

# Proteção para Fontes Delta Não Esperadas

Ken Behrendt  
*Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Apresentado na  
57th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference  
Atlanta, Georgia  
7–9 de maio de 2003

Originalmente apresentado na  
29th Annual Western Protective Relay Conference, outubro de 2002

Traduzido para o português, fevereiro de 2017

# PROTEÇÃO PARA FONTES DELTA NÃO ESPERADAS

---

Ken Behrendt  
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.  
New Berlin, WI USA

## RESUMO

As empresas concessionárias de energia elétrica usam geralmente transformadores com conexão delta-estrela para alimentar as cargas de consumidores trifásicos conectados aos seus sistemas de transmissão e alimentadores da distribuição. Com a proliferação da geração distribuída instalada no local da carga do consumidor, esses transformadores delta-estrela tornam-se fontes de corrente de falta que podem ser difíceis de serem detectadas e isoladas. Diante de cenários com os piores casos, sem uma proteção adequada, a geração do consumidor pode manter energizado o circuito defeituoso da concessionária, mesmo após a abertura dos disjuntores da fonte da concessionária.

Este *paper* analisa várias técnicas usadas para detectar faltas provenientes de fontes delta. O artigo faz uma revisão da natureza das contribuições da corrente de falta e das características da tensão das fontes delta não aterradas, usando a análise das componentes de seqüência. O *paper* também discute o possível impacto dos sistemas de controle do gerador distribuído e a proteção da interconexão. Dispondo dessas informações, os engenheiros das concessionárias de energia elétrica e seus consumidores podem determinar os tipos de esquemas de controle e proteção que são necessários para garantir que as faltas sejam eliminadas corretamente, evitando os riscos de faltas não eliminadas.

## INTRODUÇÃO

As concessionárias de energia elétrica usam amplamente os transformadores delta-estrela nos seus próprios sistemas para conectar os sistemas de transmissão e subtransmissão aos sistemas de distribuição e às cargas de grandes consumidores trifásicos. Esta configuração dos transformadores oferece diversos efeitos benéficos, incluindo a melhoria do balanceamento de cargas e o bloqueio da circulação da corrente de seqüência-zero, o que simplifica a proteção de faltas à terra.

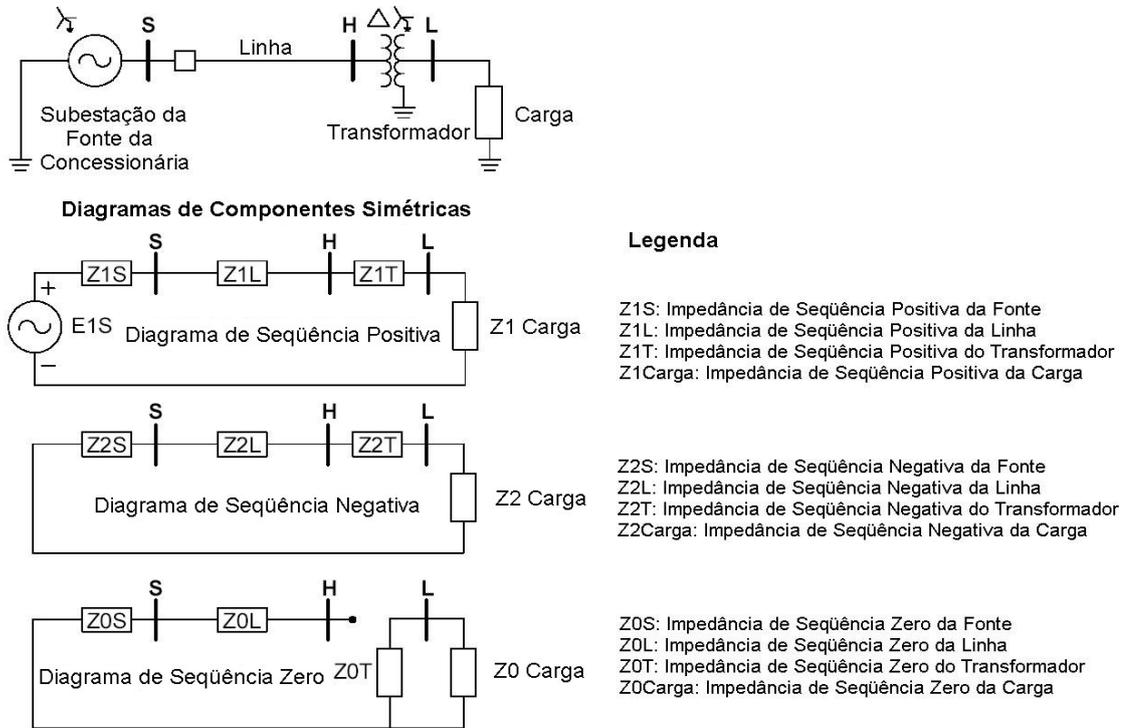
A Figura 1 mostra um diagrama unifilar simplificado representando uma conexão típica de uma subestação da fonte de uma concessionária com a carga de um consumidor através de um transformador delta-estrela. O transformador delta-estrela pode estar localizado em uma subestação da distribuição da própria concessionária ou em uma subestação pertencente ao consumidor. A linha pode ser radial, conforme mostrado nessa figura, ou pode estar conectada a uma outra subestação fonte, com um transformador delta-estrela ligado em derivação na linha entre as duas subestações. A linha pode ainda alimentar cargas de outros consumidores ou outras subestações da concessionária. Um esquema de proteção, apropriado para detectar faltas na linha e abrir o disjuntor correspondente da linha, é instalado na subestação da fonte da concessionária.

A Figura 1 mostra também os diagramas das componentes de seqüência necessários para analisar as condições de faltas equilibradas e desequilibradas que ocorrem na linha da concessionária. Observe que a representação do transformador delta-estrela no diagrama de seqüência-zero possui um circuito aberto entre os terminais H e L. Esse circuito aberto impede a circulação da corrente de seqüência-zero através do transformador, o que é uma característica do transformador delta-estrela.

As equações fundamentais para obter as correntes de fase ( $I_A$ ,  $I_B$ , e  $I_C$ ) e as tensões fase-neutro ( $V_A$ ,  $V_B$ , e  $V_C$ ) são as seguintes:

$$\begin{aligned} I_A &= I_1 + I_2 + I_0 & I_B &= a^2 I_1 + a I_2 + I_0 & I_C &= a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \\ V_A &= V_1 + V_2 + V_0 & V_B &= a^2 V_1 + a V_2 + V_0 & V_C &= a V_1 + a^2 V_2 + V_0 \end{aligned}$$

Onde o operador da unidade  $a = 1 \angle 120$  graus.

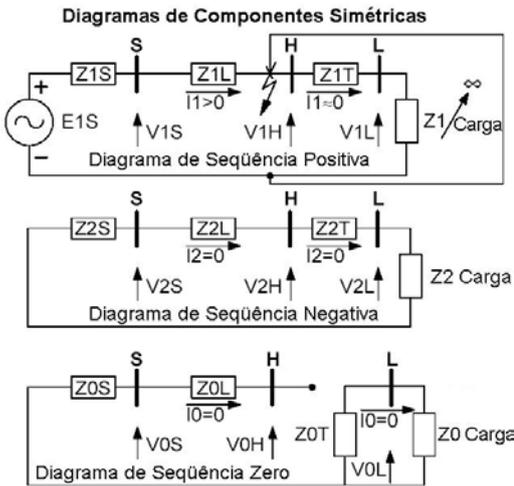
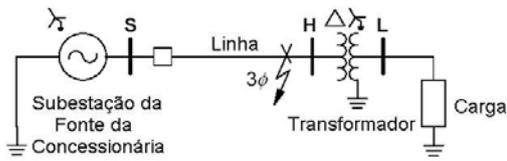


**Figura 1:** Fonte de uma Concessionária Típica para Alimentar a Carga de um Consumidor Através de um Transformador Delta-Estrela

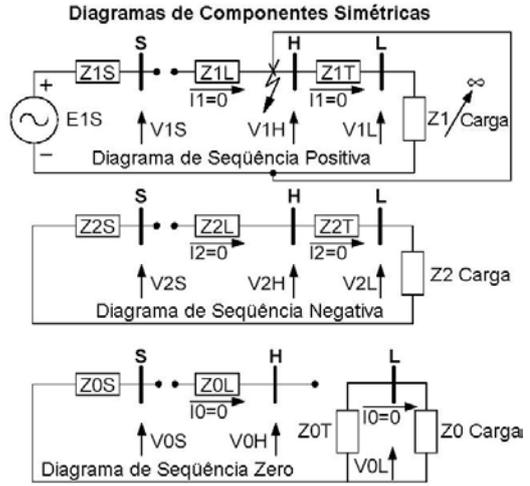
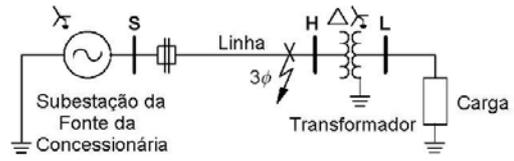
A Figura 2, Figura 4, e a Figura 6 mostram os diagramas unifilares simplificados e as conexões dos diagramas das componentes de seqüência adequados para faltas trifásicas, bifásicas e monofásicas, respectivamente, na linha da concessionária. Durante a falta, a corrente de seqüência que circula através da carga é significativamente menor do que a corrente de seqüência proveniente da fonte da concessionária para a falta, por duas razões. Primeiramente, a falta provoca o colapso da tensão de seqüência-positiva aplicada à carga, o que reduz a corrente através da impedância de carga passiva; em segundo lugar, a impedância da carga é significativamente maior do que as impedâncias da linha e da fonte da concessionária. Para todos os objetivos práticos, a impedância de carga é considerada infinita e é ignorada nos cálculos da corrente de falta.

Para simplificar a discussão, este artigo ignora um quarto tipo de falta, a falta bifásica-terra. Essa falta é uma combinação da falta fase-fase e da falta fase-terra. Os resultados da análise individual desses tipos de falta podem geralmente ser extrapolados para determinar o efeito de uma falta bifásica-terra.

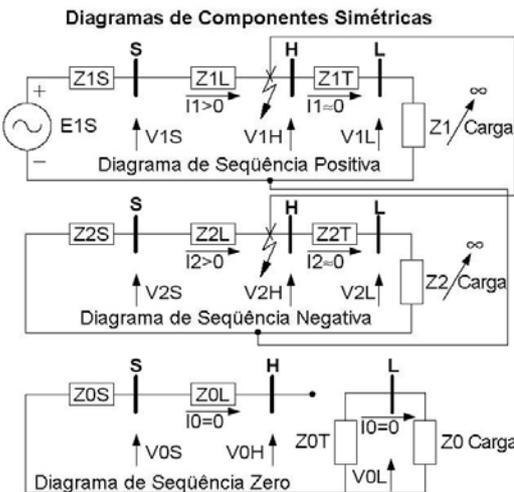
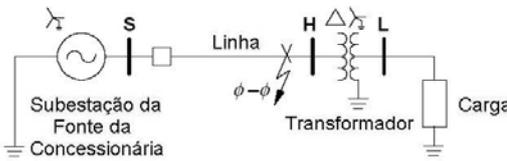
Quando somente a concessionária de energia elétrica estiver fornecendo alimentação para a carga do consumidor, faltas na linha entre a subestação da fonte da concessionária e o transformador delta-estrela são completamente isoladas quando ocorre a abertura do disjuntor da linha da fonte da concessionária, conforme mostrado na Figura 3, Figura 5, e Figura 7 para cada um dos tipos de falta. A análise de componentes simétricas das correntes e tensões da linha e do local da carga do consumidor mostra claramente que todas as correntes e tensões no sistema isolado são iguais a zero.



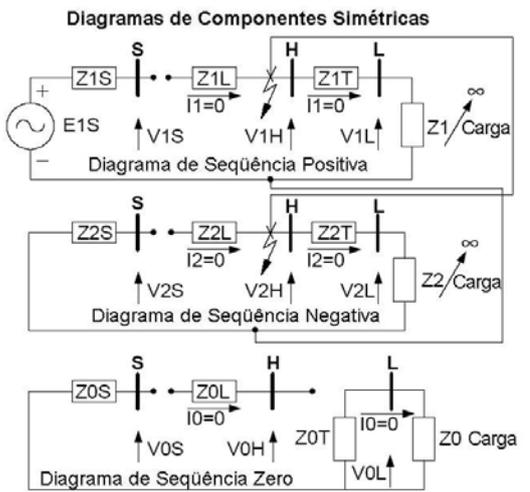
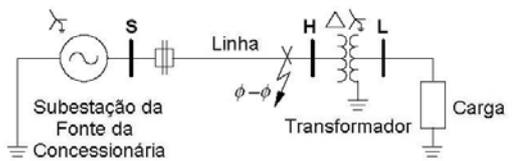
**Figura 2:** Falta Trifásica na Linha



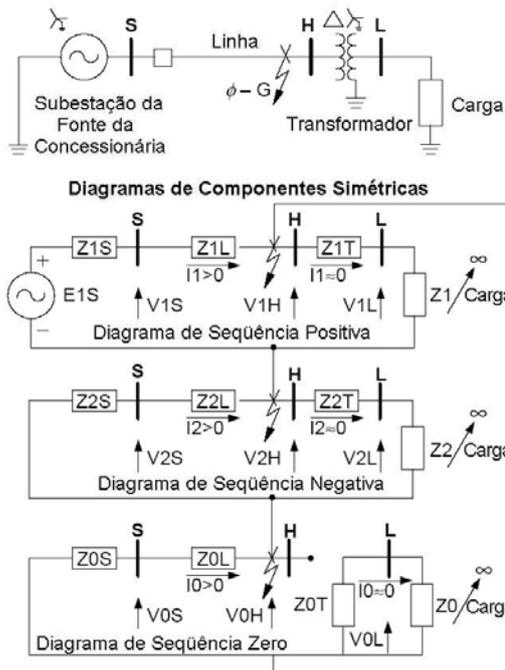
**Figura 3:** Falta Trifásica na Linha com o Disjuntor da Fonte da Concessionária Aberto



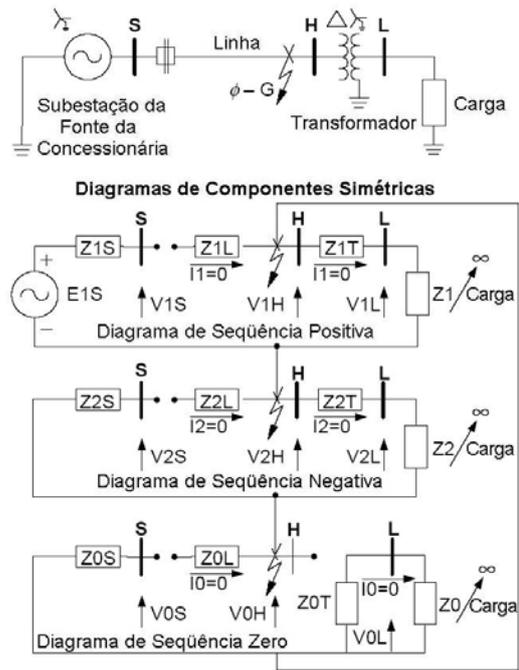
**Figura 4:** Falta Bifásica na Linha



**Figura 5:** Falta Bifásica na Linha com o Disjuntor da Fonte da Concessionária Aberto



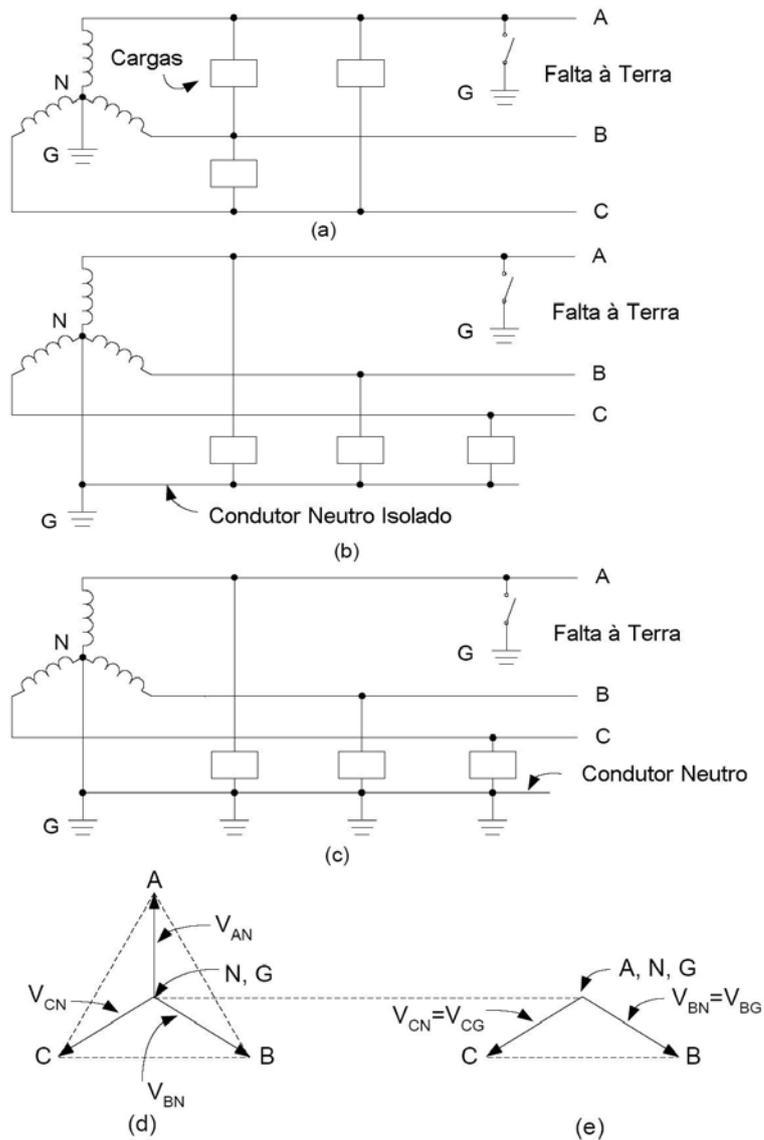
**Figura 6:** Falta Fase-Terra na Linha



**Figura 7:** Falta Fase-Terra na Linha com o Disjuntor da Fonte da Concessionária Aberto

A isolação é um conceito importante, amplamente adotado nos sistemas de energia elétrica para assegurar uma operação segura e confiável: segura sob o ponto de vista que os dispositivos de proteção desenergizam e isolam automaticamente os equipamentos defeituosos ou os condutores que caíram, visando proteger o povo em geral, bem como proteger as equipes de manutenção e operação da concessionária que são chamadas para efetuar reparos após tais ocorrências; confiável sob o ponto de vista que os consumidores esperam, e as agências reguladoras exigem, que a energia elétrica seja distribuída dentro de limites de tensão pré-estabelecidos para evitar danos e manter a operação correta dos equipamentos de uso dos consumidores. Falhas no sistema de potência, em sistemas aterrados, provocam quedas e oscilações de tensão significativas que violam esses limites pré-determinados. A isolação e a desenergização do elemento defeituoso do sistema de potência restabelece a distribuição de energia com qualidade adequada para a maioria dos consumidores e interrompe a distribuição de energia para os consumidores do circuito defeituoso. Nesse caso, alguns poucos consumidores sem energia é melhor do que muitos consumidores com qualidade inadequada de energia [6].

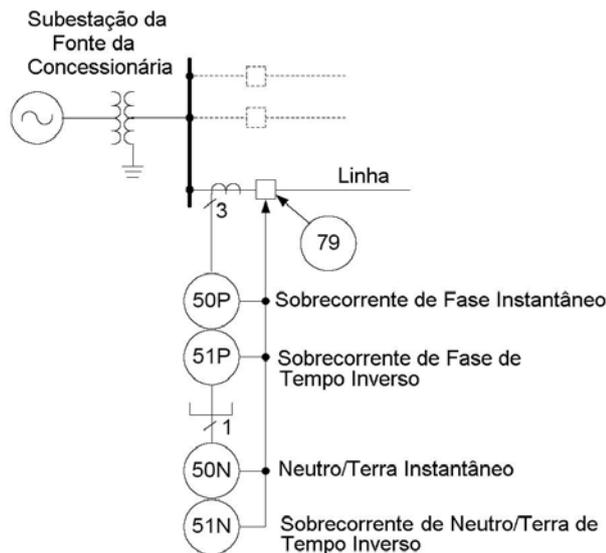
Um outro tópico importante é a relação entre o projeto e a operação do sistema de potência. Os equipamentos instalados em um circuito radial com uma fonte estrela solidamente aterrada, como no sistema do nosso exemplo, operam sempre dentro dos valores de tensão fase-terra estabelecidos durante condições normais equilibradas. Todos os tipos de falta tendem a provocar a diminuição da tensão fase-terra e fase-fase, mas nunca provocam o aumento da tensão. O sistema pode usar equipamentos conectados fase-terra que tenham sido projetados para a tensão nominal fase-terra. Os equipamentos conectados entre fases podem ser especificados para serem usados com tensão nominal entre fases. O triângulo de tensões normais que está mostrado no item (d) da Figura 8 define as tensões nominais de operação fase-terra e fase-fase para configurações a três e a quatro fios de um sistema solidamente aterrado. Conforme mostrado em (a), (b), e (c) da Figura 8, as cargas podem ser conectadas fase-fase ou fase-neutro nesse tipo de sistema [1].



**Figura 8:** Sistemas Solidamente Aterrados: (a) Sistema a Três Fios Aterrado em um Único Ponto, (b) Sistema a Quatro Fios Aterrado em um Único Ponto, (c) Sistema a Quatro Fios Aterrado em Múltiplos Pontos, (d) Diagrama Fasorial para Operação Normal, (e) Diagrama Fasorial Para uma Falta à Terra

Uma vez que um grande número de faltas no sistema de potência é representado por faltas temporárias, as concessionárias de energia elétrica frequentemente complementam o sistema de proteção de linhas com o esquema de religamento automático. O restabelecimento automático com sucesso limita a duração da interrupção de energia a apenas alguns ciclos para aqueles poucos consumidores afetados que estão sendo alimentados pela linha em falta. Se uma ou mais operações consecutivas do religamento automático forem sem sucesso, o circuito ficará desenergizado e fora de serviço até que as equipes técnicas possam inspecionar o circuito, encontrar o problema e efetuar os reparos necessários.

A Figura 9 mostra uma proteção de sobrecorrente não direcional típica (dispositivos 50 e 51) aplicada na subestação da fonte da concessionária para detectar faltas na linha e desligar o disjuntor da linha. Essa figura também mostra a função de religamento automático (dispositivo 79) usada para restabelecer automaticamente os serviços após faltas temporárias.



**Figura 9:** Proteção de Linhas Típica da Subestação da Fonte da Concessionária

## GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: CRIANDO UMA FONTE DELTA NÃO ESPERADA

A interconexão da “geração distribuída” com os circuitos de distribuição da concessionária de energia elétrica acrescenta uma nova complicação ao projeto e operação dos sistemas da concessionária. Tanto a concessionária quanto o proprietário da geração distribuída devem assegurar que a instalação seja projetada e construída para propiciar uma operação segura, confiável e econômica. A concessionária e o proprietário da geração distribuída devem juntos garantir que: (1) a operação da geração distribuída não prejudica ou causa danos à concessionária; (2) a operação não causa problemas para outros consumidores da concessionária; e (3) a segurança das equipes técnicas e do povo em geral não é colocada em risco pela operação da geração distribuída de propriedade do consumidor. Essas preocupações devem ser consideradas no projeto e na operação da interface concessionária/geração distribuída.

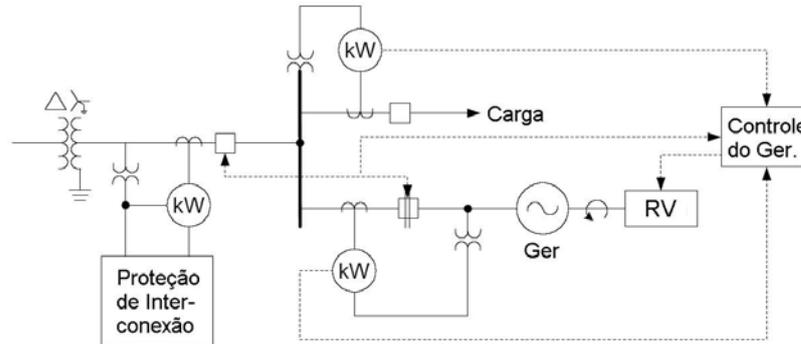
A Norma IEEE 1547 proposta, “*Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems*” (atualmente em processo de aprovação), especifica os padrões para interconexão que fornecem a máxima garantia de que nenhuma geração distribuída energizará inadvertidamente um sistema de energia elétrica desenergizado. Os fatores considerados foram a qualidade de energia e a segurança do povo em geral, sendo que a segurança dos trabalhadores da concessionária foi considerada um fator significativo, porém secundário. Os problemas criados pela presença de geração distribuída em um alimentador que necessita de manutenção ou reparo precisam ser considerados, bem como os fatores de coordenação com os sistemas de proteção da concessionária e do consumidor.

Normalmente, a geração de reserva de emergência não é conectada em paralelo com a fonte da concessionária, conforme mostrado na Figura 10(a), pois ela somente é necessária se a fonte da concessionária for aberta. Chaves de transferência intertravadas são controladas para abrir a fonte da concessionária antes do fechamento do disjuntor do gerador. Entretanto, testes periódicos de carga requerem que o gerador seja ligado em paralelo com o sistema de potência da concessionária por um curto período de tempo, ou que uma parte da carga do consumidor seja isolada de forma que possa ser conectada à geração para testes. O paralelismo de equipamentos pode, portanto, ser necessário para testes da geração de reserva de emergência.

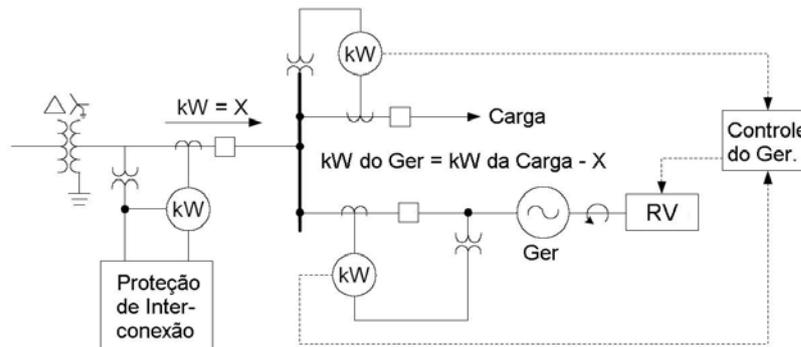
A geração com corte de pico é operada em paralelo com o sistema de potência da concessionária, conforme mostrado na Figura 10(b), pelo menos durante períodos de demanda

de pico, e é operada de forma a evitar a geração de mais energia do que o consumo da carga local, evitando assim o fluxo de potência reversa para o sistema da concessionária. É necessário o paralelismo dos equipamentos com o disjuntor do gerador para permitir o controle da geração sem afetar a operação da carga.

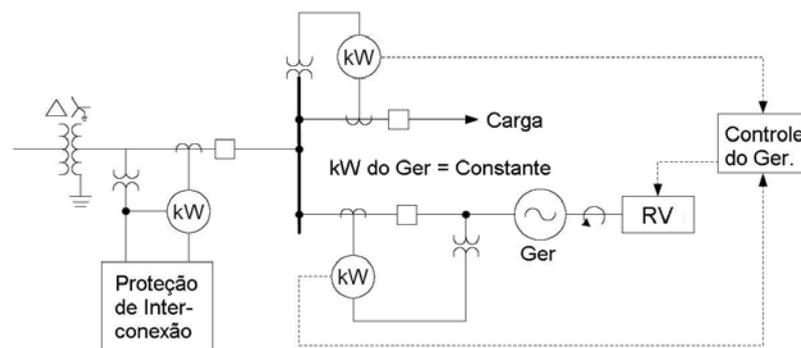
A geração com carga básica, onde a geração em excesso é vendida para a concessionária, é sempre operada em paralelo com o sistema de potência da concessionária, conforme mostrado na Figura 10(c). O paralelismo dos equipamentos com o disjuntor do gerador é também necessário para permitir o controle da geração sem afetar a operação da carga.



(a) Geração de *Backup*/Reserva de Emergência



(b) Geração com Corte de Pico



(c) Geração com Carga Básica

**Figura 10** Opções da Proteção de Geradores

Algumas concessionárias estão adotando a tendência para o uso da geração distribuída, pois isto possibilita que elas adiem a construção de usinas de energia de grande porte e de preço elevado, e adiem ou eliminem a necessidade de construir linhas de transmissão novas ou efetuar um *upgrade* nas existentes. Outras podem não apoiar tal fato, porém a

desregulamentação e outras mudanças nas leis reguladoras estão incentivando-as a aceitá-lo. Parece que a geração distribuída “chegou para ficar”.

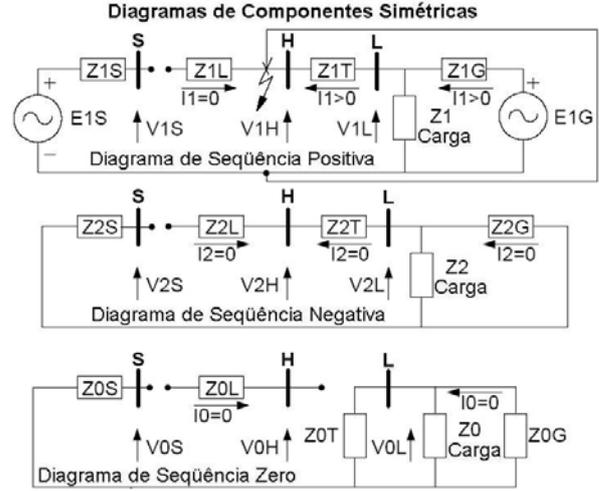
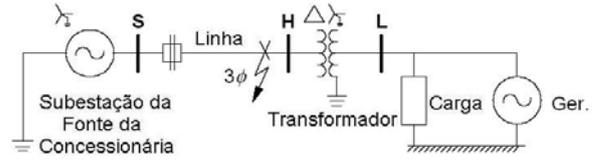
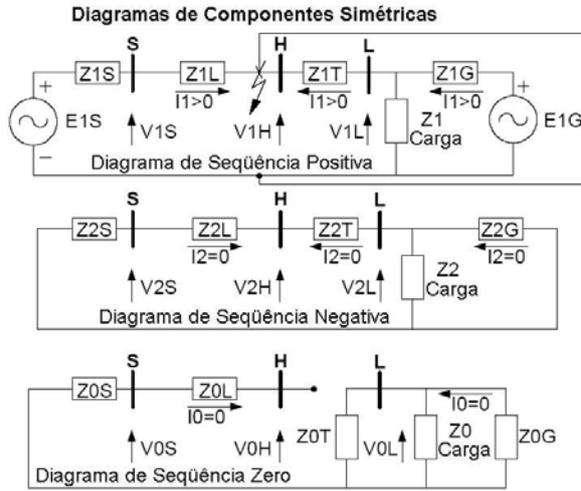
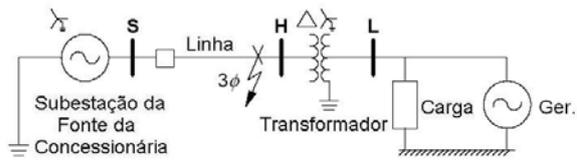
Nem todos os aspectos da geração distribuída são necessariamente favoráveis. Existem vários efeitos desfavoráveis que ocorrem na presença de uma falta na linha da fonte da concessionária. Este *paper* analisa esses problemas, dividindo a condição em dois estados: paralelo e ilhamento. Supõe-se que todas as condições tenham início no estado paralelo com o(s) disjuntor(es) da fonte da concessionária fechado(s), a geração alimentando parte ou toda a carga do consumidor e, se permitido, a geração em excesso alimentando também a carga da concessionária. O ilhamento ocorre quando o disjuntor da fonte da concessionária abre, deixando a geração distribuída, sua própria carga e a seção onde está conectada a carga da concessionária desconectados ou ilhados do resto do sistema.

O transformador de interconexão no local da geração distribuída tem um impacto significativo na operação no estado paralelo e no ilhamento, particularmente durante condições de faltas desequilibradas. Este *paper* discute as conseqüências da conexão de um transformador com delta no lado de alta/estrela no lado de baixa, pois ele é normalmente usado para alimentar cargas sem geração. Outras configurações dos enrolamentos de transformadores podem ser mais adequadas para alimentar cargas através da geração distribuída. Entretanto, não existe “a melhor” configuração de transformador ou padronização industrial. Cada configuração de transformador tem vantagens e desvantagens. O sistema deve ser projetado para maximizar as vantagens e minimizar ou eliminar as desvantagens.

Normalmente, não é economicamente viável substituir um transformador delta-estrela existente simplesmente porque a geração distribuída é instalada no lado da carga do transformador; portanto, vamos nos concentrar nos problemas que podem aparecer e em quais soluções que estão disponíveis para solucioná-los.

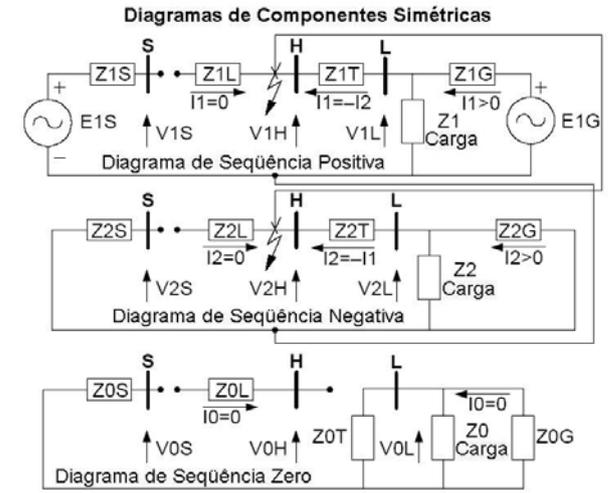
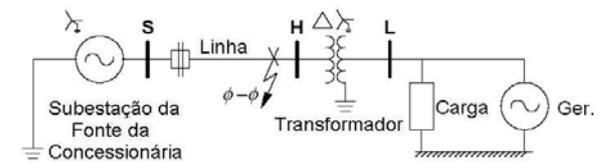
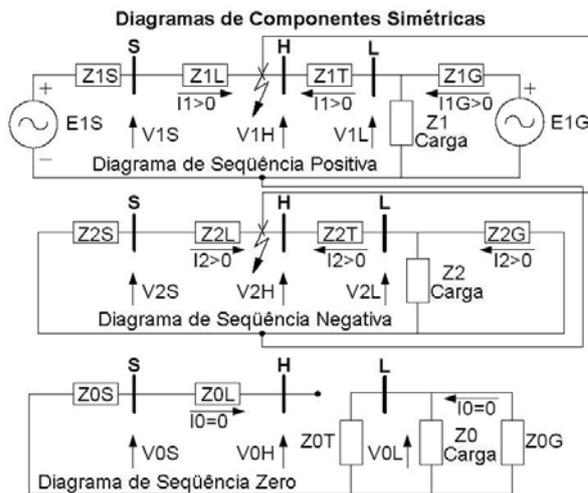
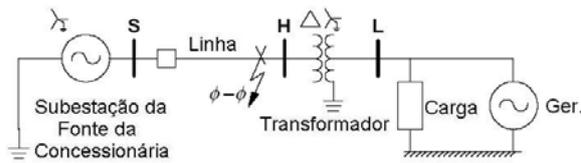
## **PROTEÇÃO PARA FALTAS NA LINHA**

Uma das conseqüências da geração distribuída é o efeito que ela tem na proteção de linhas. A adição da geração em paralelo com o sistema de potência da concessionária, no lado da carga do consumidor, além do transformador delta-estrela, faz com o transformador torne-se uma fonte de corrente de falta para faltas na linha da fonte da concessionária. A Figura 11, Figura 13, e a Figura 15 mostram os diagramas unifilares simplificados e as conexões apropriadas dos diagramas das componentes de seqüência para faltas trifásicas, bifásicas e monofásicas, respectivamente, na linha da concessionária, com a geração paralela operando no lado estrela do transformador delta-estrela. A Figura 12, Figura 14, e a Figura 16 mostram os diagramas unifilares simplificados e as conexões dos diagramas das componentes de seqüência para as mesmas faltas respectivas, após a abertura do disjuntor da linha da fonte da concessionária.



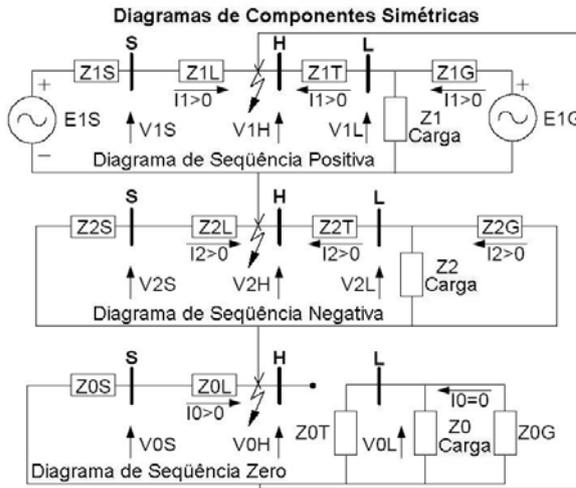
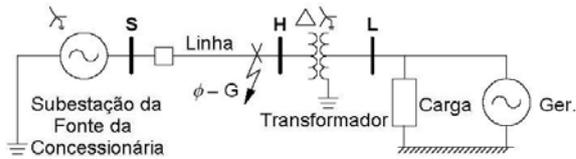
**Figura 11:** Falta Trifásica na Linha com Geração Distribuída Paralela

**Figura 12:** Falta Trifásica na Linha com Geração e Disjuntor da Fonte da Concessionária Aberto

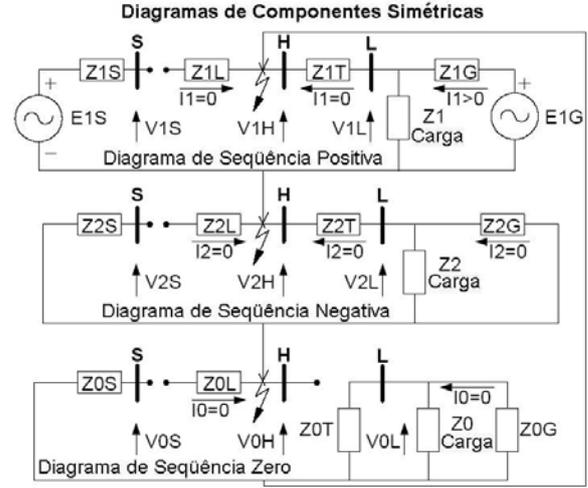
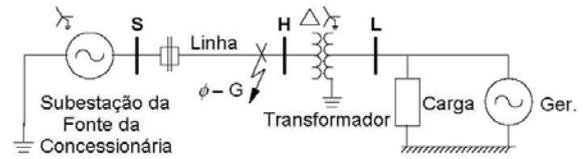


**Figura 13:** Falta Bifásica na Linha com Geração Distribuída Paralela

**Figura 14:** Falta Bifásica na Linha com Geração e Disjuntor da Fonte da Concessionária Aberto



**Figura 15:** Falta Fase-Terra na Linha com Geração Distribuída Paralela



**Figura 16:** Falta Fase-Terra na Linha com Geração e Disjuntor da Fonte da Concessionária Aberto

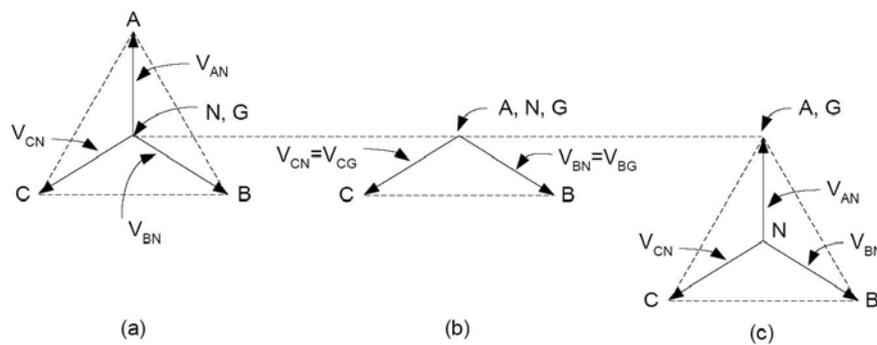
A análise de componentes simétricas nos mostra que o gerador distribuído contribui para a corrente de falta, através do transformador delta-estrela, para todos os três tipos de falta na linha, quando o disjuntor da fonte da concessionária está fechado e as duas fontes estão operando em paralelo. Para cada tipo de falta, o gerador contribui somente com corrente de seqüência-positiva, ou corrente de seqüência positiva e negativa, pois o enrolamento conectado em delta permite a circulação da corrente de seqüência positiva e negativa e bloqueia a circulação da corrente de seqüência-zero.

Com o disjuntor da fonte da concessionária aberto, o gerador somente contribui com corrente para faltas trifásicas e bifásicas na linha. Com a conexão para terra da fonte da concessionária isolada pelo disjuntor aberto, o enrolamento conectado em delta abre o caminho da corrente de seqüência-zero, bloqueando a circulação da corrente para faltas monofásicas na linha.

Não são muito evidentes as tensões na linha durante as condições de paralelismo e ilhamento. Durante a operação em paralelo, sem a presença de falta, o sistema solidamente aterrado da concessionária mantém as tensões de operação dentro dos limites do triângulo de tensões normais de operação, conforme mostrado na Figura 17(a). Se abrirmos a fonte da concessionária e operarmos no estado de ilhamento, a capacitância fase-terra inerente do transformador e da linha equilibra a tensão de fase quase equidistante do potencial de terra, novamente conforme mostrado na Figura 17(a). Um pequeno desbalanço pode ocorrer devido ao espaçamento desigual e aos condutores de linha não transpostos. Observe que esse desbalanço somente causa o desequilíbrio das tensões fase-terra e não afeta as tensões entre fases. Dessa forma, a tensão normal de seqüência-zero pode aumentar substancialmente quando o disjuntor da concessionária abrir. Durante condições de falta à terra, antes de o disjuntor da subestação da fonte da concessionária abrir, a tensão da fase em falta entra em colapso e as tensões das fases boas são mantidas próximas de seu valor nominal para condições sem falta, através da fonte efetivamente aterrada da concessionária, conforme mostrado na Figura 17(b). Por definição, a impedância de seqüência-zero de um sistema efetivamente aterrado deve ser igual ou menor do que três vezes a impedância de seqüência-positiva ( $X_0 \leq 3 \cdot X_1$ ). Sob condições correspondentes ao pior caso ( $X_0 = 3 \cdot X_1$ ), as tensões

boas fase-terra podem atingir 133% da nominal. Muitas subestações de fontes de concessionárias possuem fontes através de transformador delta-estrela que resultam na impedância de seqüência-zero da fonte igual ou menor do que a impedância de seqüência-positiva da fonte. Falta monofásicas próximas a essas subestações resultam em virtualmente nenhuma sobretensão nas fases boas.

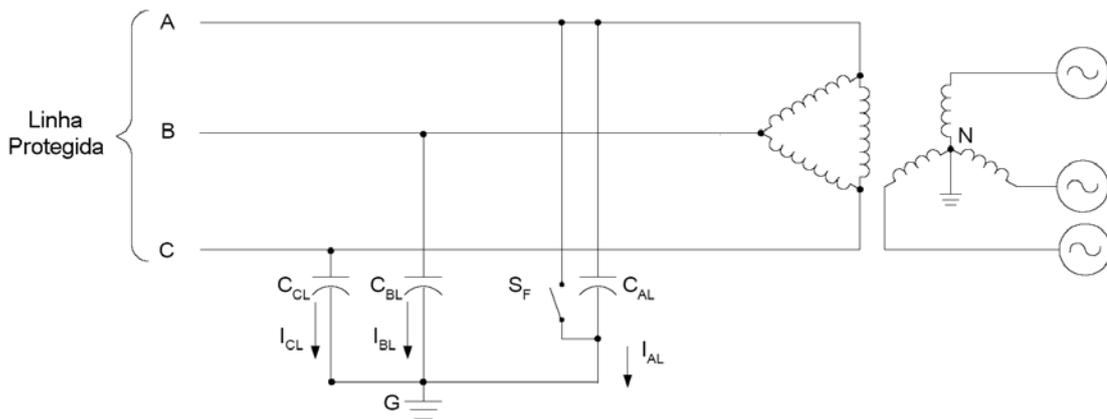
Se o disjuntor da fonte da concessionária abrir antes de a geração distribuída abrir, a linha será energizada somente através do transformador delta-estrela. Para esta condição, o enrolamento em delta bloqueia a circulação da corrente de seqüência-zero. Em alguns casos, a redução na corrente pode causar uma falta por arco que será auto extinta e a linha permanecerá energizada. Nos casos em que a falta por arco não é extinta, ou para uma falta sólida, a magnitude da corrente de falta é tão baixa (alimentada somente pela capacitância fase-terra distribuída da linha protegida) que é difícil de ser detectada pela simples medição das correntes de fase. Para essa condição de falta fase-terra, o neutro aparente é deslocado e estabelece o triângulo de tensão mostrado na Figura 17(c).



**Figura 17:** Diagramas Fasoriais de Tensão para o Sistema das Figuras 10 a 15: (a) Sistema sem Falta, (b) Sistema em Falta (Falta Sólida na Fase A,  $RF = 0$ ) Durante Operação em Paralelo, e (c) Sistema em Falta (Falta Sólida na Fase A,  $RF = 0$ ) Durante Operação em Ilhamento

O triângulo de tensão mostrado na Figura 17(c) tem ângulo e magnitude da tensão entre fases normal entre todas as fases. A magnitude da tensão fase-terra na fase defeituosa é zero. Entretanto, a magnitude da tensão nas duas fases boas aumenta até o equivalente a tensão entre fases, o que é aproximadamente 1,73 vezes a tensão fase-terra normal. Isto resulta em uma sobretensão em qualquer equipamento conectado fase-terra às duas fases boas. Os transformadores da distribuição conectados fase-terra, projetados para operar dentro de uma faixa de tensão normal fase-terra, podem saturar. Os pára-raios da classe de distribuição, também conectados fase-terra, podem conduzir. Esta condição gera problemas na qualidade de energia para os consumidores alimentados por esta linha e coloca os equipamentos em risco, podendo sofrer danos. Esta condição deve ser evitada, se possível, ou minimizada permanecendo o menor tempo possível, o que pode ser obtido através da abertura da geração distribuída o mais rápido possível.

Com a fonte da concessionária desconectada, você pode esperar que uma falta à terra por arco temporária seja auto extinta, pois a única fonte importante de corrente de falta foi removida. Entretanto, a corrente continua a circular na falta à terra devido à capacitância inerente do circuito, conforme mostrado na Figura 18 [1]. Se o fluxo da corrente capacitiva na falta à terra por arco for menor do que alguns poucos amperes, a falta pode ser auto extinta. Fluxo de corrente capacitiva maior do que alguns amperes tem a probabilidade de não ser auto extinto devido às tensões transitórias elevadas de restabelecimento associadas às correntes capacitivas. Linhas aéreas longas, ou linhas com cabos subterrâneos consideráveis, são propensas a ter corrente de carga suficiente para impedir a auto extinção da falta.



**Figura 18:** A Corrente Capacitiva Circula numa Falta à Terra em um Sistema com uma Fonte Não Aterrada.

A geração distribuída deve ser desligada, ou isolada da linha da concessionária, para eliminar o arco da falta à terra associada à fonte delta. Se o disjuntor da fonte da concessionária religar automaticamente sobre uma falta à terra por arco, uma elevada corrente de falta é restabelecida através do caminho do arco pela terra, e os relés de sobrecorrente da fonte da concessionária novamente atuam e desligam o disjuntor da fonte da concessionária. No fim, isto leva a uma interrupção permanente de energia para o que seria, de outra forma, uma falta temporária com restabelecimento automático com sucesso do circuito.

## SOLUÇÕES PARA ABERTURA

Existem várias soluções disponíveis para desligar a geração distribuída quando de faltas na linha da fonte da concessionária. Normalmente, as escolhas incluem:

- Esperar pela abertura do disjuntor da fonte da concessionária, e desligar a geração através de uma proteção de ilhamento no ponto de interconexão.
- Aplicar uma proteção para detecção de faltas no ponto de interconexão com a geração distribuída para desligar a geração, ou o disjuntor de interconexão, quando de faltas na linha.
- Efetuar transferência de trip para a geração distribuída a partir da subestação da fonte da concessionária através de um link de comunicação.

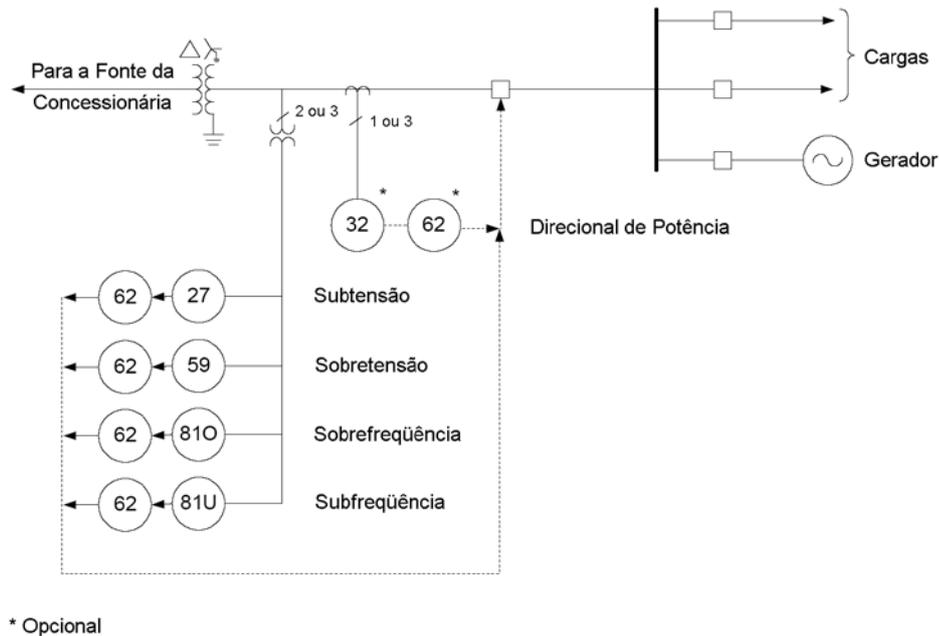
### Proteção de Ilhamento

A proteção de ilhamento baseia-se na variação da relação entre a capacidade da geração distribuída e a carga conectada na “ilha” isolada; tal condição provoca uma queda rápida da frequência se a carga for maior do que a geração ou uma elevação rápida da frequência se a geração exceder a carga conectada. Por outro lado, a magnitude da tensão pode não ser alterada de forma significativa devido à variação na relação geração/carga.

Faltas trifásicas e bifásicas na linha podem causar queda significativa da tensão em mais de uma fase, o que as torna relativamente fáceis de serem detectadas através da proteção de subtensão. Faltas monofásicas, entretanto, podem apresentar um problema. Conforme foi abordado anteriormente, a geração distribuída não contribui para faltas monofásicas na linha com o disjuntor da fonte da concessionária aberto. Uma condição de subtensão existe e pode causar a atuação da proteção da fonte da concessionária para abrir o disjuntor da linha, porém

em seguida a tensão pode retornar a valores próximos dos normais no lado secundário do transformador delta-estrela.

Uma proteção típica de ilhamento está mostrada na Figura 19. Esses elementos do relé são normalmente ajustados um pouco acima e abaixo das faixas de operação nominal de tensão e frequência para detectar condições anormais de operação. Pequenos intervalos de tempo de um segundo ou menos são normalmente usados para ajudar a suportar os transitórios de curta duração de tensão e frequência causados por faltas no sistema de potência além da linha da subestação da fonte da concessionária ou nos circuitos de carga localizados dentro das instalações do consumidor.



**Figura 19:** Proteção de Ilhamento Básica

A Norma IEEE P1547 proposta (minuta #10\*) inclui os requisitos para resposta do sistema de interconexão apresentados na Tabela 1 [2].

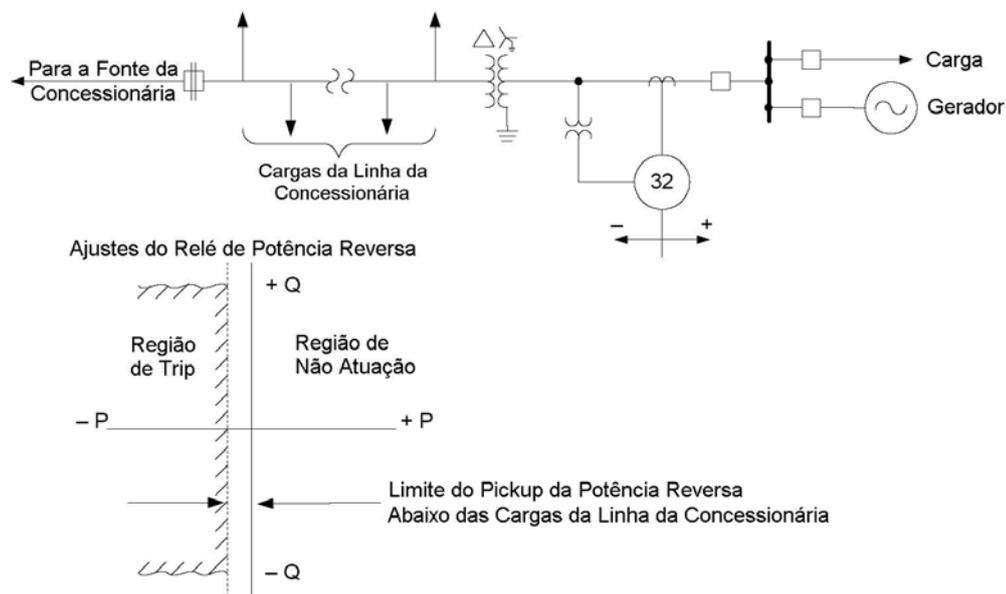
**Tabela 1: Requisitos para Resposta do Sistema de Interconexão IEEE P1547**

| <b>Resposta às Tensões Anormais*</b>               | <b>Tempo de Abertura*</b> |
|--|---------------------------|
| Tensão menor do que 50%                            | 0,16 segundo ou menos     |
| Tensão entre 50% e 88%                             | 2 segundos ou menos       |
| Tensão entre 110% e 120%                           | 1 segundo ou menos        |
| Tensão maior do que 120%                           | 0,16 segundo ou menos     |
| <b>Resposta à Frequência Anormal (Base 60 Hz)*</b> | <b>Tempo de Abertura*</b> |
| Frequência maior do que 60,5 Hz                    | 0,16 segundo ou menos     |
| 59,8 Hz a 57,0 Hz (ajustável)                      | Temporização ajustável    |
| Frequência menor do que 57,0 Hz                    | 0,16 segundo ou menos     |

\* Consultar a minuta mais recente para modificações e detalhes completos

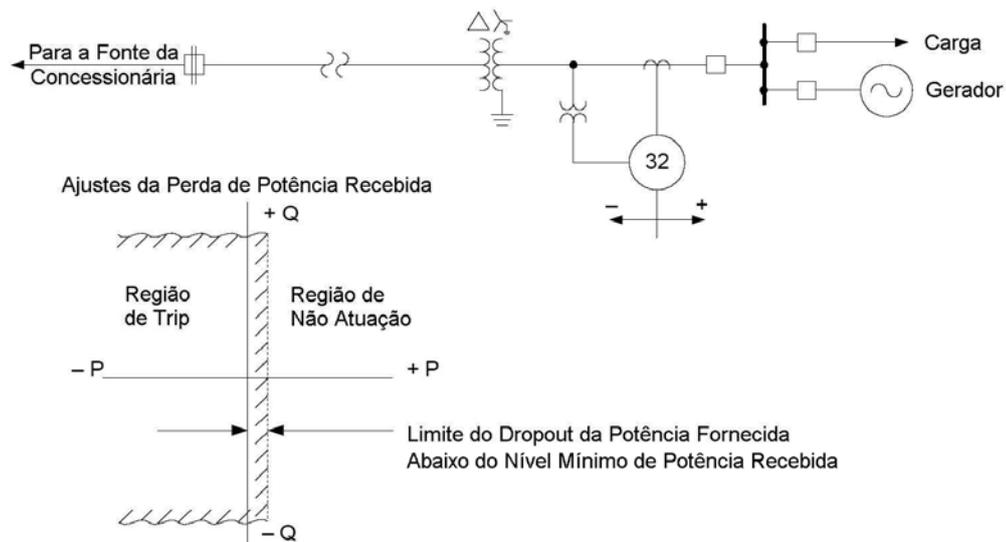
Os relés microprocessados com elementos múltiplos de tensão e frequência são atualmente muito usados para propiciar proteção de ilhamento básica com vários níveis de ajuste. Valores limites de ajustes sensíveis com temporizações maiores e valores limites de ajustes menos sensíveis com temporizações menores são comuns. Tais esquemas permitem uma resposta rápida para excursões extremas a partir das condições nominais de operação e respostas mais lentas e mais seguras para aquelas condições próximas das faixas de operação normal.

Os relés de potência reversa podem ser acrescentados para complementar os relés de frequência e de sobre/subtensão nos locais em que a interconexão tenha, normalmente, um nível de potência recebida da rede. Os relés de potência reversa podem também ser adicionados quando a interconexão, normalmente, envia potência e a linha da concessionária tenha carga suficiente conectada para atuar o relé de potência reversa durante condições de ilhamento. A Figura 20 mostra a aplicação de um relé de potência direcional opcional para detectar ilhamento usando o limite de *pickup* de potência reversa que é menor do que a mínima carga da linha da concessionária.



**Figura 20:** Aplicação do Relé de Potência Direcional Opcional para Detectar Ilhamento Através da Carga da Linha da Concessionária

A Figura 21 mostra a aplicação de um relé de potência direcional opcional para detectar o ilhamento quando a potência recebida cair abaixo do nível mínimo de potência recebida.



**Figura 21:** Aplicação do Relé de Potência Direcional Opcional para Detectar Ilhamento Através da Perda da Potência Recebida

### O Efeito do Controle do Gerador na Proteção de Ilhamento

Os controles do gerador são fornecidos com a geração distribuída e conjuntos de manobra associados para controlar a operação de cada gerador de forma a atender os objetivos dos consumidores. Alguns dos métodos mais comuns estão descritos abaixo, juntamente com o impacto que eles podem ter na operação ilhada.

#### Método de Reserva de Emergência

O controle do gerador pelo método de reserva de emergência é projetado para restabelecer o serviço de alimentação das cargas de consumidores importantes quando da perda da fonte da concessionária. A perda da tensão da concessionária é usada para partir automaticamente a geração de *backup* de emergência e operar os disjuntores ou chaves de transferência para transferir a carga do consumidor que é alimentada pela fonte da concessionária para a geração, através de uma transição de chaveamento com abertura antes do fechamento (aberto). Normalmente, a geração não é colocada em paralelo com a fonte da concessionária, exceto durante alguns ciclos quando, após o restabelecimento da fonte da concessionária, a carga é transferida de volta para a fonte da concessionária através de uma transição de chaveamento com fechamento antes da abertura (fechado). Nenhuma proteção especial na interconexão é necessária ou justificada para a geração de reserva de emergência, a qual não fica, por definição, em paralelo com a fonte da concessionária por mais do que uns poucos ciclos.

#### Método do Corte de Pico

A geração distribuída usada para corte de pico alimenta uma porção da carga do consumidor, nivelando e mantendo, dessa forma, a carga alimentada pela concessionária. Por exemplo, se a carga máxima do consumidor for de 1000 kW e o gerador tiver capacidade de 500 kW, o controle de corte de pico pode ser ajustado para limitar a alimentação da concessionária em 500 kW. O controle de corte de pico vai ajustar automaticamente a saída de quilowatts do gerador para manter o fornecimento da concessionária no patamar de 500 kW.

Neste método, o gerador está sempre fornecendo menos potência do que a demanda da carga do consumidor. Quando ocorre a perda da fonte da concessionária, a condição de déficit de geração imediatamente provoca a queda da frequência, o que deve acionar a proteção de ilhamento para abrir o(s) gerador(es) ou o disjuntor principal da interconexão.

## Método da Carga Básica

No método da carga básica, a saída de potência de cada gerador é fixada em um valor até o seu valor nominal máximo contínuo de quilowatts. O controle monitora a saída de quilowatts do gerador e controla o fornecimento de combustível da turbina para manter constante a saída de quilowatts da máquina. Quando ocorre a perda da fonte da concessionária, a variação na relação entre a saída da geração e a carga existente imediatamente resulta em uma alteração da frequência. A frequência aumenta se houver geração em excesso (consumidor estava exportando potência) e a frequência cai se houver déficit de geração (consumidor estava importando potência). O controle não efetua nenhuma tentativa de controlar a frequência.

## Método *Droop*

*Droop* é definido como uma diminuição no ajuste da velocidade à medida que a carga aumenta. Sem *droop*, a ação do regulador de velocidade pode causar oscilações de velocidade instáveis. Operando no modo *droop*, o ajuste da velocidade cai à medida que a carga aumenta. Quando o regulador de velocidade atua para corrigir a queda na velocidade causada pelo aumento da carga, ele corrige alterando para um ajuste menor da velocidade, o que evita o disparo da velocidade. Um valor de ajuste de 3% a 5% para o *droop* é comum. Baseando-se num ajuste de 5% para o *droop*, o aumento do ajuste da velocidade para 61,5 Hz vai gerar uma potência de saída de 50% a 60 Hz (frequência estabelecida e controlada pela concessionária). Se o ajuste da velocidade for aumentado para 63 Hz, a potência de saída será de 100%. Se a frequência da concessionária variar, o montante da potência de saída vai variar inversamente. Se a frequência da concessionária aumentar, a linha da característica *droop* vai cortar a linha da maior frequência da concessionária perto da potência zero e produzir uma potência de saída menor. Se a frequência da concessionária diminuir, a linha da característica *droop* vai cortar a linha da menor frequência da concessionária longe do zero, produzindo uma potência de saída maior [7].

## Método Isócrono

Um gerador operando no modo isócrono tenta manter a frequência constante. Uma única máquina, operando como uma unidade isolada, pode ser operada no modo isócrono. Uma máquina em um grupo de máquinas operando em um sistema isolado pode ser operada no modo isócrono. As outras máquinas são geralmente operadas no modo *droop*. A máquina no modo isócrono é considerada a máquina *swing*, a qual altera sua potência de saída para controlar a frequência do sistema. O sistema da concessionária é considerado a máquina *swing* para geração distribuída operada em paralelo com o sistema da concessionária. Quando conectada em paralelo com a concessionária, a geração distribuída não deve ser operada no modo isócrono. Entretanto, quando o disjuntor da interconexão é aberto, um dos geradores distribuídos é normalmente chaveado para o modo isócrono.

## **Detecção de Falhas no Ponto de Interconexão**

### **Proteção da Interconexão**

A Figura 22 mostra um complemento do sistema de proteção que pode ser necessário para uma proteção completa da interconexão. Estas proteções atendem a diversos propósitos.

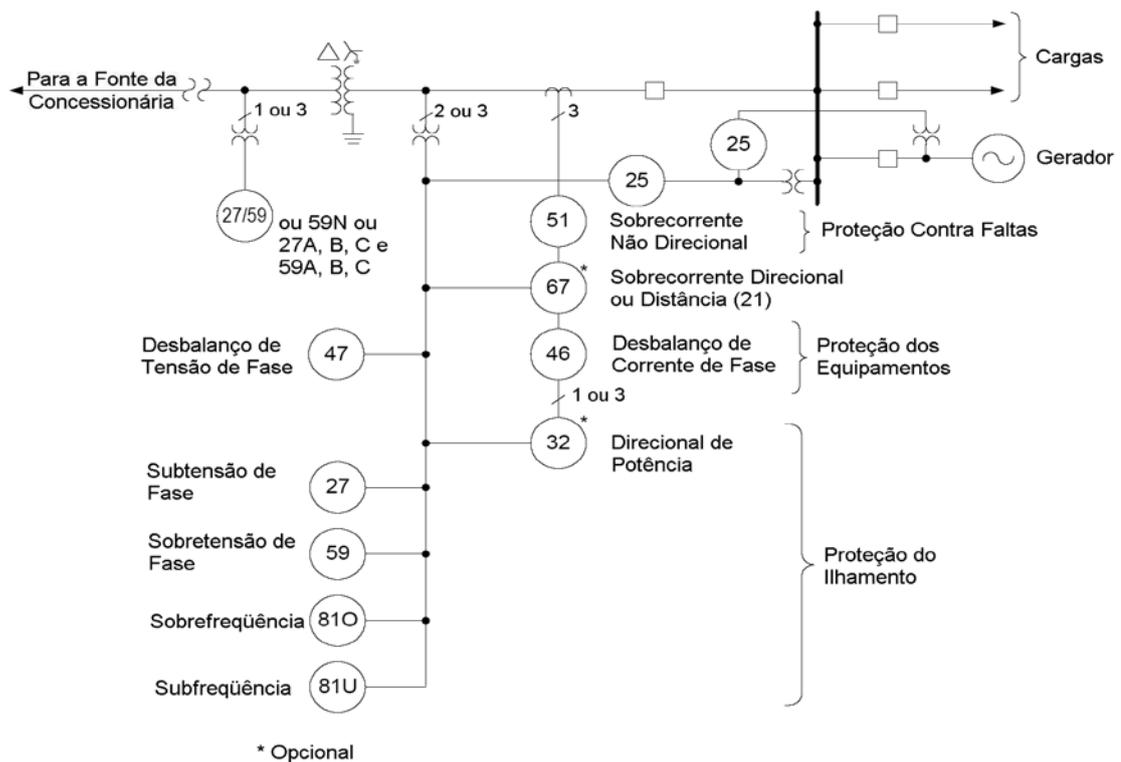
Sem geração distribuída, os relés de sobrecorrente não direcionais (dispositivo 51) são normalmente aplicados no disjuntor principal do lado de baixa tensão do transformador para detectar faltas na barra e nos alimentadores. Após a instalação da geração distribuída no lado do consumidor, a proteção de sobrecorrente não direcional ainda é necessária para detectar faltas na barra e nos alimentadores, mas pode não ter sensibilidade adequada para detectar a

contribuição de corrente do gerador, na direção reversa, para faltas internas no transformador e na linha da concessionária. A avaliação desta situação depende enormemente da contribuição de curto circuito disponível proveniente do gerador, e se outros elementos de proteção como desbalanço de corrente de fase (dispositivo 46), desbalanço de tensão de fase (dispositivo 47), subtensão de fase (dispositivo 27), ou sobretensão de fase (dispositivo 59) possuem sensibilidade suficiente para detecção de faltas e velocidade para desligar o disjuntor principal a tempo de evitar danos térmicos aos equipamentos que não estão sob falta, ou outras conseqüências indesejadas. A impedância do transformador delta-estrela limita a contribuição do gerador para faltas na linha da concessionária.

Se usados, os relés de sobrecorrente direcionais (dispositivo número 67) precisam detectar faltas no lado de alta tensão do transformador delta-estrela e fornecer proteção de *backup* para o transformador. Os relés de sobrecorrente direcionais de fase, se usados sozinhos, devem ser ajustados com sensibilidade suficiente para detectar faltas trifásicas, bifásicas e monofásicas no lado de alta tensão. Isto pode requerer ajustes extremamente sensíveis que vão limitar o fluxo de potência reversa, caso seja permitido. *Blinders*, ou controle de torque através da lógica de invasão do limite de carga (*load encroachment logic*), podem ser usados para manter os ajustes do relé de sobrecorrente direcional reverso de fase de alta sensibilidade e ainda acomodar o fluxo de carga reversa. O controle de torque via lógica de invasão do limite de carga também é útil para evitar a abertura para corrente na direção à frente durante condições de fator de potência adiantado.

Os elementos do relé de distância de fase, ajustados para ver na direção reversa, também podem ser usados no lugar dos relés de sobrecorrente direcionais de fase de alta sensibilidade, na direção reversa, onde um alcance fixo e uma melhor capacidade de carregamento são necessários. Os relés de distância de fase detectam faltas trifásicas e bifásicas através do transformador delta-estrela, mas não detectam faltas monofásicas. Além disso, faltas bifásicas no outro lado de um transformador delta-estrela podem ser consideradas pelos elementos dos relés de distância mho de fase como estando localizadas muito mais longe do que para uma falta trifásica no mesmo ponto [3]. Elementos de distância comparadores de fase fornecem um alcance consistente para ambas as faltas bifásica e trifásica, vindo através do transformador delta-estrela, e podem ser, portanto, uma melhor escolha.

Os relés de sobrecorrente direcionais reversos de seqüência-negativa podem ser usados para detectar faltas bifásicas e monofásicas no lado de alta tensão de um transformador delta-estrela, enquanto os relés de sobrecorrente direcionais reversos de fase podem ser usados para detectar as faltas trifásicas com magnitudes maiores. O elemento de sobrecorrente de seqüência-negativa é perfeitamente apropriado para uso com transformadores delta-estrela, pois a corrente de seqüência-negativa circula para todas as faltas desequilibradas. Entretanto, conforme discutido anteriormente, a corrente de seqüência-negativa circula somente para faltas à terra no lado de alta tensão enquanto o disjuntor da fonte da concessionária estiver fechado e contribuindo para a falta. Assim que o disjuntor da fonte da concessionária abrir, não há como detectar se a falta à terra no lado de alta tensão ainda existe através das técnicas de medição de corrente ou tensão no lado de baixa do transformador.

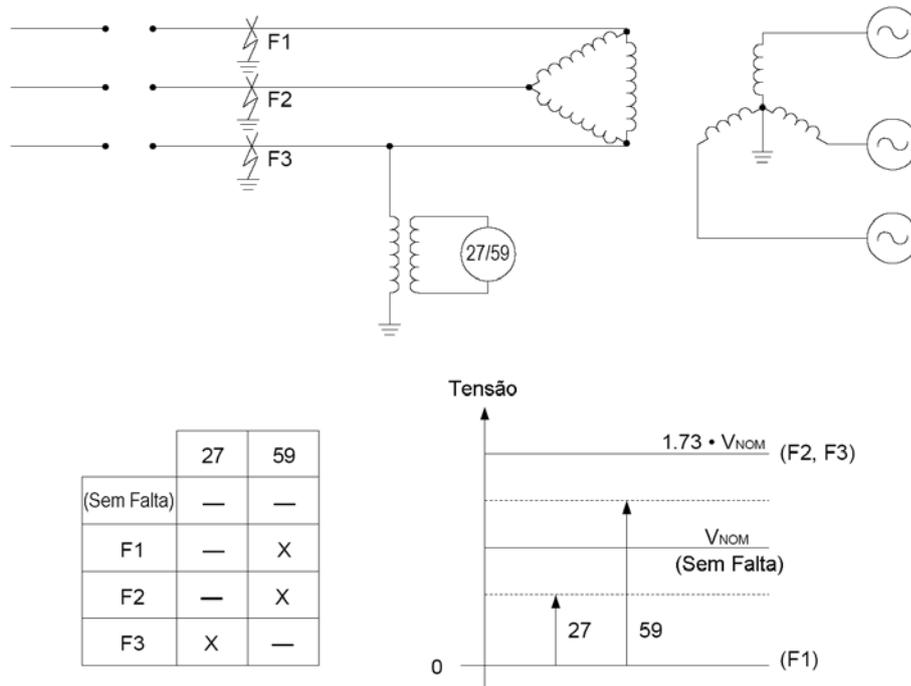


**Figura 22:** Proteção Típica da Interconexão com a Geração Distribuída

Para detectar faltas à terra sustentadas no lado de alta tensão de um transformador delta-estrela, TPs monofásicos ou trifásicos são necessários no lado de alta do transformador. Uma aplicação comum usando um transformador monofásico, conectado fase-terra, está mostrada na Figura 23. Esta aplicação usa um elemento do relé monofásico de sub/sobretensão (dispositivo 27/59) para detectar uma falta à terra. Conforme abordado anteriormente, a tensão da fase em falta é zero, e as tensões das fases boas são 1,73 vezes a nominal, quando alimentado por uma fonte delta. O elemento de subtensão pode ser ajustado em uma fração da tensão nominal, como por exemplo, 50%. O elemento de sobretensão pode ser ajustado acima da tensão nominal, como por exemplo, 130%. O elemento de subtensão atua se a falta estiver na mesma fase que a da conexão do TP, e o elemento de sobretensão atua se a falta estiver em uma das outras duas fases. Um temporizador é geralmente necessário para propiciar uma temporização de coordenação na saída do elemento de subtensão, pois a condição de subtensão pode ser o resultado de uma falta externa à linha da fonte da concessionária. Deve ser usada uma temporização suficiente para permitir a eliminação de faltas externas antes do trip. Não é necessária, porém, uma temporização estendida para coordenação do elemento de sobretensão, pois a tensão elevada sustentada acima do nível de *pickup* do relé de sobretensão somente pode ocorrer após a abertura do disjuntor da fonte da concessionária. Uma pequena temporização em torno de alguns ciclos deve ser suficiente para suportar quaisquer transitórios de tensão elevada causados por surtos devidos a descargas e chaveamentos. Aberturas rápidas podem ser obtidas para faltas nas duas fases em que o TP está conectado.

O transformador de tensão monofásico é exposto a 1,73 vezes a tensão nominal fase-terra, de forma que ele deve ser especificado para tensão entre fases, mesmo se for conectado fase-terra. Se a impedância de magnetização do transformador for aproximadamente a mesma que a reatância capacitiva shunt da fase correspondente, é possível ocorrer ferroressonância. A prática recomendada requer um resistor de carregamento conectado em paralelo com o relé de sub/sobretensão para amortecer oscilações ressonantes [5]. Observe que este esquema tem uma limitação significativa na sensibilidade para detecção de faltas à terra. Além disso, as

condições de queima do fusível do potencial são difíceis de serem diferenciadas das faltas à terra sólidas. São necessários TPs adicionais para superar essas limitações.



**Figura 23:** Detecção de Faltas Monofásicas

A Figura 24 mostra TPs trifásicos conectados em estrela/delta aberto. Com essa conexão, aparece uma tensão de seqüência-zero  $3V_0$  nos terminais dos enrolamentos do delta aberto (*broken delta*). Um simples elemento de sobretensão, 59N, conectado aos terminais do delta aberto, possibilita excelente detecção de faltas à terra. Sob condições normais, sem a presença de faltas, não há tensão na saída da conexão do enrolamento do delta aberto:

$$\begin{aligned}
 3V_0 &= V_A + V_B + V_C \\
 &= 1 \angle 0^\circ + 1 \angle -120^\circ + 1 \angle 120^\circ \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

Durante a operação em paralelo, uma falta à terra sólida gera 1 pu da tensão de seqüência-zero  $3V_0$  na conexão delta aberto:

$$\begin{aligned}
 3V_0 &= V_A + V_B + V_C \\
 &= 0 + 1 \angle -120^\circ + 1 \angle 120^\circ \text{ (considerando a falta na fase A)} \\
 &= 1 \angle 180^\circ
 \end{aligned}$$

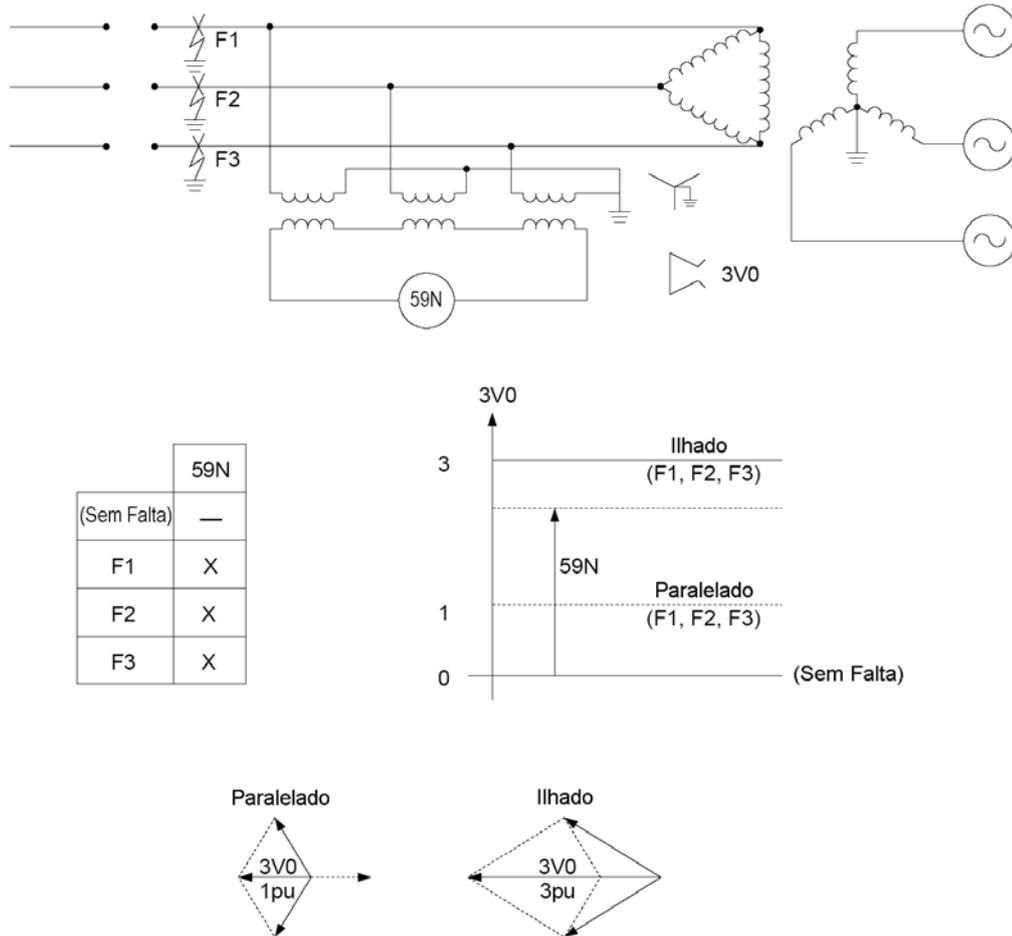
Durante a operação no estado de ilhamento, uma falta monofásica na linha gera 3 pu da tensão de seqüência-zero  $3V_0$  na conexão delta aberto:

$$\begin{aligned}
 3V_0 &= V_A + V_B + V_C \\
 &= 0 + 1,73 \angle -150^\circ + 1,73 \angle 150^\circ \\
 &= 3 \angle 180^\circ
 \end{aligned}$$

O ajuste do valor limite de *pickup* de 59N acima de 1 pu e abaixo de 3 pu propicia detecção segura para uma falta à terra sustentada durante uma condição de ilhamento. Não é necessária uma temporização estendida para coordenação, de forma que pode ser obtida uma abertura rápida para uma falta à terra em qualquer fase.

Cada um dos três transformadores de tensão monofásicos pode ser exposto a 1,73 vezes a tensão nominal fase-terra durante uma condição de ilhamento, de forma que eles devem ser especificados para tensão entre fases, mesmo se forem conectados fase-terra. Se a impedância de magnetização de cada transformador for aproximadamente a mesma que a reatância capacitiva shunt da fase correspondente, é possível ocorrer ferroressonância. A prática recomendada requer um resistor de carregamento conectado em paralelo com o relé 59N para amortecer oscilações ressonantes [5].

A conexão delta aberto dos TPs tem algumas desvantagens que justificam uma análise, porém não são relevantes a esta discussão. O Apêndice A inclui uma abordagem mais detalhada sobre a conexão delta aberto dos TPs.

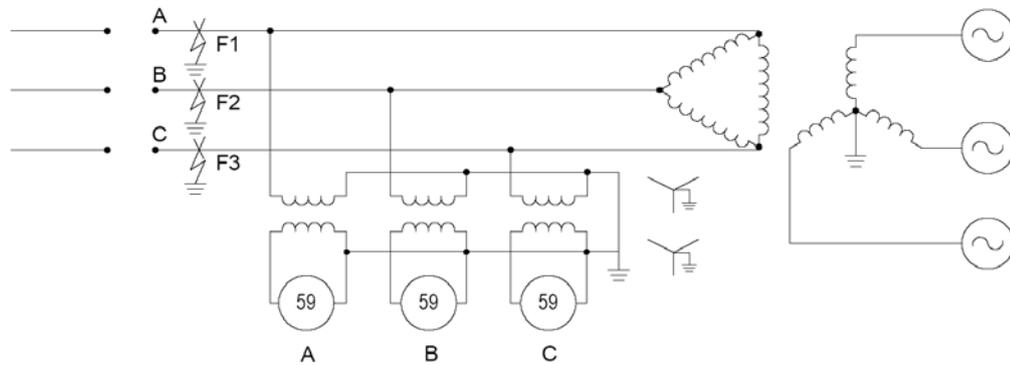


**Figura 24:** Detecção de Falhas Trifásicas à Terra com TP Conectado em Delta Aberto

A Figura 25 mostra TPs trifásicos conectados em estrela-estrela. Os elementos do relé de sobretensão de fase individuais (59A, 59B, e 59C) são conectados a suas respectivas fases no secundário. Para faltas à terra sólidas, esta conexão oferece a identificação da fase em falta através do conhecimento de quais fases são submetidas a uma tensão elevada durante uma condição de ilhamento. Esta proteção pode ser complementada com elementos de subtensão de fase individuais (27A, 27B, e 27C). Assim como nas duas conexões anteriores, não é necessária uma temporização estendida para coordenação, de forma que uma abertura rápida pode ser obtida para uma falta à terra em qualquer fase.

E, assim como na conexão anterior, cada um dos três transformadores de tensão monofásicos pode ser exposto a 1,73 vezes a tensão nominal fase-terra durante uma condição de ilhamento, de forma que eles devem ser especificados para tensão entre fases, mesmo se forem conectados fase-terra. Se a impedância de magnetização de cada transformador for

aproximadamente a mesma que a reatância capacitiva shunt da fase correspondente, é possível ocorrer ferroressonância. A prática recomendada requer um resistor de carregamento conectado a cada fase do secundário para amortecer oscilações ressonantes [5].



|             |    |      |
|-------------|----|------|
|             | 27 | 59   |
| (Sem Falta) | —  | —    |
| F1          | A  | B, C |
| F2          | B  | A, C |
| F3          | C  | A, B |

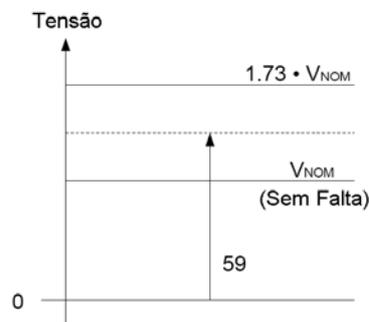
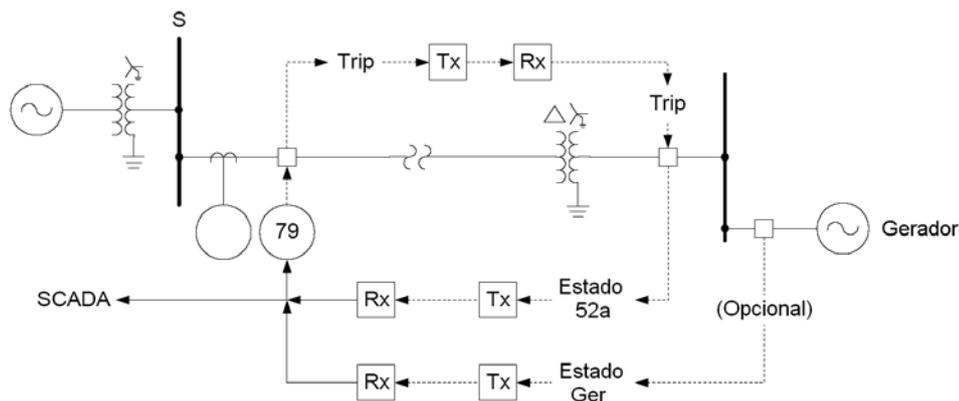


Figura 25: Detecção de Falta Trifásicas à Terra com Identificação da Fase em Falta

### Soluções Baseadas nas Comunicações

A comunicação entre a subestação da fonte da concessionária e o local da geração distribuída propicia *backup* para a proteção de ilhamento e assegura que a geração distribuída esteja realmente desconectada do sistema da concessionária antes de o disjuntor da fonte da concessionária ser religado, conforme mostrado na Figura 26. O link de comunicação é usado para a transferência direta de trip para o disjuntor principal da interconexão com o consumidor ou para o(s) disjuntor(es) do gerador quando houver o comando de abertura do disjuntor da fonte da concessionária. Na direção oposta, a informação do estado do disjuntor principal da interconexão com o consumidor e/ou do estado do disjuntor do gerador é transmitida para a subestação da fonte da concessionária para confirmar que a fonte da geração distribuída está isolada antes do religamento do disjuntor de linha da subestação. Essa informação pode também ser enviada para o sistema SCADA da concessionária para prover informações dos estados para os operadores da concessionária. Links de comunicação tradicionais necessários para atender este sistema de comunicação podem ser de custo elevado, porém novas e mais acessíveis opções de comunicação estão disponíveis.



**Figura 26:** Monitoração e Trip Através das Comunicações

Para distâncias curtas, o canal de comunicação através de fibra óptica oferece excelente velocidade e imunidade a elevação do potencial de terra e a interferência eletromagnética. A comunicação direta entre os relés de cada localidade pode ser estabelecida através dos transceptores de fibra óptica que são ligados diretamente na porta de comunicação dos relés selecionados ou nos dispositivos de entradas/saídas (I/O) remotas que podem ser conectados aos equipamentos através de contatos de entrada e saída convencionais.

A propagação através de espectros de rádio não licenciados pode ser uma outra opção se os dois pontos estiverem localizados a uma distância de 10 milhas um do outro, e se houver um caminho com visada direta (sem obstáculos) entre eles. A propagação através de espectros de rádio, embora não seja tão rápida quanto através de um canal de fibra óptica, tem uma velocidade razoável e uma excelente imunidade a elevação do potencial de terra e a interferência eletromagnética gerados por faltas no sistema de potência e transitórios de chaveamento. Os rádios são acessíveis pois a interface é direta com os relés selecionados e com os dispositivos de I/O remotas.

A propagação através de espectros de rádio licenciados ou outras faixas de rádio na largura da faixa de microondas licenciada podem também ser usadas. Elas oferecem maior potência de transmissão com uma faixa mais larga, porém com acréscimo significativo nos custos.

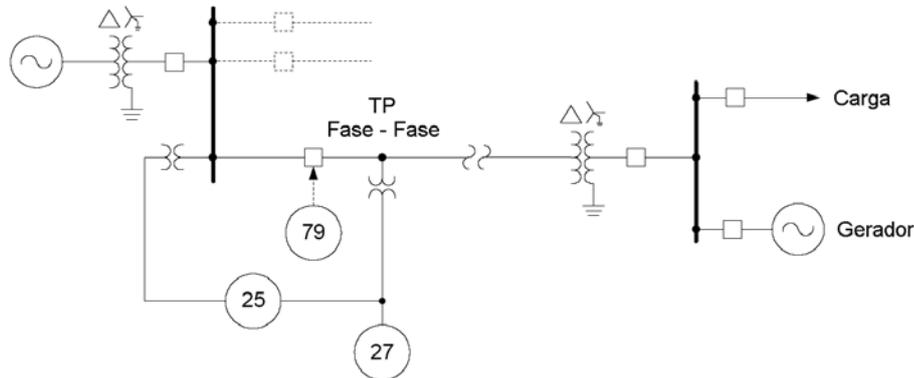
Os relés selecionados e os dispositivos de I/O remotas transmitem e recebem mensagens através de bits de dados codificados que representam o estado dos elementos internos dos relés, entradas ou saídas, o que torna fácil a definição das condições desejadas para monitoramento, abertura e religamento. Os relés e os dispositivos de I/O remotas possuem segurança na transmissão de mensagens para evitar trips falsos indesejados devidos às mensagens corrompidas.

Nos locais em que existem geradores de grande porte, algumas concessionárias têm optado por instalar Unidades Terminais Remotas (UTRs) do sistema SCADA (*SCADA Remote Terminal Units – RTUs*) no local do consumidor.

## RELIGAMENTO AUTOMÁTICO E VERIFICAÇÃO DE SINCRONISMO

As temporizações envolvidas no religamento automático da subestação da concessionária podem ter de ser estendidas para acomodar os tempos de abertura da proteção de ilhamento. Isto ajuda a garantir que o disjuntor de linha não religue antes de a geração distribuída estar desligada. Se um circuito de comunicação for usado para transferência de trip para a geração, conforme discutido anteriormente e mostrado na Figura 26, o mesmo circuito de comunicação pode ser usado para confirmar se a geração está desligada antes de permitir o fechamento do disjuntor.

A detecção de tensão na linha na subestação da concessionária é um outro método para verificar se a geração está fora de operação antes de uma tentativa de religamento automático ou manual. O método de detecção de tensão na linha através de um TP conectado fase-terra não é adequado, pois a linha pode ainda estar energizada através de uma falta monofásica na fase em que está sendo efetuada a detecção da tensão. Conforme abordado anteriormente, a falta à terra não eliminada suprime a tensão fase-terra em uma fase. Um TP conectado entre fases é necessário para determinar se a linha está energizada ou desenergizada, conforme mostrado na Figura 27.



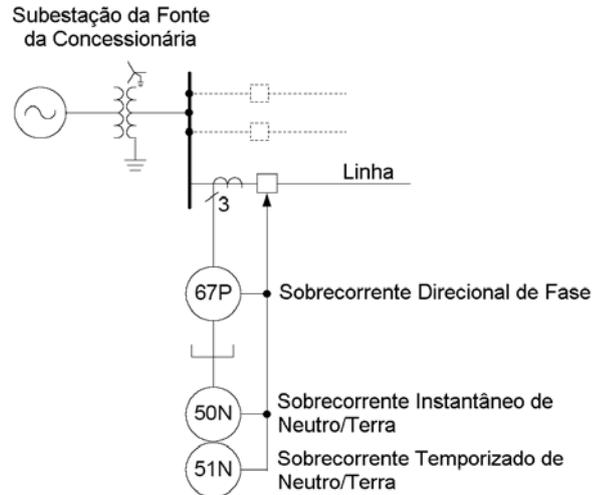
**Figura 27:** Religamento Automático e Verificação de Sincronismo na Subestação da Concessionária com Geração Distribuída Paralela

A tensão entre fases da linha pode também ser usada juntamente com a tensão da barra da subestação da concessionária para efetuar a verificação de sincronismo para o disjuntor da linha. Embora seja bastante improvável, se a geração distribuída ainda estiver ligada e operando próxima da velocidade síncrona, o elemento do relé de verificação de sincronismo vai permitir o fechamento do disjuntor se os dois sistemas estiverem dentro da janela da diferença de tensão e ângulo de fase permitidos pelos ajustes do relé de sincronismo. Um relé de verificação de sincronismo que compense a frequência de escorregamento e o tempo de fechamento do disjuntor é necessário se for desejado que o fechamento do disjuntor ocorra no ponto ideal (*top-dead-center*) para minimizar o impacto do fechamento nos sistemas assíncronos.

## PROTEÇÃO DE LINHAS DA SUBESTAÇÃO DA CONCESSIONÁRIA

O sistema de proteção de linhas radiais na subestação da concessionária normalmente inclui relés de sobrecorrente de fase e terra não direcionais, mostrados anteriormente na Figura 9. Os relés de sobrecorrente são ajustados para coordenar com os relés, religadores e chaves fusíveis localizados atrás (*upstream*) e à frente (*downstream*). A adição da geração distribuída paralela a uma linha radial altera a faixa das magnitudes da corrente de falta vista pelos relés de sobrecorrente de fase. Os relés de sobrecorrente de fase não direcionais podem precisar ser modificados ou substituídos por relés de sobrecorrente de fase direcionais, conforme mostrado na Figura 28, se a magnitude da corrente de falta reversa para faltas nas linhas adjacentes ultrapassar o valor de *pickup* dos elementos de sobrecorrente não direcionais. Os estudos de faltas que modelam a geração, as fontes da concessionária e as impedâncias do sistema precisam ser executados para determinar se os relés de sobrecorrente direcionais são necessários na subestação da fonte da concessionária.

O enrolamento em delta do lado de alta tensão do transformador de interconexão bloqueia a corrente de seqüência-zero, de forma que os relés de sobrecorrente de terra não direcionais não são afetados pela adição da fonte de geração distribuída à linha.



**Figura 28:** Proteção da Linha da Subestação da Fonte da Concessionária Através da Proteção de Linhas de Sobrecorrente Direcional

## CONCLUSÕES

A geração distribuída oferece soluções interessantes para os consumidores com cargas críticas ou para aqueles que querem um controle maior sobre a fonte de alimentação de energia elétrica de seu sistema. A conexão da geração distribuída aos sistemas da concessionária de energia elétrica pode criar sérios problemas que precisam ser considerados e solucionados em conjunto pela concessionária e pelo consumidor. Entre esses problemas está a criação de uma fonte de corrente de falta no transformador delta-estrela. Uma proteção para essa fonte delta “não esperada” deve ser providenciada para manter uma operação segura e confiável do sistema da concessionária. Este *paper* discute vários esquemas para detectar e isolar essas fontes delta. De forma geral, um ou mais dos seguintes esquemas de proteção são necessários para obter uma proteção apropriada:

1. A proteção de ilhamento, consistindo basicamente de relés de subtensão, sobretensão, subfrequência e sobrefrequência instalados no ponto de interconexão entre o sistema da concessionária e a fonte da geração distribuída, detecta o ilhamento, mas pode não operar rapidamente. Os métodos de controle do gerador dos tipos carga básica e corte de pico podem tornar mais eficaz a proteção de ilhamento permitindo uma maior excursão da frequência quando da abertura do disjuntor da fonte da concessionária.
2. A proteção de distância ou de sobrecorrente direcional no ponto de interconexão entre o sistema da concessionária e a fonte da geração distribuída pode detectar faltas na linha da fonte da concessionária, mas não pode detectar faltas à terra no lado de alta tensão de um transformador delta-estrela quando o disjuntor da fonte da concessionária estiver aberto.
3. A detecção de subtensão e/ou sobretensão no lado de alta tensão do enrolamento em delta de um transformador complementa a proteção de ilhamento e a detecção de faltas no lado de baixa tensão através da detecção de faltas à terra antes e depois da abertura do disjuntor da fonte da concessionária.
4. A transferência direta de trip, baseada nas comunicações, a partir da fonte da linha da concessionária para o local da geração distribuída fornece proteção de *backup* e

monitoração para assegurar que a geração distribuída esteja isolada ou desligada antes do religamento do disjuntor da fonte da concessionária.

As funções referentes a proteção adicional, religamento automático e verificação de sincronismo podem ser necessárias na subestação da fonte da concessionária. O consumidor que está instalando a geração e a concessionária devem discutir e chegar a um acordo sobre as alterações necessárias.

## REFERÊNCIAS

- [1] “Review of Ground Fault Protection Methods for Grounded, Ungrounded, and Compensated Distribution Systems”, Jeff Roberts, Dr. Hector J. Altuve, e Dr. Daqing Hou, Western Protective Relay Conference, outubro de 2001.
- [2] “Draft Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems”, IEEE P1547, Minuta #10.
- [3] Guia de Aplicação SEL 96-16, “Applying SEL Distance Relay on Lines With Power Transformers or Open Delta VTs”, Karl Zimmerman, 1996.
- [4] “Interconnection Protection of IPP Generators Using Digital Technology”, Charles J. Mozina, Minnesota Power System Conference, novembro de 1999.
- [5] “Protective Relaying, Principles and Practices”, J. Lewis Blackburn, Copyright 1987 by Marcel Dekker, Inc.
- [6] “Trip and Restore Distribution Circuits at Transmission Speeds”, Jeff Roberts, Karl Zimmerman, Western Protective Relay Conference, outubro de 1998.
- [7] “Governing Fundamentals (antigo TA-442)”, Woodward Industrial Controls, publicação 25195.

## BIOGRAFIA

**Ken Behrendt** recebeu seu *Bachelor of Science Degree* em Engenharia Elétrica da Michigan Technological University em 1970.

De 1970 a 1994, ele trabalhou na Wisconsin Electric Company nas áreas de Planejamento da Distribuição, Engenharia de Subestações, Proteção da Distribuição e Planejamento e Proteção da Transmissão.

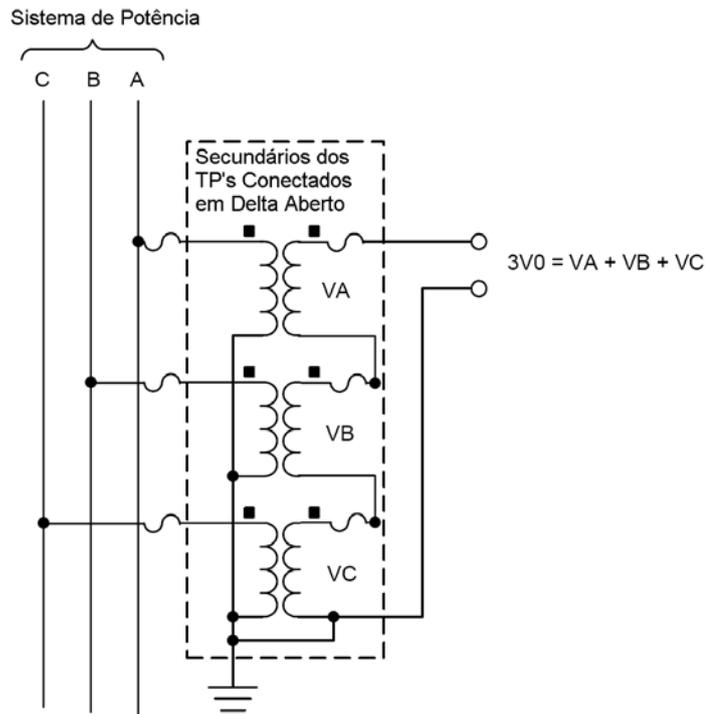
Desde abril de 1994, ele tem trabalhado na Schweitzer Engineering Laboratories como Engenheiro de Aplicação de Campo, em New Berlin, Wisconsin.

Ken é um Membro Sênior do IEEE e um membro ativo do IEEE Power System Relay Committee; ele trabalhou como representante dos USA no CIGRE Joint Group 34/35.11 sobre Teleproteção, e é um *Professional Engineer* registrado no estado de Wisconsin. Ken escreveu e apresentou diversos *papers* nas principais conferências de relés de proteção e sistemas de potência.

# APÊNDICE A

## CONSIDERAÇÕES SOBRE A CONEXÃO DELTA ABERTO

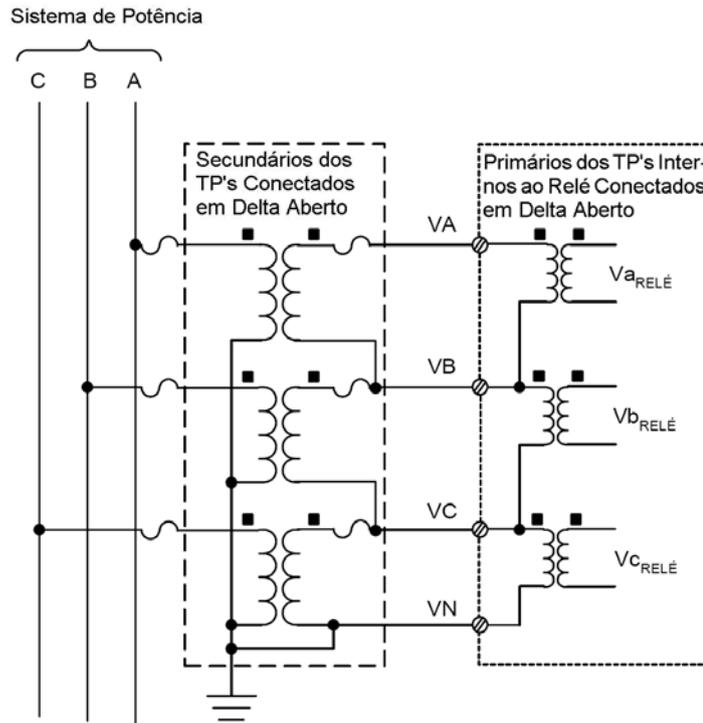
A medição da tensão residual  $3V_0 (= V_A + V_B + V_C)$  é útil para efetuar o controle direcional de terra da proteção de sobrecorrente de terra, proteção 59N e medição. A Figura A1 mostra uma conexão delta aberto do TP.



**Figura A1:** Diagrama da Conexão Delta Aberto do TP

A conexão delta aberto do TP fornece tensão de seqüência-zero para medição durante faltas à terra. Durante condições normais de operação, sem faltas, com a tensão primária equilibrada, a saída da conexão delta aberto é zero. A tensão nominal de saída para uma falta sólida à terra em um sistema aterrado é a tensão nominal de cada transformador. Se a tensão secundária nominal for 120 Vac, a tensão desenvolvida no delta aberto para uma falta à terra em um sistema aterrado é 120 Vac. A saída nominal para uma falta sólida à terra em um sistema não aterrado é três vezes a tensão nominal de cada transformador. Se a tensão nominal de cada TP de fase for 120 Vac, você pode esperar 360 Vac na conexão delta aberto para uma falta sólida à terra em um sistema não aterrado.

A Figura A1 mostra a prática comum de colocar fusíveis em cada fase do primário e do secundário do TP. A queima de um fusível no primário resulta em uma tensão nominal de saída no delta aberto. A operação de qualquer um dos fusíveis do secundário abre o circuito de tensão secundária, impedindo que a saída do delta aberto forneça uma tensão de seqüência-zero durante uma falta à terra. Se considerarmos que a saída normal, sem falta, é zero e a saída durante uma condição de queima do fusível no secundário é zero, é óbvio que precisamos de um esquema para monitorar as condições da conexão do TP. A Figura A2 mostra o diagrama de conexão de um esquema com patente pendente.



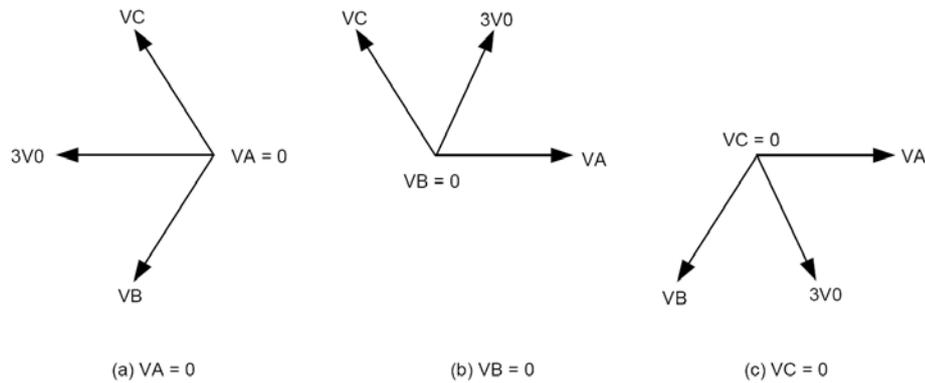
**Figura A2:** Diagrama da Conexão do TP

Com os transformadores de entrada do relé conectados conforme mostrado, o relé está apto para extrair as tensões individuais das fases. A partir dessas tensões de fase, o relé pode então calcular  $3V_0$ . Os benefícios deste método são:

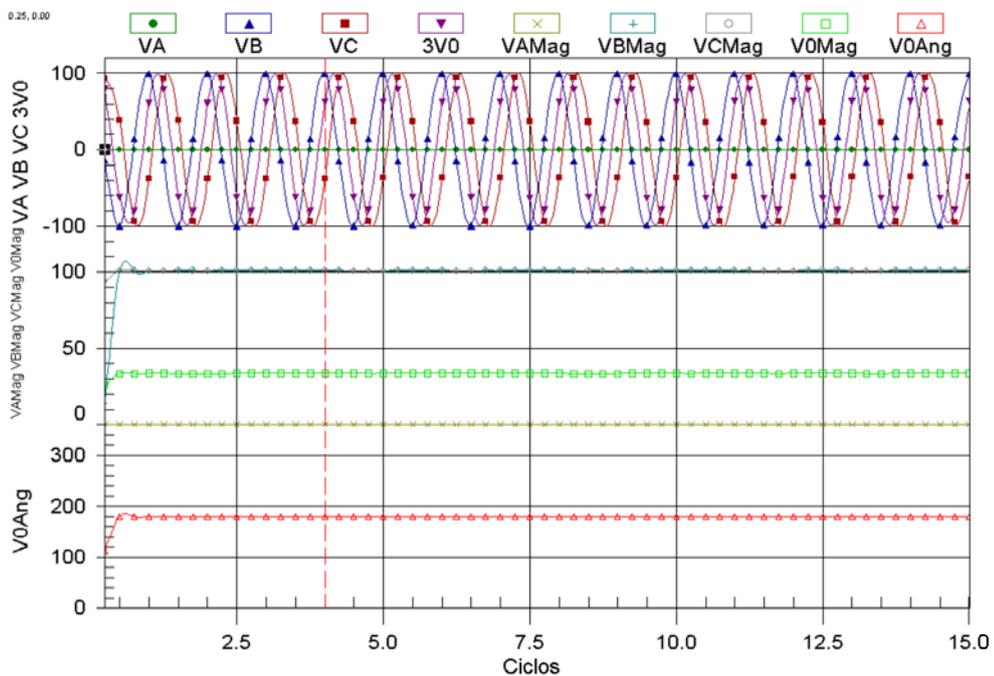
1. O sistema do relé pode verificar a queima de fusíveis de potencial. Em um relé que esteja usando a conexão delta aberto tradicional, instalado em um sistema com pouco ou nenhum desbalanço, a tensão  $3V_0$  mensurável antes e depois da queima do fusível do secundário é a mesma; isto é, zero volt.
2. O relé pode medir cada tensão individual de fase e calcular as componentes de seqüência necessárias. Isto então possibilita que o relé use os mesmos TP's para controle direcional de fase e terra. Observe que as metodologias usadas para direcionalidade de fase e terra são imensamente diferentes.
3. Simplesmente acrescente os fios a partir das marcas de polaridade das Fases B e C da conexão delta aberto do TP existente às respectivas entradas do relé. Não é necessário alterar a fiação existente para os equipamentos que já estejam usando a saída de tensão do delta aberto; por exemplo, você pode alimentar tanto a tensão secundária trifásica quanto a tensão monofásica do delta aberto com os mesmos enrolamentos do secundário do TP.
4. Possibilita efetuar direcionalidade dual de fases a partir de TP's diferentes: o Primário 1 pode usar esta nova conexão a partir de um sistema em delta aberto enquanto o Primário 2 pode usar os TP's da conexão em V existente (*open-delta*) para polarização.

## PERFORMANCE DA NOVA CONEXÃO 3V0

Para demonstrar a performance desta nova conexão, nós montamos um sistema como aquele mostrado na Figura A2. Uma fonte de teste ativa foi usada para simular o sistema de potência. Em seguida, desligamos a tensão de uma fase, disparamos um relatório de eventos e validamos o esperado versus o que o relé mediu. Em cada caso, a fase e as tensões de seqüência medidas foram conforme esperado. A Figura A3 mostra a relação entre as fases esperada para cada teste com uma fase desligada. A Figura A4 mostra que o ângulo e a magnitude da tensão V0 calculados correspondem aos resultados esperados para as condições de queima do fusível do secundário da Fase A (os resultados dos testes para queima nas Fases B e C são similares).



**Figura A3:** Relações Entre as Fases para Diversas Tensões de Fase Desligadas



**Figura A4:** Falta Fase A-Terra,  $V_A = 0$ ,  $V_{RELÉ} = 0$ ,  $V_{0RELÉ} = 33,7 \text{ V} \angle 0^\circ$