
$$V_{BN} = \frac{V_{BC}}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

$$V_{CN} = \frac{V_{CA}}{\sqrt{3}} \quad (2.4)$$

Nessas condições, os elementos de fixação e suporte de cabos, que estão entre o condutor, energizado, e a estrutura de sustentação, que está aterrada, são submetidos a tensão de fase.

Durante uma falta monofásica, o sistema com neutro solidamente aterrado torna a tensão de fase do condutor faltoso nula e mantém a diferença de potencial entre os condutores sem falta e a terra em tensão de fase, como mostra o diagrama da figura 4, portanto, $V_{AN} = V_{CA}$, $V_{BN} = V_{BC}$ e $V_{CN} = V_T = 0$.

Figura 4: Diagrama Fasorial das Tensões no Solidamente Aterrado sob Falta



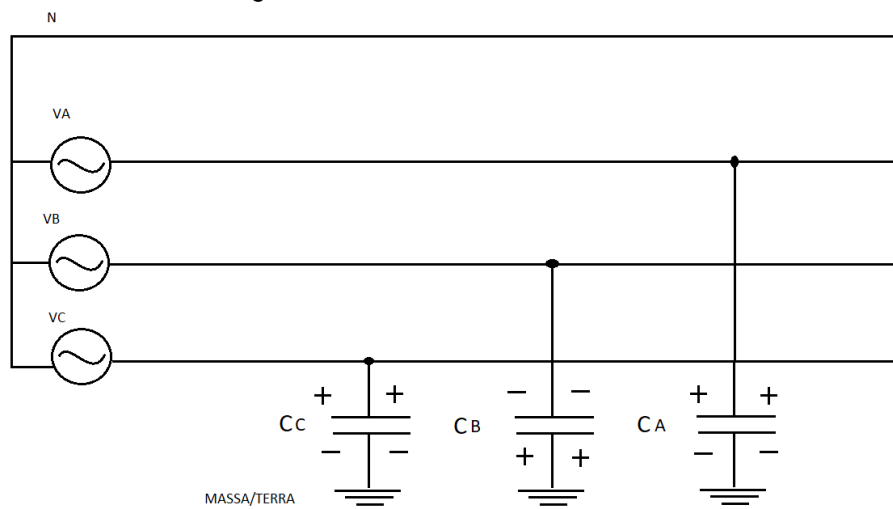
Assim, os isoladores que escoram os cabos numa torre, por exemplo, continuam submetidos à tensão de fase. Portanto, os elementos de fixação e suporte de condutores em um sistema solidamente aterrado, necessitam isolar unicamente a tensão de fase. Isso é vantajoso na ótica de que quanto menor a tensão suportável dos isoladores, menores são seus valores financeiros (SILVEIRA, 2013). Ademais, o quadro se repete para os transformadores de potencial e corrente, para-raios e cabos isolados. Essa característica torna o custo do solidamente aterrado inferior aos demais sistemas que necessitam de componentes capazes de operar plenamente em tensões de linha.

2.3.3 Redes com neutro isolado

Sistemas com neutro isolado significa que o neutro da fonte não possui ligação intencional com a terra. A massa não é usada como referência de potencial zero como é nos sistemas com neutro aterrado, portanto, massa e neutro não possuem necessariamente o mesmo potencial elétrico (TEXEIRA, 2012).

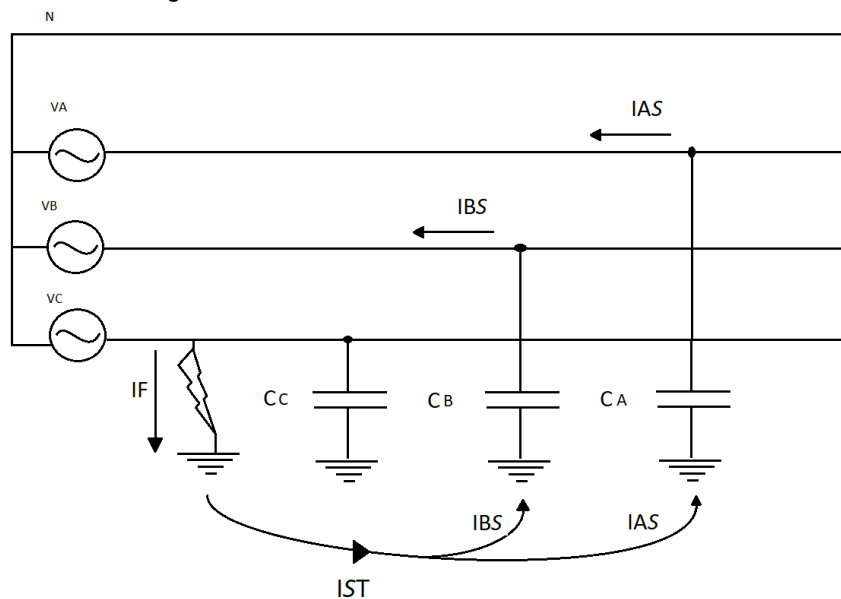
A influência da terra sob a rede com neutro isolado envolve apenas as capacitâncias *shunt*, entre os condutores e a terra, presentes em todas configurações de rede. Essas capacitâncias surgem devido ao campo elétrico proveniente dos condutores energizados, como na figura 5.

Figura 5: Sistema com Neutro Isolado



Nesse circuito há circulação de corrente por esses “capacitores” independente se existe ou não cargas no fim da linha. Essas correntes são chamadas de componentes *shunt* e se elevam $\sqrt{3}$ vezes mais quando uma das fases estão em falta com a massa. A figura 6 mostra que quando ocorre o contato da fase VC à massa, ambos compartilham o mesmo potencial. A elevação da corrente é diretamente proporcional ao aumento de tensão que as capacitâncias se submetem, antes $\sqrt{3}$ vezes menor que durante a falta.

Figura 6: Sistema com Neutro Isolado sob Falta



Aplicando a lei de Ohm obtém-se as correntes *shunt* durante a falta:

$$I_{AS} = \frac{V_{CA}}{-jX_{CA}} \quad (2.5)$$

$$I_{BS} = \frac{V_{BC}}{-jX_{CB}} \quad (2.6)$$

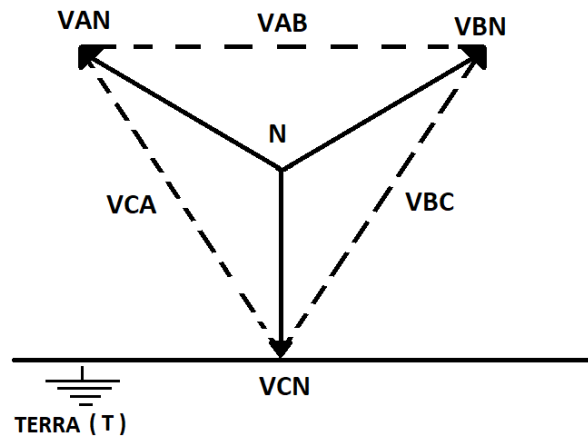
$$I_{CS} = \frac{0}{-jX_{CC}} \quad (2.7)$$

A corrente de falta nesse sistema (I_F) é igual a soma das componentes *shunt* das fases sãs ($I_{ST} = I_{BS} + I_{AS}$) e está na ordem de 100 A (SWEDISH NETRAL 2012), valor relativamente baixo levando em consideração que os níveis de correntes nominais das redes de distribuição em muitos casos são inferiores. Assim sendo, durante uma falta monofásica, os danos causados por correntes de curto-circuito são mínimos e não é, necessariamente, preciso desligar a rede. Com essa característica, o neutro isolado é utilizado para diminuir os desligamentos e manter bons índices de disponibilidade em algumas plantas industriais. Apesar de não ser o método mais

eficiente para esse fim, é o mais econômico, pois não há gastos com reatores ou aterramento de equipamento (JUNIOR, 2009). Porém, na questão da segurança, o método não oferece melhora relevante ao risco de eletrocussão nas redes, dado que o nível corrente ainda é danoso ao corpo humano.

As tensões do sistema isolado operando sem faltas, como no solidamente aterrado, são representadas pelo diagrama fasorial da figura 3. Porém, quando ocorre uma falta monofásica, o potencial da massa desloca-se para junto do potencial da fase em falta. Na figura 7, $V_{TN} = V_{CN}$ e $V_{CT} = 0$.

Figura 7: Diagrama Fasorial das Tensões no Neutro Isolado sob Falta



As seguintes expressões apresentam as tensões entre os condutores sem falta e a terra:

$$V_{AT} = \sqrt{3} \cdot V_{AN} \quad (2.8)$$

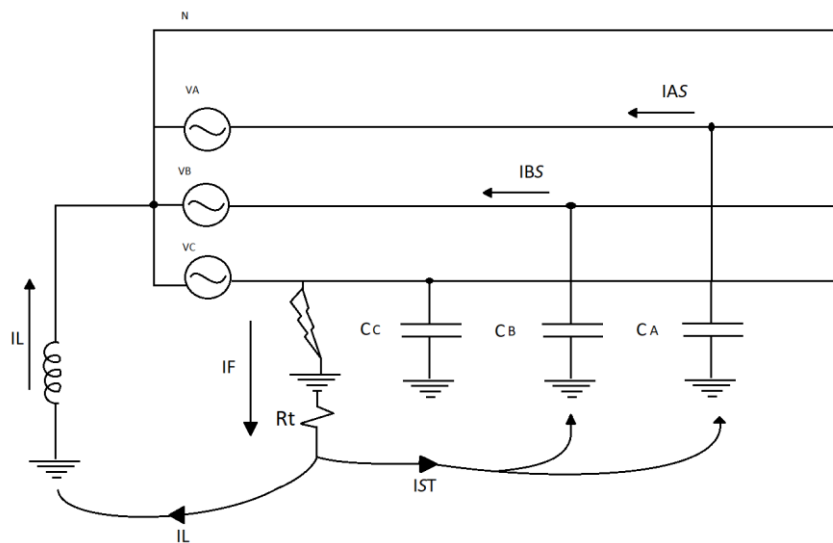
$$V_{BT} = \sqrt{3} \cdot V_{BN} \quad (2.9)$$

Na condição de falta na fase C à terra, os isoladores que sustentam os condutores da fase A, por exemplo, devem suportar a tensão de linha, caso contrário, uma falta entre as fases A e C acontece. Nesse caso, o método mostra-se desvantajoso, pois todos os dispositivos de isolação e medição têm a necessidade de suportabilidade de maior tensão, que se traduz em um sistema mais caro. Embora de média e baixa não ser tão crítico, em redes de altas tensões o custo é inviável (JUNIOR, 2009). Além de que, uma segunda falta fase-terra, com uma das fases sãs, ocasiona um curto-circuito equivalente ao fase-fase, demandando danos à rede ainda maiores que os danos provocados por uma falta fase-terra no método de neutro solidamente aterrado.

2.3.4 Redes com neutro ressonante

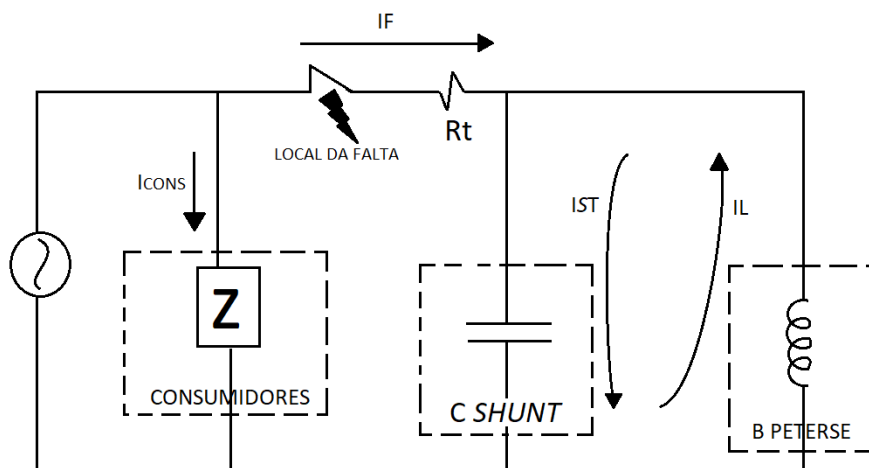
Neutro ressonante, ou aterramento ressonante, é o método em que se aterrada o neutro do transformador em série com a bobina de Petersen. Essa bobina é sintonizada com a capacitância fase-terra total do sistema (MOREAS, 2009) para que durante uma falta monofásica drene uma corrente de mesmo módulo e sentido oposto às correntes capacitivas *shunt*, como mostra a figura 8.

Figura 8: Sistema com Neutro Ressonante sob Falta



Dessa maneira, a corrente de falta (I_F) que sustentava a corrente *shunt* total (I_{ST}) tende a se anular ($I_F = I_L - I_{ST}$). Isso em razão de que a rede se torna um circuito ressonante paralelo equivalente ao da figura 9, onde $jx_L = -jx_C$, $|I_{ST}| = |I_L|$ e $I_F \approx 0$.

Figura 9: Circuito Ressonante Equivalente

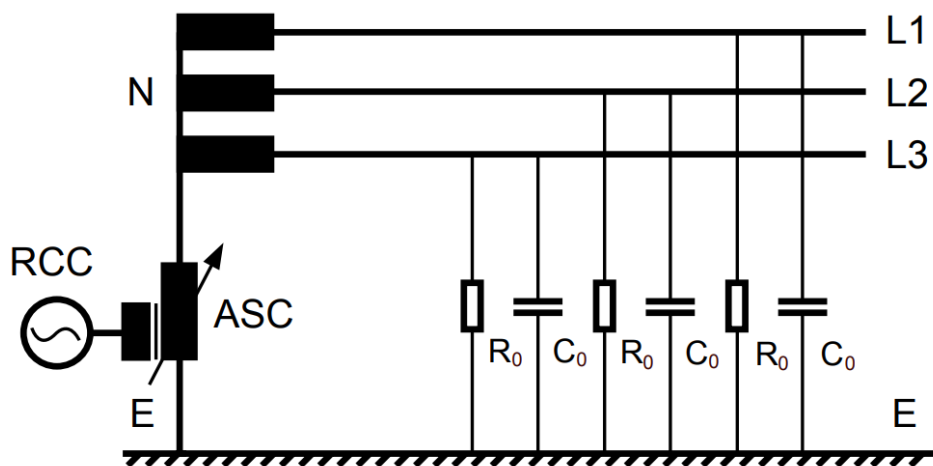


Com as correntes capacitivas praticamente nulas, a corrente total de falta se restringe às contribuições resistivas intrínsecas ao solo e condutores (R_t), normalmente inferiores a 10 A (SWEDISH NEUTRAL, 2012).

Esse nível de corrente de falta, normalmente, é inferior às correntes nominais numa rede de distribuição, deduz-se, pois, ser uma opção para atingir bons índices de disponibilidade, pelos mesmos motivos de não haver a necessidade de interrupção da alimentação da rede para eliminar a falta. Contudo, para o intuito de se obter maior grau de segurança pessoal, o nível de corrente é superior à que o corpo humano suporta sem danos irreversíveis, ainda que as lesões sejam menores que as causadas pelos métodos apresentados anteriores, a proximidade de pessoas à rede é muito perigosa.

Um recurso que une a bobina de Petersen a um compensador de corrente residual, desenvolvido pela empresa sueca *Swedish Neutral*, enriquece as aplicações do aterramento ressonante. O sistema é chamado de Neutralizador de Faltas à Terra (GFN – *Ground Fault Neutralizer*), opera com injeção de corrente anti-fase no neutro do transformador que cancela a corrente de falta em menos de 60 ms (3 ciclos para uma frequência de 50 Hz) (SWEDISH NEUTRAL, 2018). A figura 10 apresenta o diagrama de funcionamento do sistema.

Figura 10: Diagrama de Funcionamento do Sistema Neutralizador de Faltas à Terra

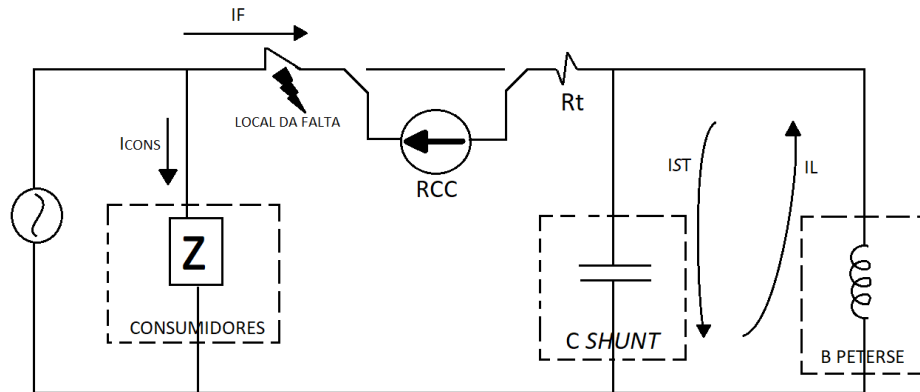


Fonte: Swedish Neutral (2012)

Desse modo, a componente capacitiva da falta é extinta pela bobina de Petersen, como mostra a figura 8, e a resistiva é quase anulada pelo compensador de

corrente, representado pela fonte de corrente (RCC) no circuito equivalente na figura 11.

Figura 11: Circuito Equivalente Neutralizador de Faltas à Terra



Com a ação do inversor de corrente no neutro do transformador, $I_F = I_{ST} - I_L - I_{RCC} < 50 \text{ mA}$ (SWEDISH NEUTRAL, 2012).

Essas características permitem manter o fornecimento de energia ao cliente mesmo sob uma falta monofásica, dada a irrelevância de corrente. Além disso, eleva o grau de segurança da população próxima à rede, graças a rapidez da neutralização de falta e a reduzida corrente remanescente suportável aos seres humanos (UNESP, 2006). O GFN ainda é usado na prevenção de incêndios em vegetações secas causados por curto-circuito entre a rede e galhos de árvores, como no estado de Victoria, Austrália (VICTORIA, 2018).

As tensões em qualquer tipo de aterramento ressonante, como nos métodos citados anteriormente, agem como ilustra a figura 3 quando operam sem falhas. Quando em falta monofásica, o potencial da massa se iguala ao do condutor em falta ocasionando uma sobretensão entre os condutores sãos e a terra, como exibe a figura 7. Essa sobretensão é a razão da incompatibilidade dos componentes da rede de neutro solidamente aterrado com de neutro ressoante. Os dispositivos de isolamento e medição da rede de neutro ressonante devem possuir capacidade de operar em tensões de linha. Aspecto a qual indica as dificuldades de migração do sistema solidamente aterrado para o sistema ressonante, pois demanda a substituição desses dispositivos, que representa 90% do custo do projeto (SILVEIRA, 2013).

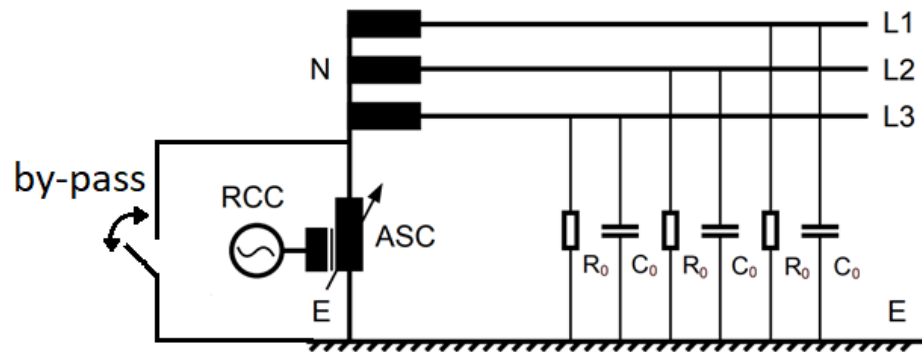
2.4 Projeto neutro ressonante AES Sul

AES Sul foi o nome até 2016 da atual RGE Sul, quando foi comprada pelo grupo CPFL Energia. A distribuidora atua na região Centro-Oeste do estado do Rio Grande do Sul desde 1997. Na época do projeto de implantação do neutro ressonante, a empresa operava numa área de concessão 99.512 km², em 118 municípios e mais de 1.200.000 unidades (SILVEIRA, 2014).

Em 2009 a concessionária gaúcha desenvolve o projeto de aterramento de neutro ressonante em caráter experimental na subestação de Canudos (Novo Hamburgo-RS) embasado por um estudo realizado em 2007, que identificou oportunidades de melhorar a confiabilidade e segurança em suas instalações. O modelo de aterramento empregado foi o Neutralizador de Faltas à Terra, que mais tarde, quando o projeto se ampliou para mais três subestações, também foi instalado nas subestações de Novo Hamburgo 2 e Estância Velha. A quarta subestação, Novo Hamburgo 1, recebeu o aterramento ressonante sem o compensador de corrente residual (SILVEIRA, 2013). Antes do projeto essas subestações operavam com o neutro solidamente aterrado.

A AES Sul avaliou a capacidade de operação em sobretensão dos dispositivos de isolamento e medição existentes antes do projeto. A intensão foi mantê-los na nova topologia e assim reduzir os gastos com adaptações. Os resultados da avaliação foram que os dispositivos suportam por um tempo a sobretensão e logo se danificam. Então, foram fixados 30 segundos de operação do neutro ressonante e, após o tempo, uma chave de *by-pass* retorna o sistema para a configuração de solidamente aterrado como mostra a figura 12. Dessa forma, a prevenção de desligamentos acontece apenas quando em caráter de falta monofásica transitória.

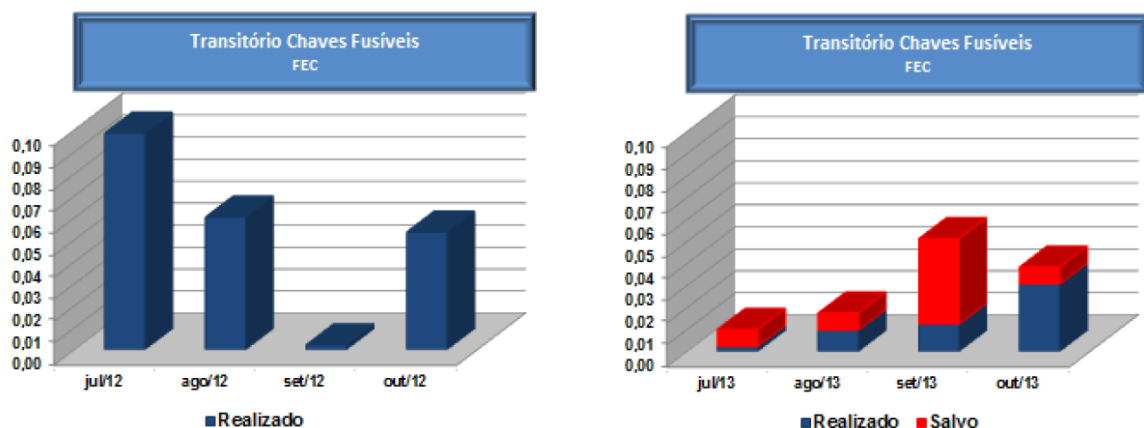
Figura 12: Neutralizador com By-pass



Fonte: Adaptado de Swedsh Neutral (2012)

A distribuidora realizou um comparativo dos dados de disponibilidade da rede em dois cenários, com aterramento sólido e com o aterramento ressonante, para avaliar os resultados do projeto. A figura 13 apresenta um comparativo dos indicadores de FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) nas chaves de ramal da subestação de Canudos no mesmo período de 2012 com 2013.

Figura 13: Comparativo FEC da Subestação de Canudos



Fonte: Silveira, 2014

As interrupções registradas que integram os gráficos são oriundas de faltas transitórias. Em azul foi o indicador registrado e em vermelho a parcela que deixou de ser realizado, salva pela ação do sistema de aterramento ressonante.

A empresa calcula que, após a migração para o sistema de aterramento ressonante, 63% das interrupções por causas transitórias foram evitadas. Até a data de divulgação desses resultados (novembro de 2014), não houve nenhum caso de acidente elétrico nos ramais cujo as subestações possuem o neutralizador de faltas. No intuito de se obter mais informações acerca de acidentes nessas linhas, foi realizado contato com Silveira (2014), um dos autores de trabalhos que descrevem o projeto e engenheiro da atual RGE Sul. O Sr. Mauro Sergio Silveira relatou a dificuldade de se conseguir essas informações, principalmente quando os acidentes não ocasionam o desligamento da rede (que é o caso das redes com aterramento ressonante). Ele ainda disse que até a presente data (16 de novembro de 2018) não houve registro de acidentes envolvendo as redes onde existem aterramentos ressonantes instalados (Apêndice 1).

2.5 Considerações finais

Levando em consideração a influência do método de aterramento do neutro no comportamento do sistema elétrico frente a uma falta monofásica, o capítulo revelou que os modelos capazes de contribuir para bons índices de disponibilidade são os de neutro isolado e neutro ressonante. O neutro isolado é mais econômico, porém, menos eficiente, permitindo uma corrente de falta que pode provocar danos aos equipamentos, ainda que sejam mínimos. A forma de neutro ressonante é a mais indicada quando se deseja baixas correntes numa falta monofásica, entretanto, são necessários maiores investimentos em relação ao neutro isolado.

Na questão da segurança humana próxima à rede, o capítulo apresentou o sistema de aterramento ressonante GFN como uma tecnologia que reduz a corrente de falta a níveis seguros para os seres humanos. Dessa forma, o GFN ajuda tanto nos índices de disponibilidade como na segurança de rede elétrica.

O projeto da ASE Sul propôs uma maneira de migrar do sistema solidamente aterrado para o de aterramento ressonante de forma relativamente econômica mantendo equipamentos da topologia antiga. Com a necessidade de um *by-pass* na bobina de Petersen após um tempo determinado, o sistema elimina apenas as faltas

transitórias. Contudo, por essas faltas apresentarem maior incidência no SEP, obtém-se uma melhora significativa na continuidade de energia provida.

Os indicadores de FEC divulgados pela AES Sul no projeto de neutro ressonante corroboram com tendências observadas nas estatísticas de Mamede Filho (2011), apresentadas no segundo capítulo quando diz ser maioria as faltas transitórias.

3 SIMULAÇÕES DOS COMPORTAMENTO DAS REDES

3.1 Considerações iniciais

O sistema utilizado para realizar as simulações é o proposto por Moraes (2009). Trata-se de um trecho adaptado de uma rede de distribuição equivalente ao IEEE 13 (2000). Com suas devidas modificações, o alimentador é representado por um circuito “PI” e é dividido em duas partes. A primeira compreende do transformador até o local da falta e corresponde a 300 m. A segunda se estende da falta até uma carga e possui 6 km. O alimentador conta com as seguintes características:

- Transformador trifásico com fechamento em Δ/Y , relação 115/4,16 kV e 5MVA;
- Cargas desequilibradas, sendo: $Z_a = 6,1239 + j3.9342 \Omega$, $Z_b = 5,0666 + j2,7326 \Omega$ e $Z_c = 5,0741 + j2,9665 \Omega$;
- Resistência do alimentador na Fase “a” = 21,83 Ω/km , Fase “b” = 21,33 Ω/km e Fase “c” = 21,5 Ω/km ;
- Reatância indutiva do alimentador na Fase “a” = 64,33 Ω/km , Fase “b” = 66,17 Ω/km e Fase “c” = 65,33 Ω/km ;
- Admitância do alimentador na Fase “a” = 4 $\mu\text{S}/\text{km}$, Fase “b” = 3,8 $\mu\text{S}/\text{km}$, e Fase “c” = 3,6 $\mu\text{S}/\text{km}$.

As simulações de Moraes (2009) estabelecem duas diretrizes, para baixas e altas capacitâncias no sistema. Este capítulo tem objetivo de ilustrar os efeitos do aterramento às redes de distribuição elétrica durante uma falta monofásica. À vista disso, é coerente expor o mesmo a capacitâncias em que se justifiquem o emprego do método. Portanto foi estabelecido as seguintes capacitâncias:

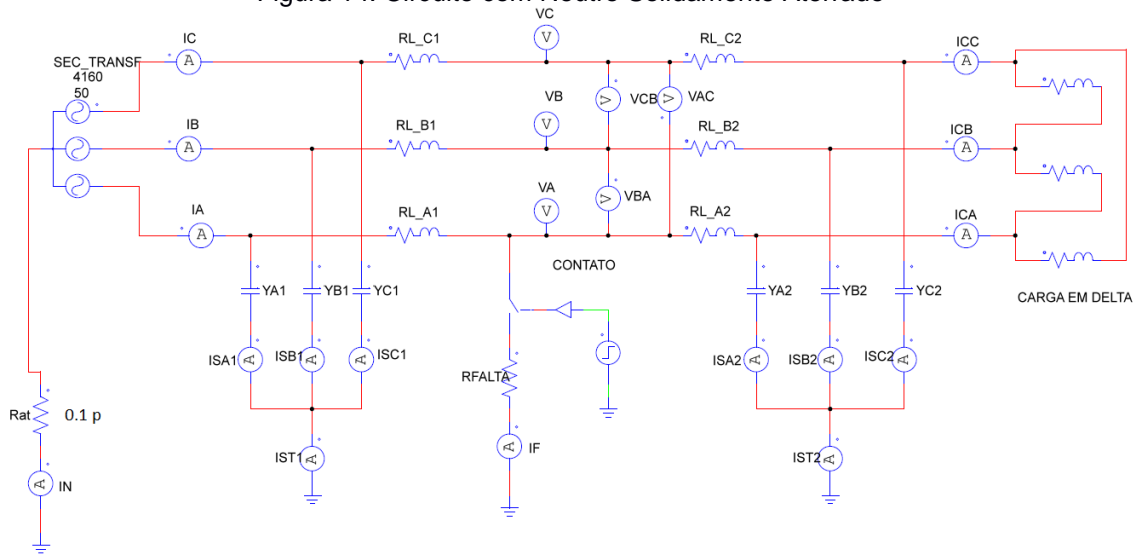
- Fase “a” = 13,263 μF ;
- Fase “b” = 13,961 μF ;
- Fase “c” = 14,737 μF .

As simulações são realizadas no PSIM, *software* utilizado em simulações de circuitos de eletrônica de potência e sistemas elétricos de potência simplificados. Além

de atender as necessidades para essas simulações de redes, a escolha do PSIM considerou os trabalhos futuros de modelagem do GFN nos quais será preciso ferramentas e recursos disponíveis no programa.

3.2 Sistema com neutro solidamente aterrado

Figura 14: Circuito com Neutro Solidamente Aterrado

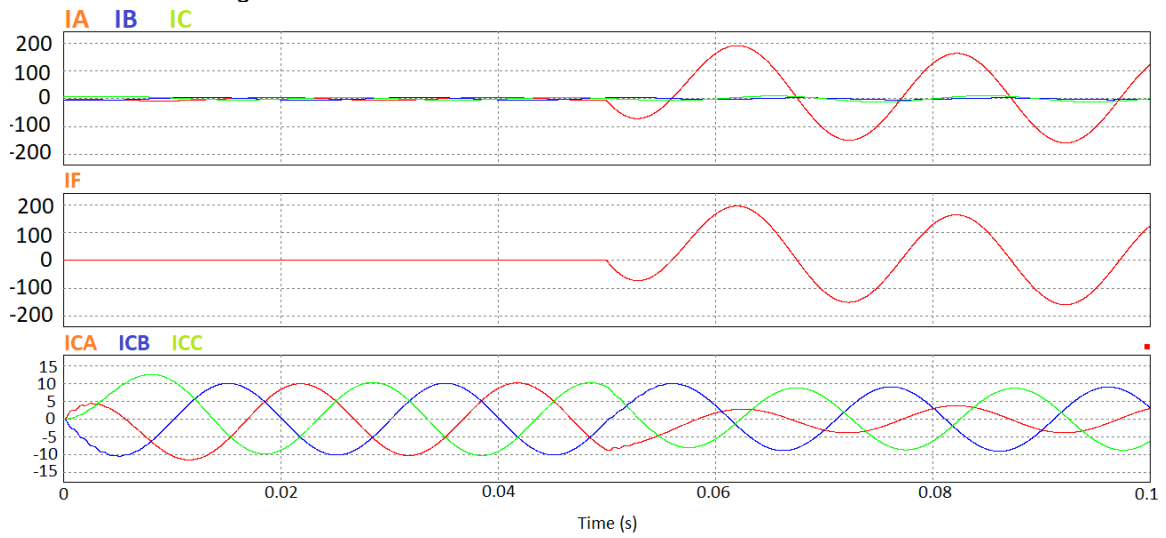


A figura 14 representa o circuito equivalente ao sistema. O efetivo aterramento do neutro do transformador consiste em adotar resistência de aterramento (R_{at}) tendendo a 0.

O tempo de simulação é de 0,1 s e uma falta na fase “A” acontece quando há 0,05 s decorridos através da chave “CONTATO”, considerando resistência de falta (R_{FALTA}) igual a 0.

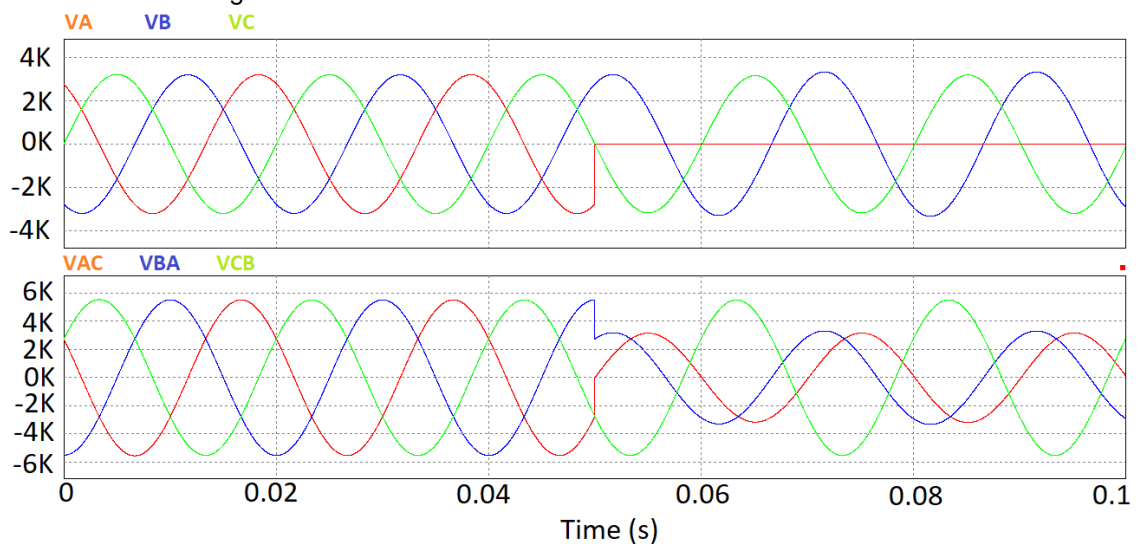
Como mostra a figura 15, a corrente do condutor faltoso (I_A) apresenta um crescimento abrupto. A corrente de falta (I_F), atinge valores muitas vezes maior que a corrente total da fase. Esse efeito acarreta o desligamento do alimentador por sobrecorrente. Além disso, a corrente na carga relativa à fase em falta (I_{CA}) sofre queda, o que afeta seu desempenho.

Figura 15: Correntes de Falta em Neutro Solidamente Aterrado



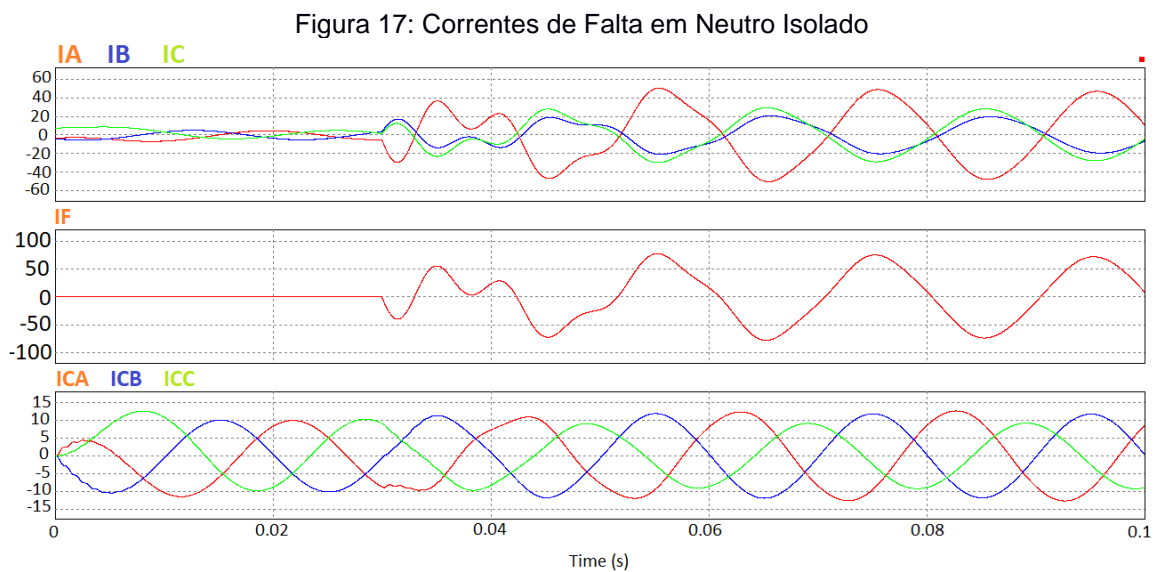
As tensões são representadas nos gráficos da figura 16. Assim que ocorre o contato com a massa a tensão monofásica da fase em falta (V_A) se anula e as fases sãs (V_B e V_C) permanecem como estavam antes da falta, fato mencionado no capítulo 3. As tensões entre fases V_{AC} e V_{BA} são afetadas e passam a possuir amplitude de tensão de valor monofásico.

Figura 16: Tensões de Falta em Neutro Solidamente Aterrado



3.3 Sistema com neutro isolado

O circuito utilizado para simular o sistema com neutro isolado é o mesmo usado no item anterior, porém é incorporado um valor “infinito” na resistência de aterramento. Agora a falta acontece em 0.03 s decorridos. O primeiro gráfico da figura 17 revela a influência da falta não só na fase faltosa, como nas sãs também. Isso se deve ao aumento das correntes *shunt* descritas no segundo capítulo.



A corrente de falta (I_F) é significativamente menor que em faltas com neutro solidamente aterrado podendo, dependendo da estrutura da rede, manter a alimentação. Se o sistema permanecer ligado, a carga continua drenando correntes nominais como mostra o terceiro gráfico nessa mesma figura.

A corrente no local do contato (I_F) é exibida novamente na figura 18 para demonstrar sua relação direta com as correntes *shunt* nas fases sãs.

Na figura 19 estão as tensões monofásicas deslocadas a níveis $\sqrt{3}$ maiores como citadas no capítulo anterior.

Figura 18: Relação IF e IST em Neutro Isolado

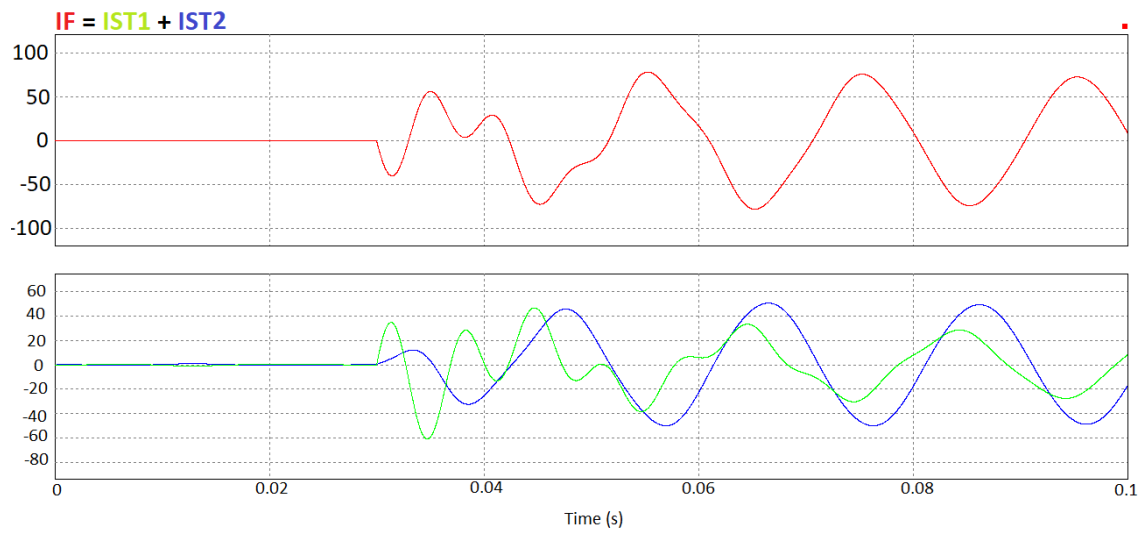
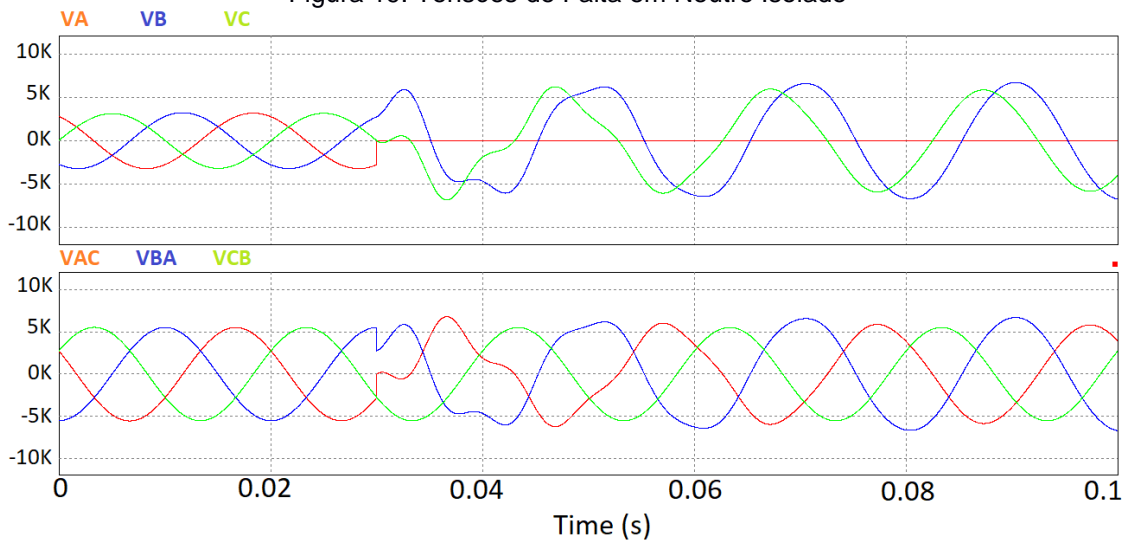


Figura 19: Tensões de Falta em Neutro Isolado

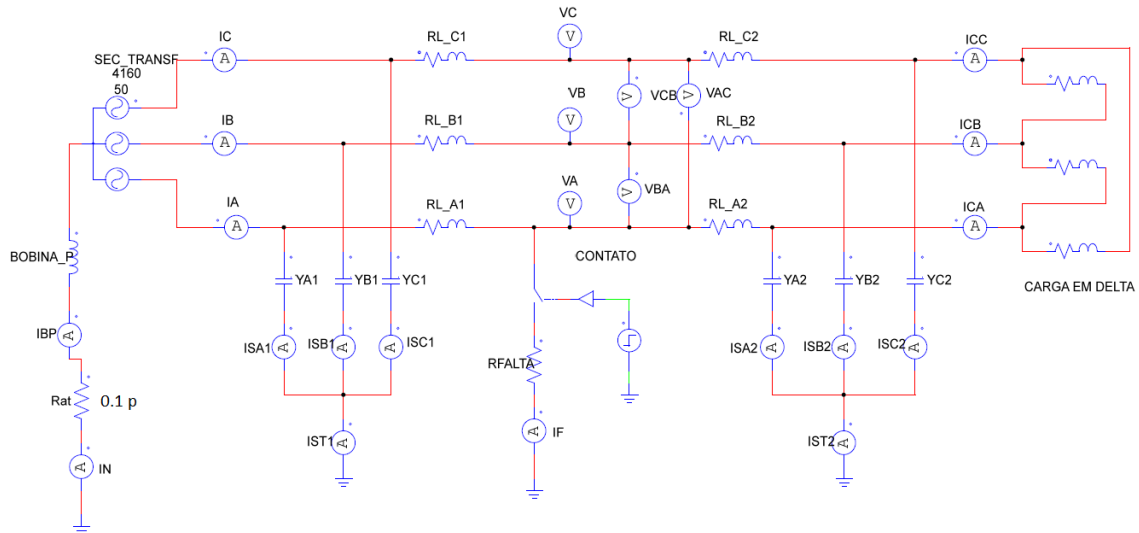


3.4 Sistema com neutro ressonante

Para a simulação é mantido o mesmo circuito dos sistemas anteriores, porém é inserido uma bobina (BOBINA_P) entre a resistência de aterramento, que agora volta

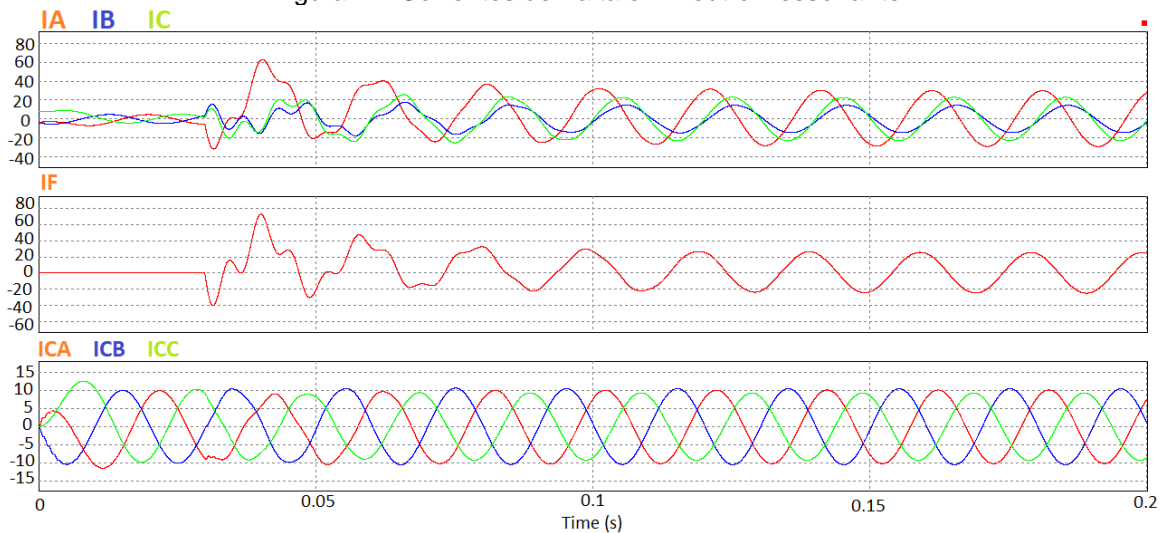
a ter valor nulo, e o neutro do transformador, como mostra a figura 20. A simulação dura 0,2 s e a falta ocorre quando há 0,03 s corridos.

Figura 20: Circuito com Neutro Ressonante



As correntes ilustradas na figura 21 demonstram uma redução no nível de curto-circuito em relação ao neutro isolado.

Figura 21: Correntes de Falta em Neutro Ressonante



A corrente indutiva que passa pela bobina de Petersen no neutro (I_N) entra em ressonância com as capacitivas. Isso elimina o suprimento de corrente pelo contato

de falta reduzindo assim a corrente. A figura 22 infere que o somatório das correntes *shunt* é de mesma amplitude e sentido oposto a corrente da bobina. A corrente de falta (I_F) residual é oriunda de contribuições resistivas da linha. As correntes na carga (IAC, ICB e ICC), como no sistema com neutro isolado, permanecem ativas.

O comportamento das tensões é similar ao de neutro isolado. As tensões monofásicas das fases sãs sofrem elevação de $\sqrt{3}$ vezes maior. E as tensões de linha não se alteram, como mostra a figura 23.

Figura 22: Relação de Ressonância de IN e IST

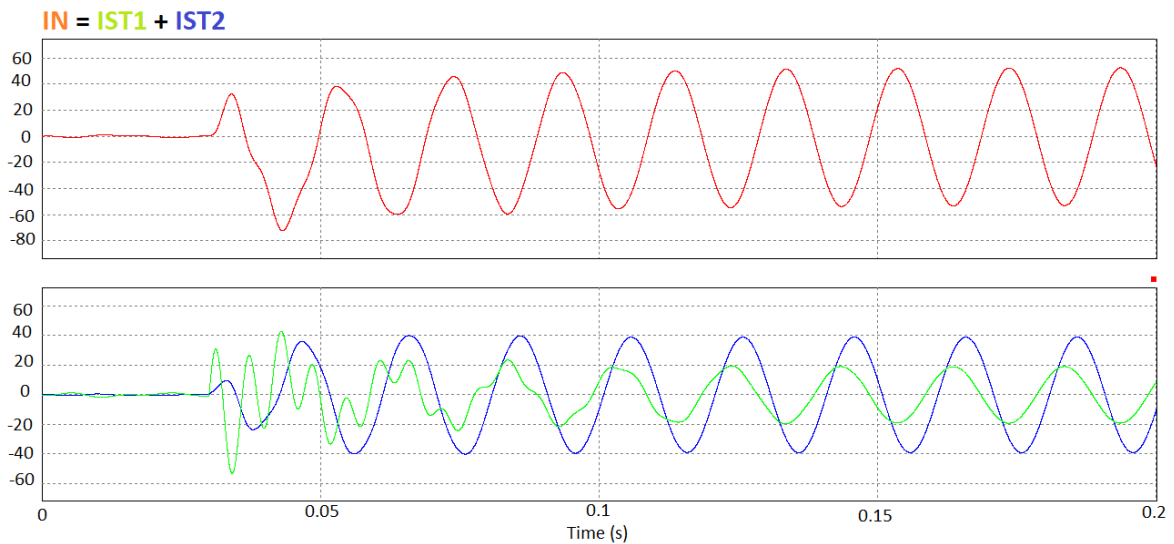
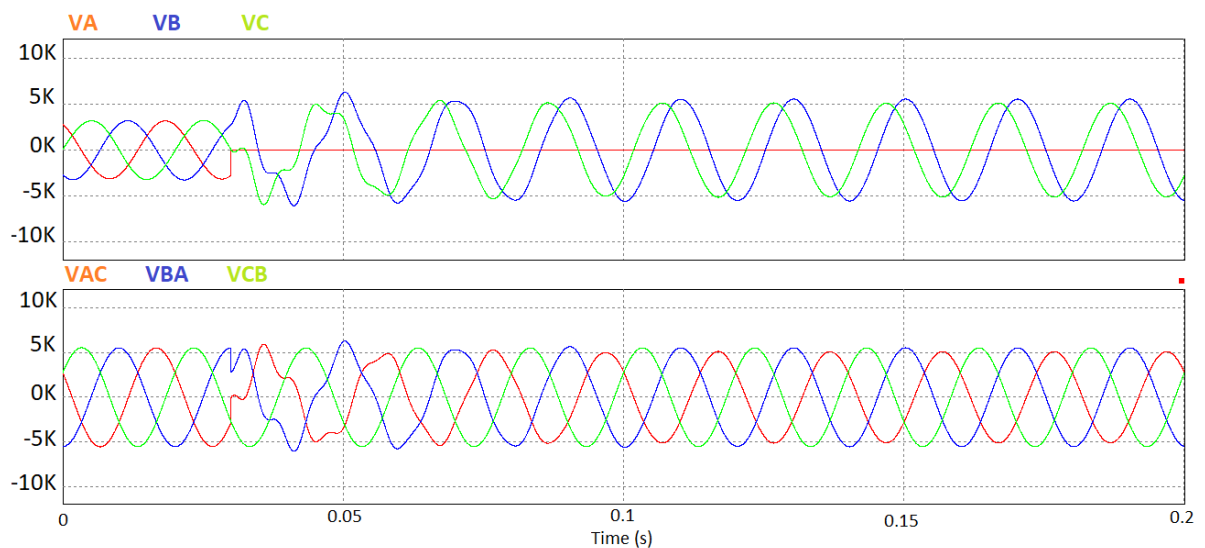


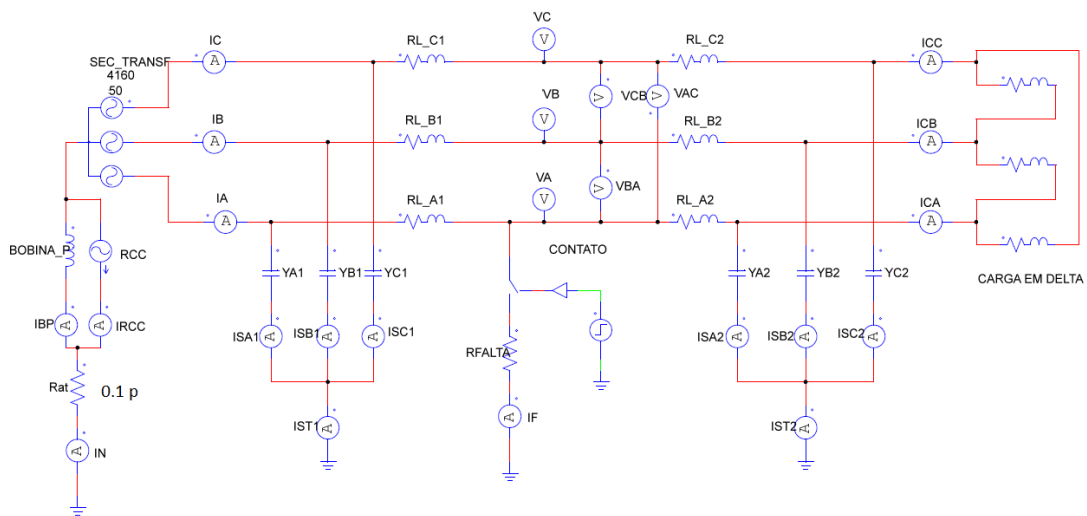
Figura 23: Tensões de Falta em Neutro Ressonante



3.5 Sistema com neutralizador de faltas à terra

Para simular os efeitos do compensador de corrente residual do GFN, inseriu-se uma fonte de corrente (RCC) em paralelo com a bobina de Petersen como mostra a figura 24. A simulação dura 0.2 s e a falta ocorre em 0.03 s decorridos.

Figura 24: Circuito com Neutralizador de Faltas à Terra



A figura 25 expõe as correntes durante uma falta monofásica nesse sistema e revela a superioridade que possui em eliminar faltas à terra.

Após pouco tempo a corrente de falta praticamente se extingue e se sustenta a valores bem próximos de 0. A carga, como natural em qualquer sistema de neutro ressonante, se conserva em funcionamento. A corrente que percorre o neutro (I_N) é a soma da componente indutiva da bobina de Petersen e a injetada pelo compensador, juntas suprimem as correntes capacitivas e resistivas do sistema que eram alimentadas pelo contato da fase à terra. A figura 26 relaciona a corrente total no neutro com as correntes capacitivas.

As tensões, representadas nos gráficos da figura 27, repetem as dos sistemas ressonantes tradicionais.

Figura 25: Correntes de Falta em Neutro com GFN

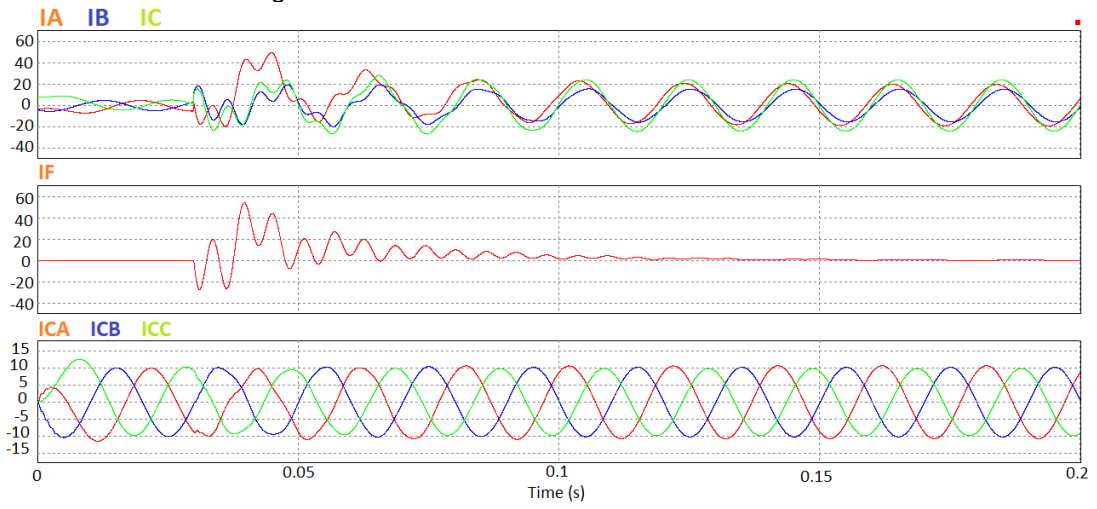


Figura 26: Relação das Correntes de Neutro e Capacitivas em GFN

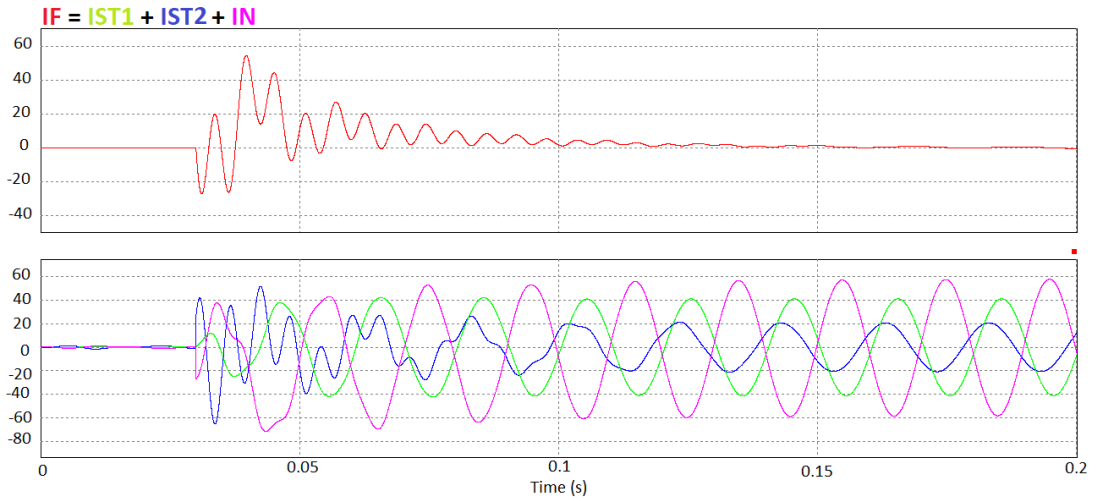
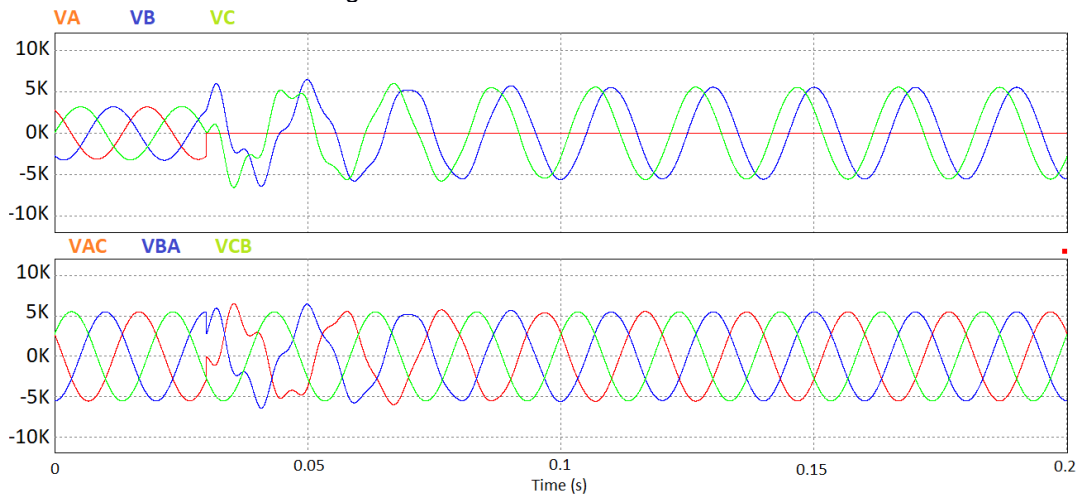


Figura 27: Tensões de Falta em GFN



3.6 Resultados e considerações das simulações

A Tabela 1 expõe os valores de corrente de falta e inferências encontradas nos métodos de aterramento simulados.

Tabela 1: Resultados das Simulações

MÉTODO	CORRENTE DE FALTA (A)	VANTAGEM	DESVANTAGEM
Neutro Solidamente Aterrado	160	Isoladores e medidores menos robustos	Altas correntes de falta
Neutro Isolado	71	¹ Continuidade durante falta monofásica	Isoladores e medidores mais robustos
Neutro Ressonante	25	Continuidade durante falta monofásica	² Isoladores e medidores mais robustos
Neutralizador de Faltas à Terra	0.5	Continuidade e segurança durante falta monofásica	² Isoladores e medidores mais robustos

As simulações apresentadas confirmam as teorias exibidas no capítulo anterior. Apesar das divergências dos valores de correntes de falta abstraídos de Swedish Neutral (2012), os resultados adquiridos nas simulações são coerentes com a potência e extensão da linha. A proximidade da corrente de falta do método de neutro isolado ao solidamente aterrado nessas simulações se dá à elevada capacitância adaptada à rede.

A sintonia da bobina de Petersen nas simulações foi realizada com base no simples cálculo descrito na figura 9 e a amplitude e ângulo de fase da corrente injetada no neutro encontradas empiricamente.

¹ Uma elevada capacitância da rede, que acarreta correntes de faltas mais altas, pode impossibilitar a continuidade do sistema.

² A introdução do *by-pass* na bobina de Petersen durante faltas permanentes pode possibilitar o uso de isoladores e medidores menos robustos (como na AES Sul).

4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões gerais

Nesse trabalho são abordadas as características dos métodos de aterramento de neutro sólido e de neutro isolado para estabelecer o entendimento do aterramento ressonante e demonstrar o comportamento das redes durante uma falta fase-terra em cada topologia, bem como apontar as vantagens e desvantagens de cada configuração.

O trabalho revela que, além de seus distintos comportamentos frente às faltas monofásicas, as redes com diferentes formas de aterramento de neutro possuem custos diferentes e, por esses motivos, conclui-se que é necessário analisar as aplicações da rede e o perfil dos consumidores para se determinar a mais adequada forma de aterramento para uma determinada rede.

O aterramento ressonante neutralizador de faltas à terra é apresentado como uma maneira de eliminar as correntes de falta monofásica. Essas correntes estão diretamente relacionadas com a problematização apontada no segundo capítulo a respeito dos desligamentos e acidentes nas redes de distribuição. Portanto, esse modelo de aterramento é indicado pelo trabalho como um sistema capaz de consolidar bons índices de disponibilidade e segurança às redes de distribuição.

O neutralizador de faltas é capaz de eliminar correntes tanto de faltas transitórias quanto de permanentes. Porém, o foco deve ser nas transitórias levando em consideração que as permanentes, mais cedo ou mais tarde, deverão passar por ações corretivas e, conseqüentemente, o desligamento da linha ocorrerá. O fabricante desse equipamento afirma que as correntes de faltas monofásicas se limitam a valores inferiores a 50 mA, que é a corrente mínima para produzir fibrilação ventricular em pessoas.

O projeto da AES Sul, mencionando no capítulo 2, confirma a eficácia do sistema, quando foi constatada a melhora da disponibilidade nos ramais que receberam o neutro ressonante. Todavia, quanto aos acidentes é possível apenas presumir, intuitivamente, que houve melhora em razão da reduzida corrente de falta, por ainda não haver registro de acidentes nessas redes.

Os resultados das simulações executadas no PSIM mostram-se coerentes com os conceitos de aterramento de neutro estudados e denota que a proposta do trabalho foi alcançada pela análise do comportamento de parâmetros de corrente e tensão (fase-neutro e fase-fase) em SEP submetido a distúrbio.

4.2 Sugestões para trabalhos futuros

Afim de propor maior eficiência aos equipamentos existentes no mercado, é sugerido trabalhos que modelem controladores de ajuste automático da indutância das bobinas de Petersen via uma malha de controle em modo tensão por detecção de corrente monofásica, bem como da corrente de anti-fase injetada pelo compensador.

Apesar de menor recorrência, um dispositivo capaz de evitar faltas bifásicas e trifásicas seria interessante em virtude dos danos físicos e financeiros que essas faltas podem provocar.

É citado no segundo capítulo a pesquisa da Abracopel (2018) em que aponta os acidentes domésticos como a principal causa de morte por choque elétrico em todo o Brasil. Por essa razão, um estudo que aborde esse tema se justifica. O uso do neutro isolado nas redes secundárias de distribuição acarreta numa efetiva diminuição da corrente elétrica em um choque, possibilitando uma melhora nos índices de segurança nas redes domésticas. Entretanto, nas condições atuais, o aterramento sólido do neutro do transformador dessas redes é necessário devido a elevada corrente de desequilíbrio que retorna pela terra. O estudo da viabilidade e ações necessárias para a migração do método de neutro solidamente aterrado para o de neutro isolado nas redes de distribuição secundárias também é sugerido.

REFERÊNCIAS

- ABRACOPEL. **Anuário Estatístico Brasileiro dos Acidentes de Origem Elétrica**. Disponível em <http://www.abrinstal.org.br/docs/abracopel_anuario18.pdf>. 2018. Acesso em 08 nov. 2018.
- ABRADEE. **A Distribuição de Energia**. Disponível em <<http://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia/>>. 2018. Acesso em 08 nov. 2018.
- COSTA, P. F. **Aterramento do Neutro dos sistemas de distribuição brasileiros: uma proposta de mudança**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG. 1995.
- DARMSTADAT. **Petersen, Waldemar – Elektroingenieur und Unternehmer**. Disponível em:< <https://www.darmstadt-stadtlexikon.de/p/petersen-waldemar.html>>. Efinger, Manfred, 2014. Stadtlexikon Darmstadt. Acesso em 30 out 2018.
- FREITAS JÚNIOR, E. M. **Análise de Fatores Críticos em Reclamações de Clientes de Concessionárias de distribuição de Energia Elétrica**. 2013. Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco. 2013.
- JUNIOR, I. G. C. **Aterramento do Ponto Neutro das Redes de Distribuição Através de Bobina Ressonante**. Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Itajubá. 2009.
- MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de proteção**. 2011. Editora LTC, Rio de Janeiro/RJ. 2011.
- MCGRANAGHAN, M. F.; MUELLER, D. R.; SAMOTYJ, M. J. **Voltage sags and industrial systems**. IEEE– Transactions on Industry Applications, Vol 29, 1993.
- MOURA, C. J. S. **Estudo para Implantação de um Sistema de Recomposição Automática para a Rede de Distribuição do Campus do PICI**. 2010. Monografia apresentada para obtenção de créditos da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará. 2010.
- PORTAL DA INDUSTRIA. **Dois terços das Indústrias têm Prejuízos com Falhas no Fornecimento de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.portaldaindustria.com.br/agenciacni/noticias/2016/03/dois-tercos-das-industrias-tem-prejuizos-com-falhas-no-fornecimento-de-energia-eletrica-diz-pesquisa-da-cni/>>. Diego Abreu, 2016. Acesso em 21 nov. 2018.
- ROBERTS, J.; HECTOR J.; ALTUVE; DAGING, H. **Review Of Ground Fault Protection Methods For Grounded, Ungrounded, And Compensated Distribution Systems** Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA USA 2001.

- SHIPP, D.; ANGELINI, F. **Characteristics of different power systems neutral grounding techniques: facts and fiction**. In: Conference Record of Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. 1990. Seattle, WA, Estados Unidos: [s.n.], 1990. p. 107-116.
- SILVEIRA, M. S. **Aplicação Prática de um Sistema de Aterramento Ressonante em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado com requisito para obtenção de título de Engenheiro Eletricista pela Universidade do Vale do Rio Doce – UNISINOS. 2013.
- SILVEIRA, M. S. **Projeto Neutro Ressonante AES Sul**. 2015. XXI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica SENDI. Santos – SP. 2014.
- SWEDISH NEUTRAL. **The Ground Fault Netralizer – A Novel Smart Grid Protection**. Disponível em: < http://www.swedishneutral.se/download/gfn_pp.pdf>. Klaus Winter, 2012. Acesso em 21 nov. 2018.
- SWEDISH NEUTRAL. **Ground Fault Netralizer**. Disponível em: <<http://www.swedishneutral.se/main.php?name=gfn>>. 2018. Acesso em 08 nov. 2018.
- TEIXEIRA, F. B. **Estudo da aplicação do aterramento ressonante em redes de distribuição com ramais monofásicos e bifásicos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG. 2012.
- UNESP; FEIS. **Segurança em Eletricidade: Normas e Conduta em Experimentos com Risco Potencia de Acidente**. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/normas-de-conduta-laboratorio-ensino.pdf>>. 2006. Acesso em 08 nov. 2018.
- VICTORIA. **High Voltage Network Assets Program**. Disponível em: < <https://www.energy.vic.gov.au/electricity/powerline-replacement-fund/powerline-bushfire-safety-program/network-assets-program/high-voltage-network-assets-program>>. 2018. Acesso em 22 nov. 2018.
- WILLHEIM, R.; WATERS, M. **Neutral Grounding in High-Voltage Transmission**. 1956. New York, Estados Unidos: Elsevier, 1956.

APÊNDICES

Apêndice 1 – Conversa com Mauro Sergio Silveira

22/11/2018

Mail - Lucas Caetano - Outlook

RE: TCC_Lucas Caetano

Mauro Sergio Silveira <mauro.silveira@rgesul.com.br>

Fri 2018-11-16, 10:09

To: Lucas Caetano <lcassouzacaetano@hotmail.com>

Cc: pedro.laguardia@engenharia.ufjf.br <pedro.laguardia@engenharia.ufjf.br>

Bom dia, Lucas

Essa informação é bastante difícil de se obter, pois nem todos os acidentes que ocorrem com a comunidade chegam ao nosso conhecimento. Principalmente aqueles que não ocasionam sequer desligamento da rede.

Mas respondendo a sua pergunta com as informações que possuo, até o momento não tenho nenhum relato de acidente envolvendo as redes de média tensão das subestações onde têm os aterramentos ressonantes instalados e em operação.

Atenciosamente

Mauro Sergio Silveira

Engenheiro de Gestão de Ativos
Coordenação de Gestão de Ativos
RGE Sul . São Leopoldo . RS
Tel +55 51 3579 6337
www.rgesul.com.br

From: Lucas Caetano [mailto:lcassouzacaetano@hotmail.com]

Sent: Monday, November 12, 2018 9:52 AM

To: Mauro Sergio Silveira

Cc: pedro.laguardia@engenharia.ufjf.br

Subject: TCC_Lucas Caetano

Bom dia Mauro, tudo bem?

Não sei se ainda se lembra de mim, conversei contigo sobre seu trabalho de aterramento ressonante na antiga AES Sul alguns meses atrás, e que iria o cita-lo no meu TCC. Se não for incômodo, gostaria de tirar mais uma dúvida:

Nos seus documentos que tive acesso (artigo de 2015 e TCC de 2013) a AES Sul ainda não havia dados que comprovassem a melhora da segurança humana das redes (redução da corrente de choque pela ação do GFN), pois ainda não havia relatos de acidentes nas instalações. Eu conseguiria de alguma maneira obter essa informação para enriquecer meu trabalho?

Agradeço desde já.