

# “Sympathetic Trip” Problemas, Análises e Soluções

Jeff Roberts  
*Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Terrence L. Stulo  
*Nevada Power Company*

Andres Reyes  
*Omicron Electronics Corp. USA*

A edição revisada anterior foi lançada em maio de 2002

Apresentado previamente na  
12th Annual CEPSEI Exhibition, novembro de 1998,  
and 52nd Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, maio de 1998

Originalmente apresentado na  
24th Annual Western Protective Relay Conference, outubro de 1997

Traduzido para o português em julho de 2017

# “SYMPATHETIC TRIP” PROBLEMAS, ANÁLISES, E SOLUÇÕES

---

Jeff Roberts  
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.  
Pullman, WA USA

Terrence L. Stulo  
Nevada Power Company  
Las Vegas, NV USA

Andres Reyes  
Omicron Electronics Corp. USA  
Houston, TX USA

## INTRODUÇÃO

“Sympathetic trips” são operações indesejadas do relé para condições de desequilíbrio de carga, ou sobrecarga, que ocorrem durante ou imediatamente após faltas fora da seção protegida. As causas básicas do problema do “sympathetic trip” são o tipo e a conexão das cargas atendidas pelos alimentadores da distribuição. Existem duas classificações para os “sympathetic trip”: aquelas referentes aos trips que ocorrem devido às condições de recuperação demorada da tensão, e aquelas onde eles ocorrem devido ao desequilíbrio da carga durante uma falta fora da seção protegida.

Muitos outros *papers* técnicos abordam como evitar a ocorrência de “sympathetic trips” em alimentadores radiais: [3], [4], e [5]. Esses *papers* descrevem as condições de operação do sistema anteriores às ocorrências do “sympathetic trip”, a conseqüente interrupção do sistema de potência e os gastos elevados em pesquisas necessárias para evitar tais ocorrências. Uma solução comum para o “sympathetic trip” oferecida nesses *papers* é a de elevar permanentemente os limites de atuação dos elementos de sobrecorrente de fase e terra. Esta solução não necessariamente penaliza a sensibilidade de detecção de faltas.

Esse *paper* descreve duas soluções simples com relés, as quais dão a segurança necessária ao “sympathetic trip”, e mantêm a sensibilidade de detecção de faltas desejada. Também apresenta exemplos do sistema, que ilustram como inserir as impedâncias das cargas nos diagramas de componentes simétricas.

## O PROBLEMA DA OCORRÊNCIA DE “SYMPATHETIC TRIP” DEVIDO À DEMORA NA RECUPERAÇÃO DA TENSÃO

Condições de recuperação demorada da tensão (isto é, duração prolongada dos afundamentos de tensão) são comumente iniciadas por uma falta nas linhas adjacentes do mesmo nível de tensão, ou nas linhas de alimentação de maior tensão. O problema das situações demoradas de recuperação da tensão é resultado do tipo da carga conectada. As cargas causadoras são grandes blocos de motores de indução de baixa inércia, que perdem a velocidade rapidamente durante quedas de tensão causadas por faltas. Aparelhos de ar condicionado residenciais monofásicos são um exemplo comum para esses motores. Combinando com as suas características de perda rápida de velocidade, esses motores têm também que trabalhar acoplados a compressores mantidos sob uma alta pressão do gás refrigerante, e com torque restritivo elevado. Quando tais motores perdem velocidade, eles puxam mais corrente enquanto a impedância efetiva dos mesmos diminui. O Apêndice A mostra a folha impressa de um programa matemático útil para caracterizar a impedância do motor como uma função do escorregamento (onde escorregamento é definido como a diferença entre a velocidade real do motor e a velocidade ideal de sincronismo). Admitindo-se que podem existir muitos aparelhos de ar condicionado atendidos por um único alimentador, o aumento na corrente de carga do alimentador para as fases afetadas pode ser apreciável. É este enorme bloco de correntes puxadas pelos motores que leva às inoportunas ocorrências de “sympathetic trips” dos relés de proteção de sobrecorrente do alimentador da distribuição.

## Ocorrências com Recuperação Demorada da Tensão que Resultaram em “Sympathetic Trips”

Ocorrências de “sympathetic trips” devido à recuperação demorada da tensão não são raras. A lista a seguir mostra alguns casos registrados de ocorrências de “sympathetic trips” devido à recuperação demorada da tensão:

- Southern California Edison (SCE), Los Angeles, Califórnia : 10 incidentes no período 1990–1992. Um deles afetou uma área de cerca de 1600 quilômetros quadrados [3].
- Sacramento Municipal Utility District (SMUD), Sacramento, Califórnia: Agosto de 1990, doze disjuntores de 12,47 kV suspeitos de terem sido abertos devido ao “sympathetic trip” [3].
- Central Power and Light (CP&L), Corpus Christi, Texas: 89 eventos de “sympathetic trips” de 1 de Setembro, 1990 a 1 de Março, 1993 [4].

Suspeitamos que ocorreram muitos outros desligamentos devido ao “sympathetic trip”, que permanecem, porém, inexplicados. Isso é simplesmente porque os relés de proteção mais antigos não registram as informações da falta, e os registradores de faltas não são de uso comum em alimentadores da distribuição.

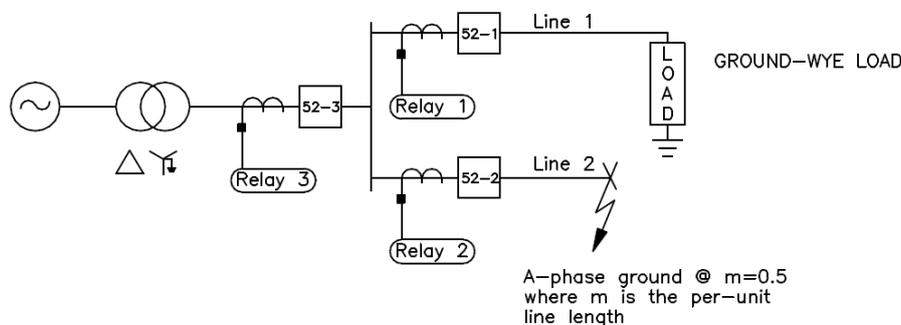
O aumento do carregamento das linhas e da quantidade de cargas monofásicas de motores-compressores de baixa inércia, pode causar um aumento do número de ocorrências de “sympathetic trip” devido à recuperação demorada da tensão.

## Experiências com as Novas Soluções para o “Sympathetic Trip” Devido à Recuperação Demorada da Tensão

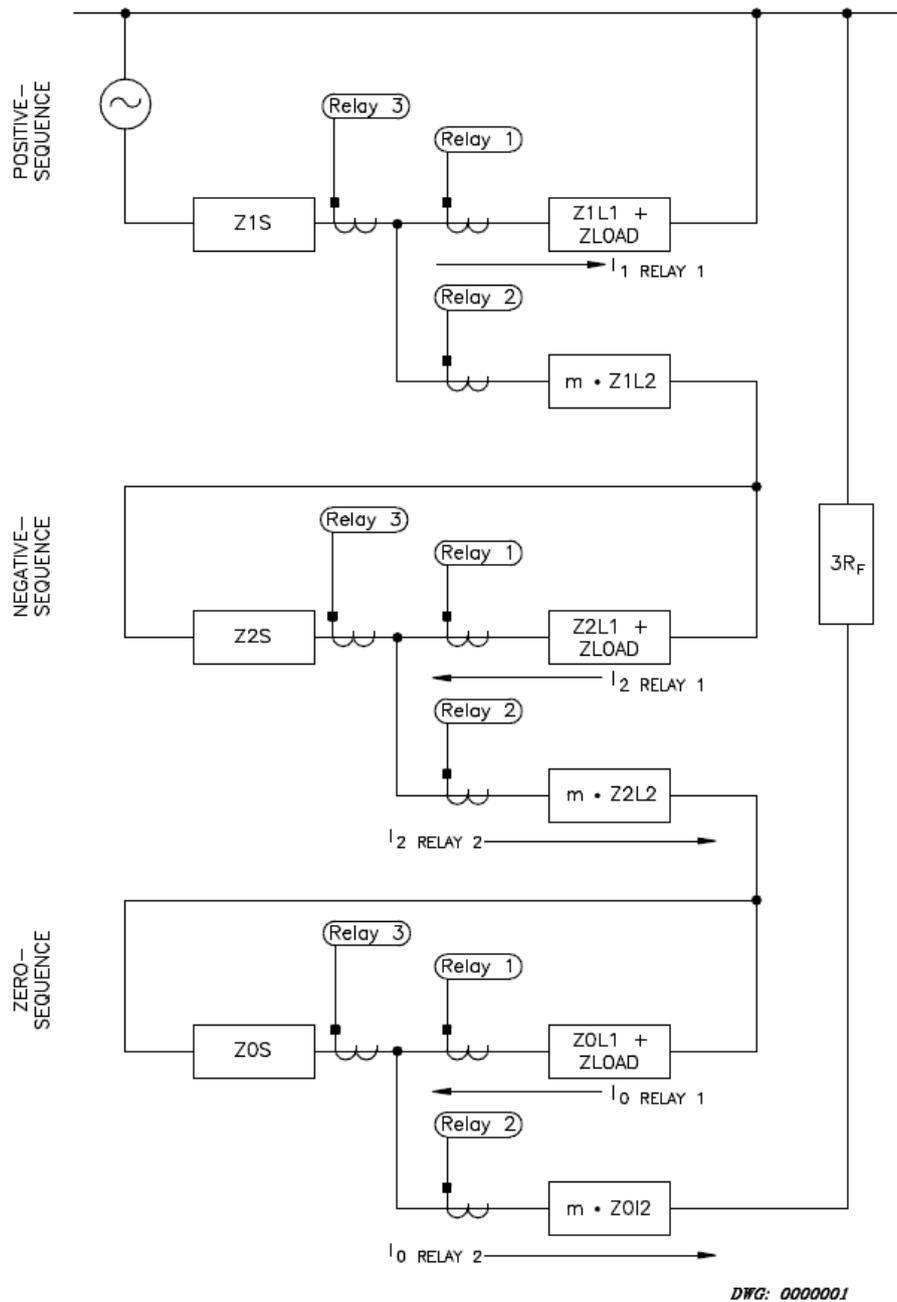
As soluções para o “sympathetic trip” oferecidas a seguir são tanto simples quanto atrativas no que se refere ao custo. Ambas as soluções são facilmente implementadas num relé de proteção ou dispositivo similar que faça as medições das três tensões e três correntes e que calcule as tensões e correntes das componentes simétricas, a partir desses valores de fase.

### **Faltas no Alimentador Adjacente Provocam “Sympathetic Trips” nos Alimentadores**

Vamos examinar o problema da recuperação demorada da tensão, para uma falta à terra numa linha de distribuição paralela. A Figura 2 mostra o diagrama de seqüência para uma falta da fase A à terra na Linha 2, mostrada no diagrama unifilar do sistema da Figura 1. Essa falta monofásica está localizada em  $m = 0,5$  onde  $m$  é o comprimento da linha em p.u.



**Figura 1: Diagrama Unifilar para uma Falta no Alimentador Adjacente em um Sistema Radial**



**Figura 2: Diagrama de Sequência para uma Falta à Terra no Alimentador Adjacente em um Sistema Radial**

Para qualquer falta à terra na Linha 2, as ações desejadas dos três relés mostrados na Figura 1 estão listadas abaixo:

1. Relé 2 dá trip no Disjuntor 52-2.
2. Relé 3 sente a falta à terra mas não dá trip no Disjuntor 52-3, a não ser que o Disjuntor 52-2 falhe.
3. Relé 1 não dá trip (porque a linha não está em falta), Disjuntor 52-1 permanece fechado, e a carga atendida pela Linha 1 permanece energizada (admitindo-se que o Disjuntor 52-3 permanece fechado).

Nesse exemplo, suponha que a Linha 1 tenha significantes cargas monofásicas de motores de baixa inércia conectadas na extremidade do alimentador (do tipo que você veria se existisse um grande bloco de novas cargas de consumidores residenciais, localizadas na extremidade do alimentador).

Os parâmetros do sistema, em ohms secundários, para o sistema do exemplo da Figura 1 são:

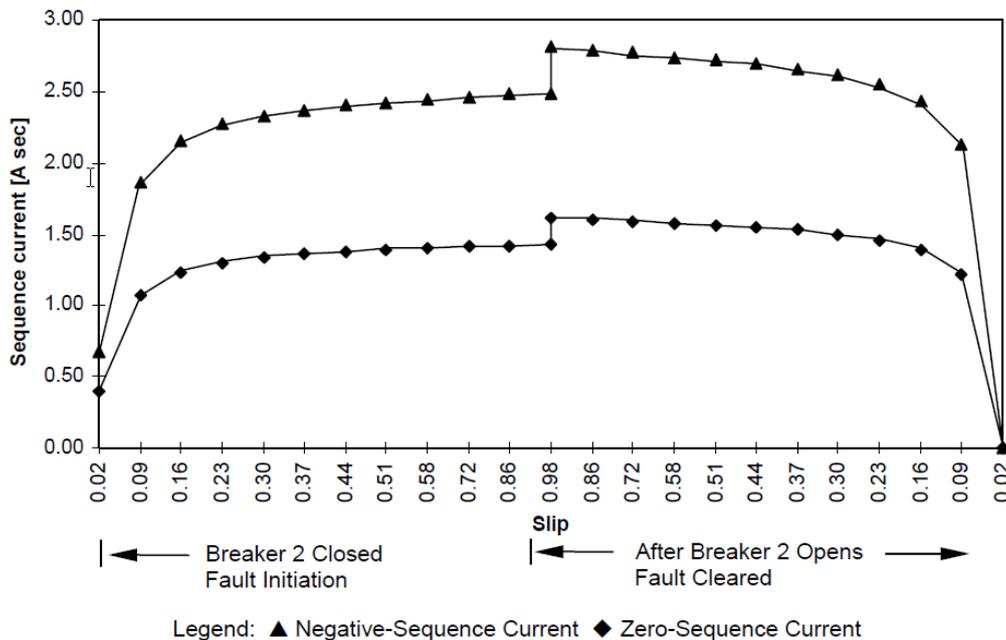
Impedância de Sequência Positiva e Zero da Fonte:	$Z_{1S, 0S} = 1 \Omega \angle 84.3^\circ$
Impedância de Sequência Positiva da Linha:	$Z_{1L1, 1L2} = 8.54 \Omega \angle 69^\circ$
Impedância de Sequência Zero da Linha:	$Z_{0L1, 0L2} = 25.63 \Omega \angle 69^\circ$
Impedância da Carga por Fase (incluindo motores):	$Z_{LOAD} = 6.43 \Omega \angle 41.3^\circ$

O valor da impedância de carga listada é preciso para um carregamento do motor muito próximo da velocidade síncrona: escorregamento = 0,02. A carga do motor é modelada como monofásica, de motor de baixa inércia, para ilustrar o cenário do pior caso onde todos os motores perdem a velocidade simultaneamente. Para um escorregamento = 0,02, a impedância da carga do motor é de 5,1  $\Omega$  secundários. Quando a velocidade da carga dos motores diminui, o escorregamento aumenta e a impedância do motor diminui.

Com a Linha 2 em falta, a magnitude de tensão de distribuição da fase A diminui. Esse abaixamento da tensão tende a fazer com que a carga monofásica do motor conectada à fase A na Linha 1 perca rapidamente a velocidade. A Figura 3 mostra as correntes  $|3I_0|$  e  $|3I_2|$  medidas pelo Relé 1, durante e após a falta na Linha 2.

Ambas as correntes  $|3I_0|$  e  $|3I_2|$  circulam na Linha 1 para uma falta na Linha 2. Na Figura 2, observe que o fluxo das correntes  $3I_0$  e  $3I_2$  é em direção à barra, como medido pelo Relé 1. Essa é a mesma direção do fluxo de corrente para uma falta na direção reversa.

#### Correntes de Sequência Como Função do Escorregamento do Motor para uma Falta em $m = 0,5$

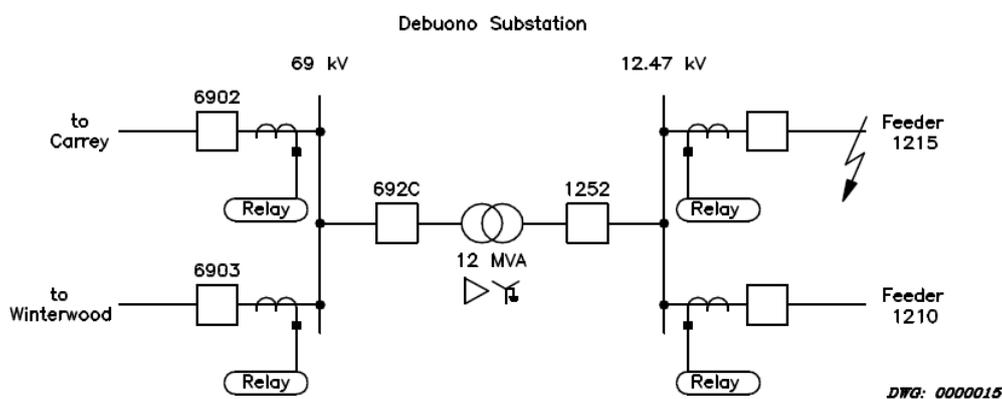


**Figura 3: O Escorregamento do Motor da Linha 1 Altera as Correntes  $|3I_2|$  e  $|3I_0|$  Medidas pelo Relé 1 Durante e Após a Falta da Fase A na Linha 2**

Na Figura 3, observe que as correntes  $|3I_2|$  e  $|3I_0|$  medidas pelo Relé 1, aumentam quando o escorregamento da carga do motor da Linha 1 aumenta. Se a proteção de sobrecorrente de terra não direcional do Relé 1 estiver com valores baixos de ajuste, ela pode operar indesejadamente. Por exemplo, se o elemento de sobrecorrente temporizado residual não direcional do Relé 1 tem um valor de atuação (pick up) de 1 A, ele deve atuar para uma falta na Linha 2, e permanecerá atuado até que as cargas dos motores nas três fases tornem-se equilibradas (a carga do motor, conectada à fase A recupera a velocidade síncrona).

### Exemplo Real #1: Falta no Alimentador Adjacente 12,47 kV

Em 9 de agosto de 1997, na Nevada Power Company (NPC) ocorreu uma falta B-C-Terra no Alimentador 1215 (ver Figura 4). A causa suposta dessa falta foi um raio. Os relés de proteção dos Alimentadores 1215 e 1210 dispararam os registradores de eventos para essa mesma falta. O relé do Alimentador 1215 corretamente gerou uma saída de trip, iniciada pelo elemento de sobrecorrente temporizado de fase não direcional. As Figuras 5 e 6 mostram as magnitudes das correntes e tensões de fase. As Figuras 7 e 8 mostram as correntes e tensões de sequência medidas pelos relés de proteção dos Alimentadores 1210 e 1215.

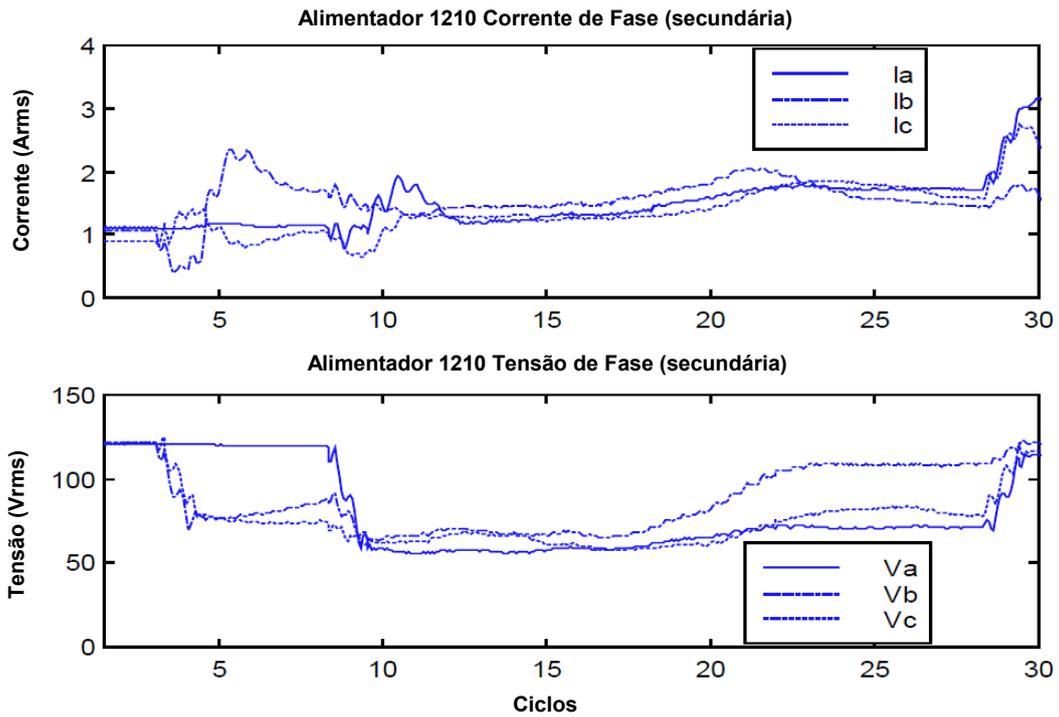


**Figura 4: Diagrama Unifilar do Sistema do Exemplo Real da NPC**

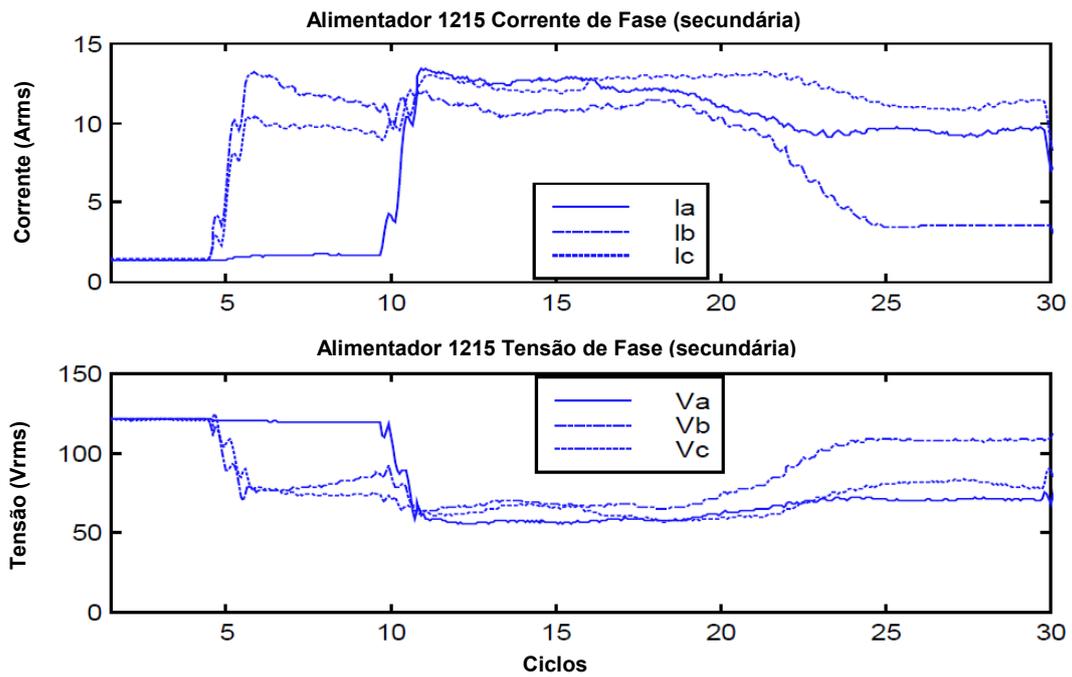
Na Figura 6, observe que a falta, no início, próximo ao Ciclo 4, é B-C-Terra, e evolui para uma falta trifásica no Ciclo 8. O sistema de proteção do Alimentador 1215 eliminou essa falta no Ciclo 29: o tempo do trip do relé é de 26 ciclos e o tempo de operação do disjuntor é de 3 ciclos.

Embora o Alimentador 1210 não esteja sob falta, ele sofre um aumento significativo em ambas as correntes de fase e de sequência, durante e após a falta no alimentador adjacente. Na Figura 5, nós vemos que a maior corrente de fase do Alimentador 1210 excedeu o valor de atuação (pick up) de 3,0 A secundários do elemento de sobrecorrente de fase temporizado, próximo ao Ciclo 29, imediatamente após a eliminação da falta no Alimentador 1215.

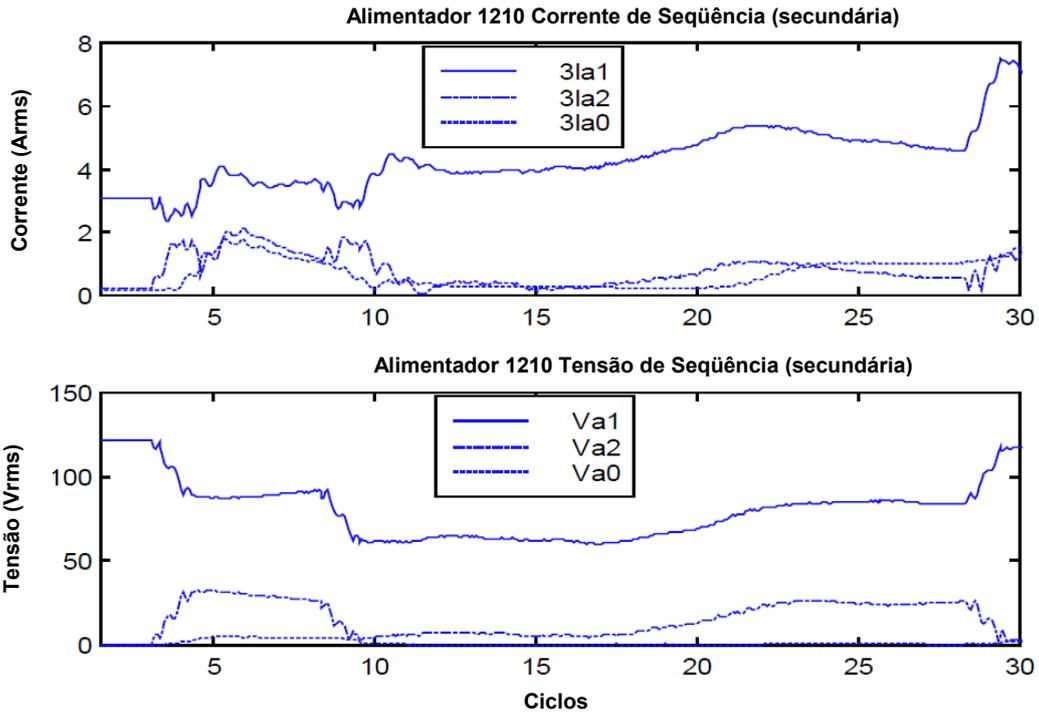
Na Figura 7, observe que a corrente  $3I_0$  no Alimentador 1210 excedeu o valor de atuação de 1,0 A secundário do elemento de sobrecorrente de terra temporizado, próximo ao Ciclo 4, e novamente próximo ao Ciclo 23. Como nós discutimos anteriormente, essas correntes elevadas no Alimentador 1210 podem existir por um tempo prolongado após a falta ter sido eliminada no alimentador adjacente. O Alimentador 1210 não deu trip devido à correta ação de sua lógica para evitar o “sympathetic trip”. Nós discutiremos essa lógica posteriormente, nesse *paper*.



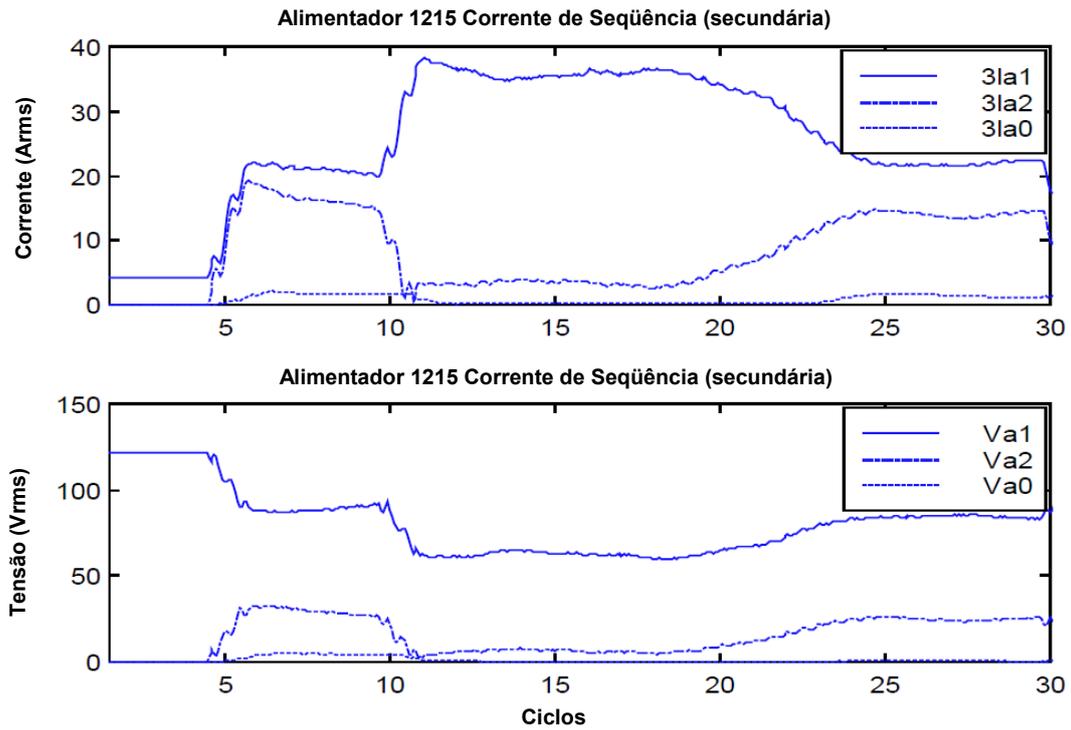
**Figura 5: Correntes e Tensões de Fase Medidas pelo Relé do Alimentador 1210**



**Figura 6: Correntes e Tensões de Fase Medidas pelo Relé do Alimentador 1215**



**Figura 7: Correntes e Tensões de Seqüência Medidas pelo Relé do Alimentador 1210**



**Figura 8: Correntes e Tensões de Seqüência Medidas pelo Relé do Alimentador 1215**

## Faltas nas Linhas de Transmissão Também Provocam a Ocorrência de “Sympathetic Trips” dos Relés de Alimentadores

Qualquer falta numa linha de alta tensão reduz a tensão de fase em muitos alimentadores da distribuição. Vamos a seguir examinar o diagrama de sequência para uma falta à terra em uma linha de alta tensão (ver Figura 9).

A Figura 10 mostra o diagrama de impedância para a falta da fase A à terra na Linha 2, conforme representada no diagrama unifilar do sistema na Figura 9. Na Figura 9 observe que a carga da distribuição está no lado de baixa tensão do transformador de potência com conexão delta-estrela-aterrada. Os Relés 8 e 9 não devem dar trip para a falta mostrada, porque nenhuma das Linhas 4 ou 5 está em falta.

Durante a falta na linha de transmissão mostrada na Figura 9, a magnitude da tensão na fase A diminui em todos os terminais de relés. O quanto as tensões nos terminais dos motores das Linhas 4 e 5 diminuem depende da proximidade que o terminal do motor está da falta. É durante essa tensão reduzida que as cargas dos motores conectadas às Linhas 4 e 5 começam a perder rapidamente a velocidade. Quando os disjuntores 52-3 e 52-4 abrem para eliminar a falta à terra, as tensões nas fases A e C das Linhas 4 e 5 recuperam-se levemente. (Posteriormente nós discutiremos porque as duas tensões nos alimentadores da distribuição diminuem para essa falta à terra no sistema de alta tensão). Entretanto, essas tensões de fase podem permanecer menores do que a nominal devido às elevadas correntes puxadas pelas cargas dos motores (isso é devido ao acréscimo da queda de tensão na linha).

Referindo-se novamente à Figura 10, observe que a corrente  $3I_2$  circula nas Linhas 4 e 5 durante a falta na Linha 2. A direção do fluxo da corrente  $3I_2$  é no sentido da barra, conforme medido pelos Relés 8 e 9. Essa é a direção do fluxo de corrente associado com uma falta na direção reversa.

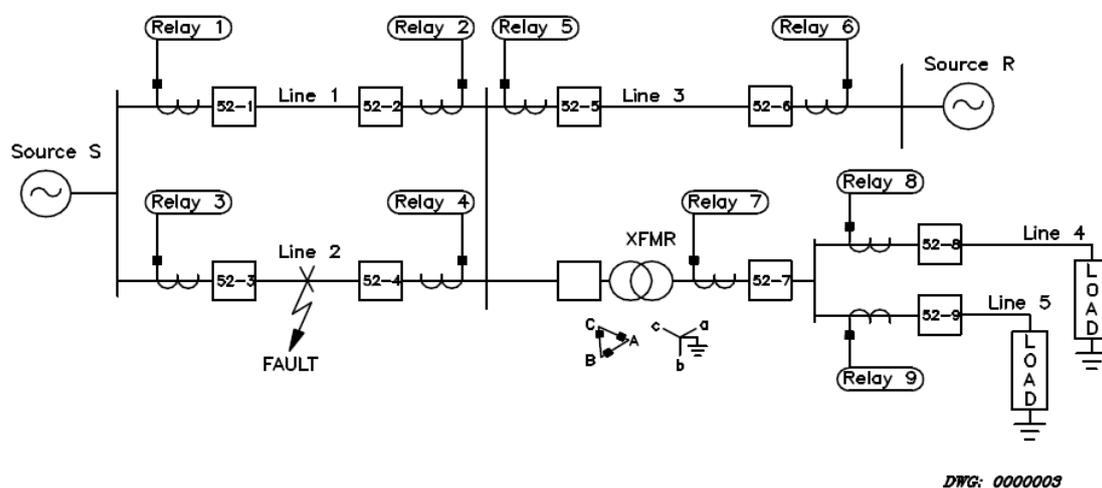
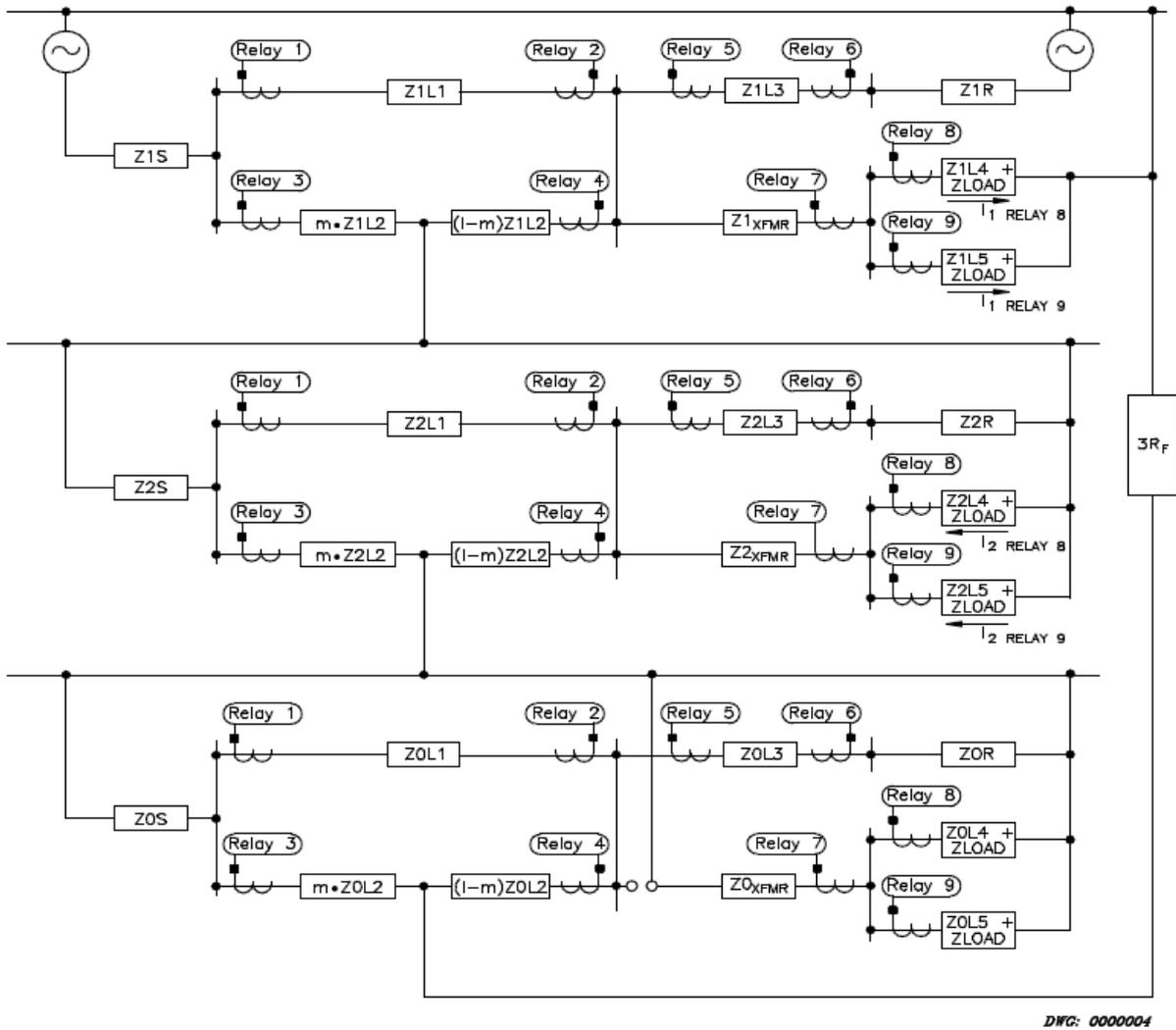


Figura 9: Diagrama Unifilar do Sistema Para uma Falta Fase-A-Terra na Alta Tensão

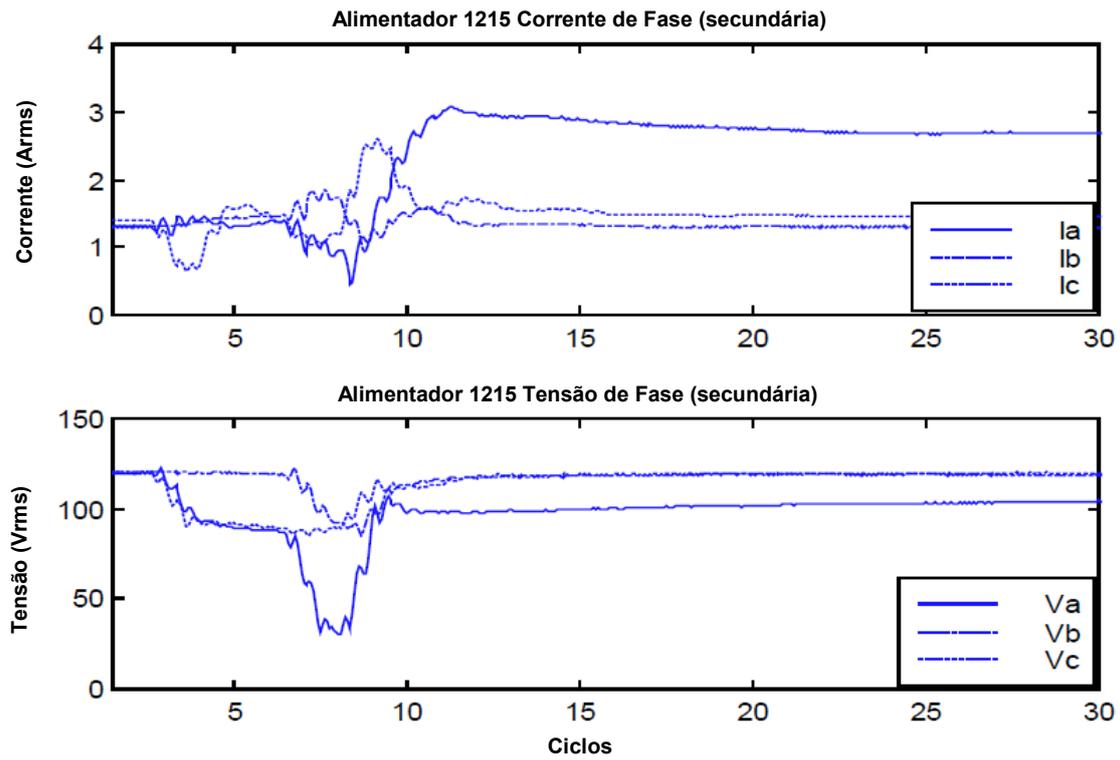


**Figura 10: Diagrama de Sequência para uma Falta Fase-A-Terra na Alta Tensão**

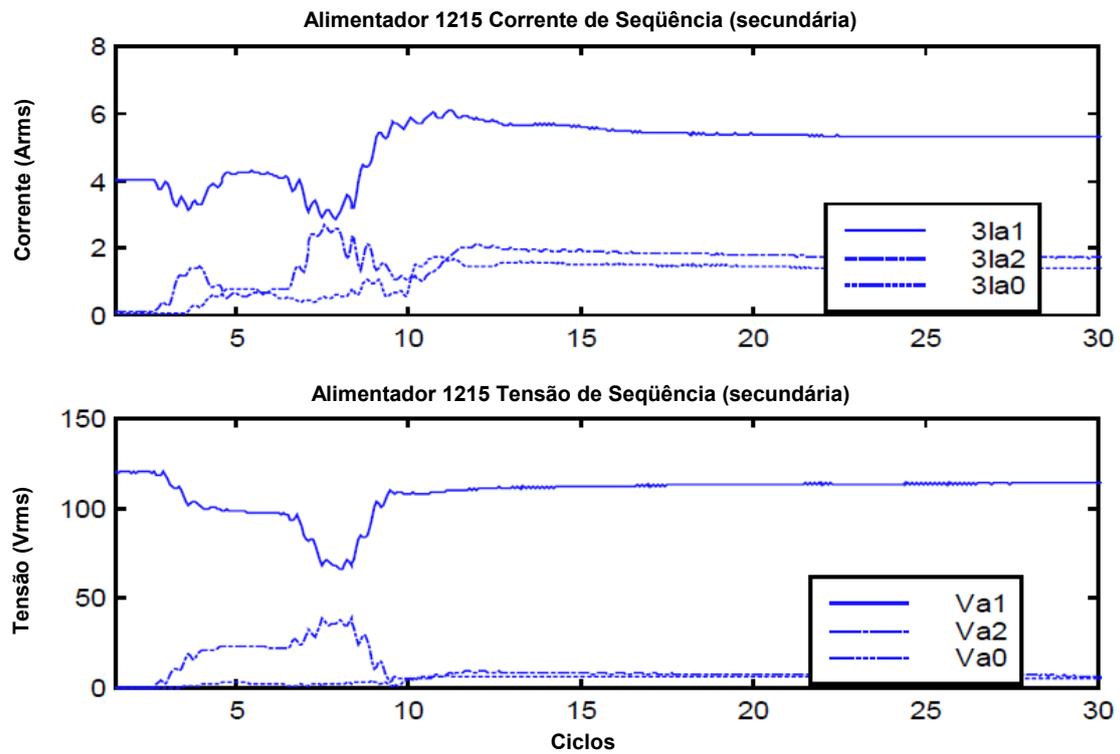
### Exemplo Real #2: Falta Fase A-Terra na Linha de Transmissão de 69 kV

Aproximadamente 15 minutos após a falta B-C-Terra no Alimentador 1215, uma das linhas de transmissão de 69 kV, que atendem os Alimentadores 1210 e 1215, sofreu uma falta fase A-Terra. Novamente a causa suposta da falta foi um raio. Essa falta posteriormente evoluiu para uma falta A-B-Terra, pouco antes da operação do disjuntor de 69 kV. Os relés de proteção do terminal da linha de 69 kV e dos Alimentadores 1215 e 1210 dispararam os registradores de eventos para essa mesma falta. Mais uma vez, nenhum relé de alimentador deu trip devido à correta ação de sua lógica para evitar o “sympathetic trip”.

As Figuras 11 e 13 mostram as magnitudes das correntes e tensões de fase medidas pelos relés dos alimentadores antes, durante, e imediatamente após a falta no 69 kV. As Figuras 12 e 14 mostram as tensões e correntes de sequência medidas pelos relés dos alimentadores, para essa mesma falta no 69 kV.



**Figura 11: Tensões e Correntes de Fase Medidas pelo Relé do Alimentador 1215**



**Figura 12: Tensões e Correntes de Seqüência Medidas pelo Relé do Alimentador 1215**

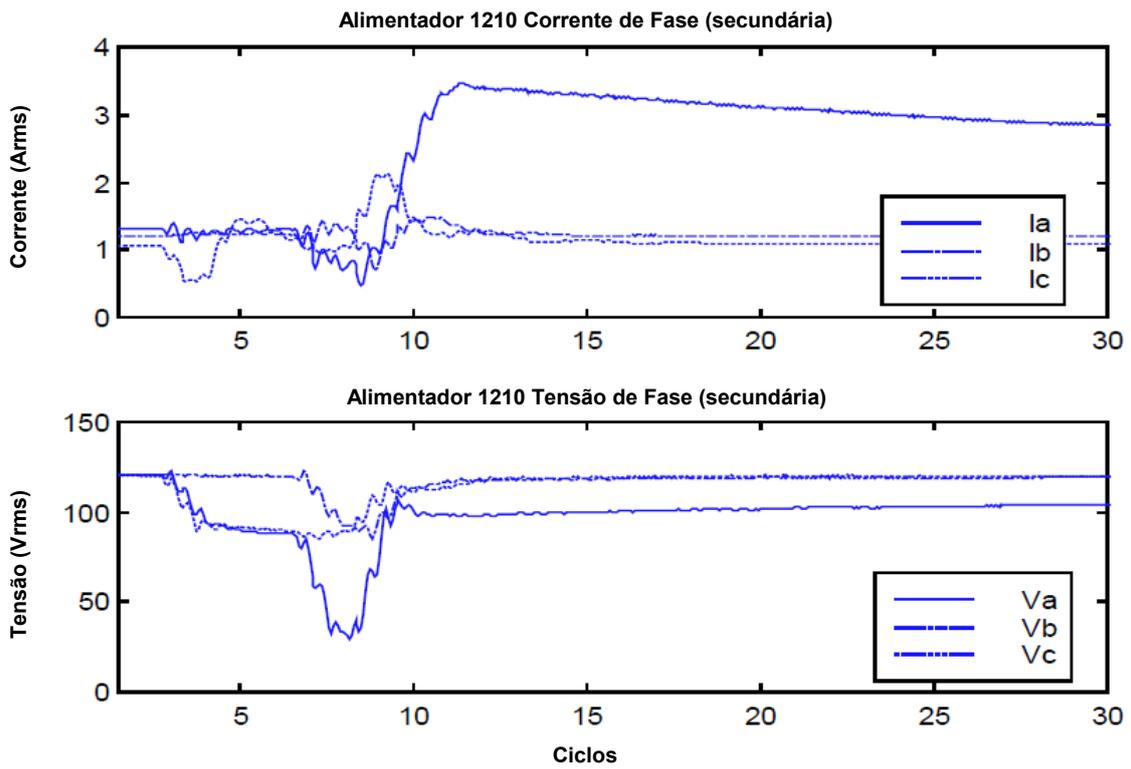


Figura 13: Tensões e Correntes de Fase Medidas pelo Relé do Alimentador 1210

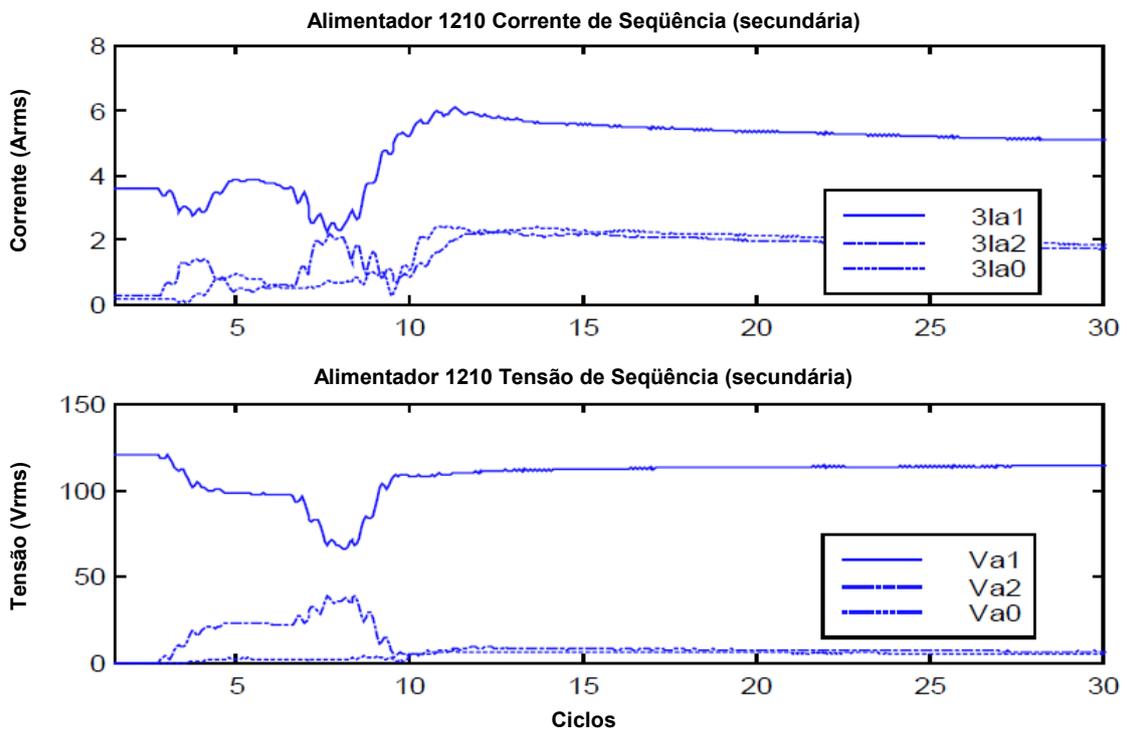
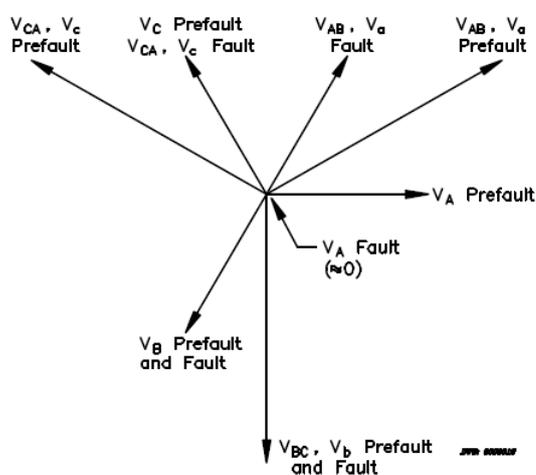


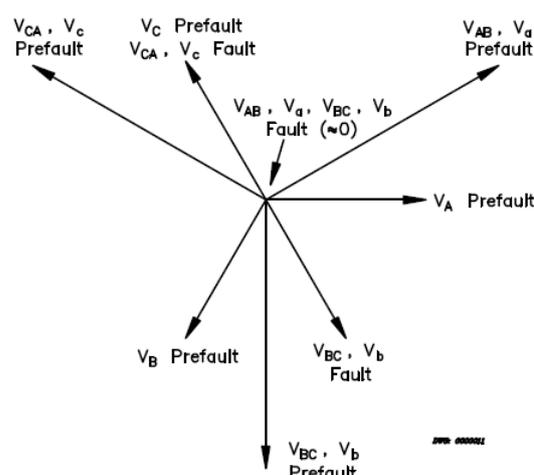
Figura 14: Tensões e Correntes de Seqüência Medidas pelo Relé do Alimentador 1210

Na Figura 11 e na Figura 13, observe que somente as magnitudes das tensões das fases A e C na distribuição diminuem inicialmente para a falta na linha de transmissão. Nós esperamos que duas tensões de fase na distribuição diminuam para uma falta à terra no lado de alta tensão de um transformador de potência, com conexão delta-estrela-aterrada. Observe também que próximo ao Ciclo 8, todas as três magnitudes das tensões de fase diminuem quando a falta no 69 kV evoluiu para uma falta fases A-B-Terra.

O diagrama de fasores da Figura 15 ilustra como as tensões no alimentador da distribuição reduzem para uma falta franca, fase A-Terra, no lado de alta tensão do transformador de potência com conexão delta-estrela-aterrada. Índices com letras maiúsculas indicam as tensões do sistema de transmissão, enquanto índices com letras minúsculas indicam as tensões do sistema da distribuição. A Figura 16 mostra as tensões do alimentador de distribuição medidas quando a falta fase A-Terra na alta tensão evolui para uma falta fases A-B-Terra.



**Figura 15: Tensões Medidas pelo Relé do Alimentador para uma Falta Fase A-Terra no lado AT do Transformador com Conexão Delta-Estrela-Aterrada**



**Figura 16: Tensões Medidas pelo Relé do Alimentador para uma Falta Fases A-B-Terra no lado AT do Transformador com Conexão Delta-Estrela-Aterrada**

Na Figura 11 e na Figura 13, observe a brusca queda na magnitude da tensão da fase A do alimentador, no momento que a falta na linha de transmissão evoluiu. Esse enorme afundamento da tensão na distribuição é o mesmo que o prognosticado na Figura 16. O item [3] de Referências afirma que “motores propensos a perder rapidamente a velocidade, perdem rapidamente a velocidade para quase todas as faltas com uma duração maior do que cinco ciclos, e com menos de 60% da tensão nominal.” Devido à magnitude de tensão da fase A ter caído abaixo de 60% da nominal, os motores conectados à essa fase perderam bruscamente a velocidade. Para ver o efeito dessa ocorrência com os motores, observe o enorme aumento na magnitude da corrente da fase A, após a falta no 69 kV ter sido eliminada (ver Figura 13).

Os dados contidos nas Figuras 11 à 14 mostram que, embora nenhum dos Alimentadores 1215 ou 1210 estivesse sob falta, ambos sofreram aumentos significantes nas correntes de fase e de sequência, durante e após a falta. Na Figura 11 e na Figura 13, nós vemos que a maior corrente de fase de ambos os alimentadores excedeu o valor de pick up de 3,0 A secundários, do elemento de sobrecorrente de fase temporizado, próximo ao Ciclo 10. O relé de proteção do Alimentador 1210 mediu uma corrente ligeiramente maior do que a medida pelo relé do alimentador 1215. Isto é possivelmente devido a uma carga ligeiramente maior de motores no Alimentador 1210. Na Figura 12 e na Figura 14 nós podemos ver que a corrente residual ( $3I_0$ ) em ambos os alimentadores excedeu o limite de pick up de 1,0 A do elemento de sobrecorrente de terra temporizado de ambos os alimentadores, próximo ao

Ciclo 10. Essa corrente de terra elevada persistiu durante todo o tempo dos registros dos eventos. Conforme mostram os dados dos registros de eventos, essas altas correntes podem existir por um tempo prolongado após a falta na linha de transmissão ter sido eliminada.

## **Soluções Prévias para Evitar o “Sympathetic Trip” Devido à Recuperação Demorada da Tensão**

Até agora, os fabricantes de relés e as equipes técnicas das empresas de energia elétrica ofereceram as seguintes soluções para evitar o “sympathetic trip”:

1. Aumentar os limites de atuação (pick up) dos elementos das proteções de sobrecorrente de fase e de terra.

Essa solução é simples, fácil de compreender e eficaz. Entretanto, ela dessensibiliza a proteção para faltas no sistema. Ela é benéfica por temporariamente elevar os limites de pick up dos elementos de sobrecorrente, para evitar a ocorrência de “sympathetic trip” devido à recuperação demorada da tensão. Esse aumento no pick up do elemento de sobrecorrente temporizado (TOC – Time Overcurrent) necessita somente ser temporário e desse modo, não dessensibiliza de forma permanente, sem necessidade, a proteção do alimentador para faltas na seção protegida.

2. Diminuir os tempos de eliminação da falta para reduzir o tempo real que as cargas dos motores permanecem submetidas à uma tensão reduzida.

Essa proposta é muito boa uma vez que reduz a tendência dos motores perderem a velocidade, não somente nos arredores da falta. Obter tempos de trip mais rápidos dos relés requer um investimento em esquemas de trip com comunicação assistida (equipamentos de proteção e comunicações).

Esquemas de eliminação de faltas mais rápidos para linhas de distribuição estão tornando-se mais práticos e atrativos com relação ao custo, devido ao custo decrescente dos canais e equipamentos de comunicação digitais [7].

3. Diminuir a impedância do sistema de potência para reduzir a queda de tensão na linha.

Quando uma falta no sistema é eliminada, a tensão no terminal do motor não é elevada imediatamente. Isso é devido à elevada queda da tensão na linha em função das altas correntes de carga puxadas pelos motores que perderam, ou estão perdendo rapidamente a velocidade. A tensão reduzida no terminal dos motores aumenta o tempo de recuperação da tensão do sistema, porque causa o aumento do tempo que os motores levam para recuperar a velocidade síncrona.

Diminuindo a impedância da linha, entre a fonte e a carga, faz com que a queda de tensão na linha seja reduzida (e aumenta a tensão no terminal do motor). A desvantagem dessa solução é que requer um grande capital de investimento para aumentar a bitola dos condutores, bem como diminuir a impedância do transformador.

4. Instalar contadores de subtensão em todas as cargas motorizadas.

Essa solução é talvez a mais eficaz, uma vez que remove do alimentador as cargas dos motores que perderam, ou estão perdendo a velocidade. Removendo essas cargas evita-se a circulação de corrente excessiva de carga do motor, após a eliminação da falta inicial. O lado ruim dessa solução é que requer um custo adicional para o consumidor, e isto não é controlado diretamente pela empresa utilitária.

## **Padronizações Gerais Adicionais para Atenuar as Ocorrências de “Sympathetic Trips”**

A NPC desenvolveu as seguintes padronizações para ajudar a atenuar o problema das ocorrências com “sympathetic trip” devido à recuperação demorada da tensão (DVR – Delayed Voltage Recovery):

1. Correntes menores dos alimentadores individuais, tanto quanto for possível.
2. Divisão em partes iguais da carga total entre os alimentadores de uma subestação.
3. Equilibrar a carga de cada alimentador, tanto quanto possível, para reduzir a corrente de pré-falta desequilibrada. Isso evita que qualquer corrente desequilibrada estabelecida seja adicionada à corrente desequilibrada causada pela recuperação DVR.
4. Usar as características dos elementos de TOC, que têm uma rampa mais inclinada (curva mais “inversa”), para reduzir a probabilidade de desligamentos devido ao “sympathetic trip” ou à partida a frio (“cold load”).

## **SOLUÇÕES COM RELÉS PARA EVITAR A OCORRÊNCIA DE “SYMPATHETIC TRIPS”**

As soluções seguintes utilizando relés evitam que os relés dos alimentadores radiais da distribuição dêem trip devido às condições de “sympathetic trip”, causadas pela demora na recuperação da tensão. As soluções apresentadas a seguir diferem do método usado para detectar as condições que precedem o “sympathetic trip”.

O primeiro método detecta uma simultânea subtensão de fase, sem condição de corrente alta. O segundo método utiliza elementos direcionais (32) para detecção. Após a detecção, a saída de qualquer uma das duas lógicas de detecção usa o maior ajuste dos elementos de sobrecorrente instantâneo para controlar o torque dos elementos de TOC, durante um tempo ajustável.

### **Metodologia Atual do Grupo de Proteção de Sistemas da Nevada Power Company**

A Figura 17 mostra a solução desenvolvida pela NPC para resolver o problema descrito anteriormente, referente às ocorrências de “sympathetic trip” devido à recuperação demorada da tensão. A lógica mostrada na Figura 17 é o resultado de mais de 20 anos de investigações das interrupções para o consumidor, efetuadas pelo Grupo de Proteção do Sistema da Nevada Power Company. Essas investigações foram executadas por ambas as equipes de engenharia e de campo, tanto antiga quanto atual. Essa lógica está atualmente implementada em pelo menos 50 terminais de linha de distribuição. Posteriormente apresentaremos os dados de campo que mostram como efetivamente essa lógica resolveu as recentes faltas no sistema da NPC descritas anteriormente nesse *paper*.

O propósito da lógica mostrada na área tracejada da Figura 17 é o de detectar as condições imediatamente precedentes ao “sympathetic trip”: baixa tensão de fase simultaneamente com condições de correntes não altas de fase, de sequência negativa ou zero. Lembrar dos exemplos anteriores onde a condição de corrente alta não ocorreu até que a falta inicial fosse eliminada, e a tensão do sistema tentasse se recuperar.

O remanescente da lógica mostrada na Figura 17 também controla temporariamente o torque dos elementos de TOC para as três condições seguintes:

1. Quando a demanda do circuito ultrapassa os limites de pick up do elemento de TOC.
2. O disjuntor de linha acabou de fechar (Partida a frio – “Cold Load Pickup”).
3. Quando de recebimento de um comando local.

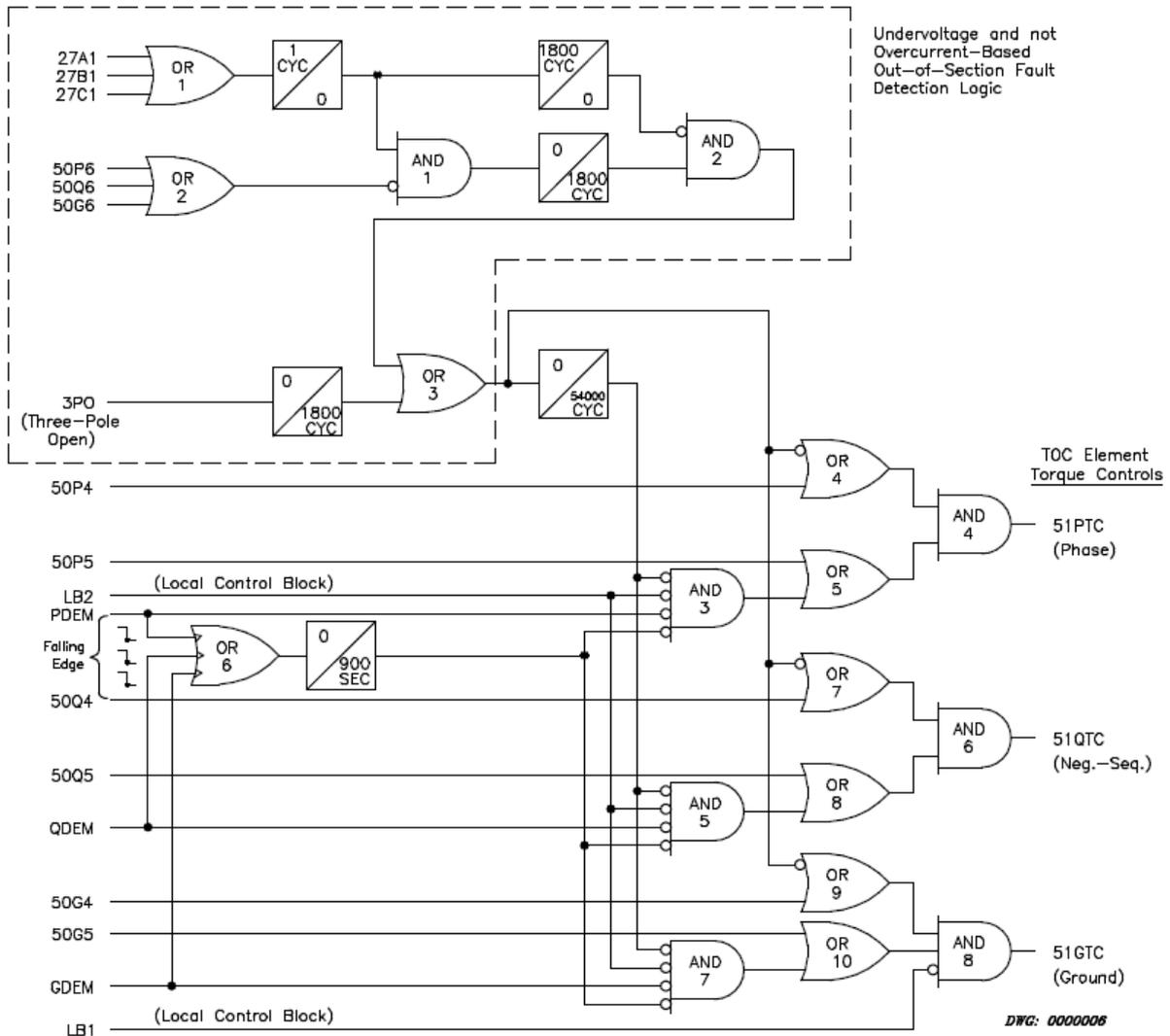


Figura 17: Lógica para Impedimento do “Sympathetic Trip” da Nevada Power Company

### Métodos para Alterar o Tempo de Atuação do Elemento de TOC

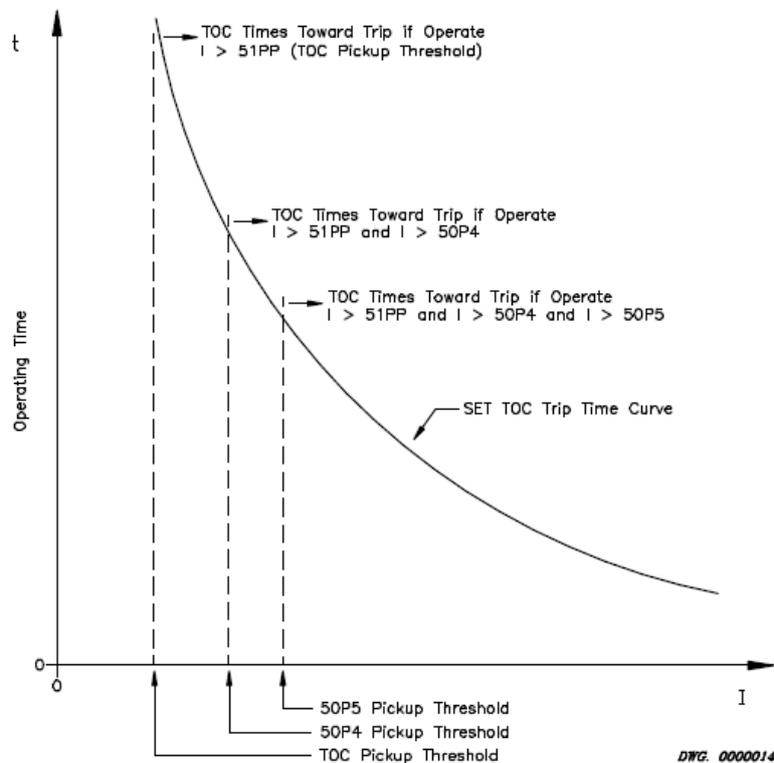
A lista a seguir discute os meios para alterar as características de ajuste do elemento de TOC, de forma a obter a elevação do tempo de trip:

1. Aumentar o limite de pick up do elemento TOC com um ajuste. Esse método move a característica do elemento TOC para a direita num gráfico, em múltiplos de corrente versus tempo de atuação. Embora seguro, esse método desnecessariamente prejudica a coordenação de tempo, e aumenta o tempo de eliminação de faltas na seção protegida.

2. Elevar o dial de ajuste de tempo do elemento TOC para aumentar o tempo de trip. Novamente, esse método é seguro porém prejudica a coordenação de tempo, e aumenta o tempo de eliminação de faltas na seção protegida.
3. Controlar a integração do TOC (tempo de atuação) para magnitudes de corrente abaixo de um novo e maior ajuste do limite do elemento de sobrecorrente. Esse método mantém a temporização das características de trip para magnitudes de corrente maiores e a coordenação com os dispositivos localizados à frente. O item Referências [8] descreve métodos adicionais de se obter modificações no tempo de atuação do elemento TOC para partida a frio “cold load pickup”. Reference [8] describes additional means of achieving TOC timing modification for cold load pickup.

A lógica mostrada na Figura 18 modifica as características do elemento TOC através do método descrito no item 3 acima. O diagrama de atuação do elemento de sobrecorrente temporizado TOC de fase, mostrado na Figura 18, ilustra como usando corretamente o maior ajuste dos elementos de sobrecorrente de fase 50P4 e 50P5 modifica as características de atuação do elemento de fase TOC: não operação para magnitudes de correntes mais baixas que aquelas medidas para condições de recuperação demorada da tensão, e não alteração dos tempos de atuação do elemento TOC para faltas com valores maiores de corrente.

Cada elemento de TOC usado pela NPC tem um controle de torque programável individualmente. Para um elemento TOC operar, a lógica de controle de torque variável para esse elemento tem que atuar (converter em uma lógica 1). Como um exemplo, para habilitar o elemento de fase TOC, a lógica variável 51PTC mostrada na Figura 17 tem que atuar. Uma vez que a saída da lógica de detecção de recuperação demorada da tensão atua, a lógica remanescente bloqueia a atuação do elemento de fase TOC até que o maior ajuste dos elementos de sobrecorrente 50P4 ou 50P5 atue.



**Figura 18: O Controle de Torque dos Elementos TOC com Ajustes Elevados dos Elementos 50 não Modifica as Características de Atuação do TOC para Faltas Elevadas (Exemplo de Fase)**

## **Controle em Vez de Supervisão Evita Condições de Corrida de Contatos e Mantém a Coordenação**

Controlar quando o elemento TOC começa a atuar é muito diferente do que simplesmente supervisionar a saída do mesmo. O benefício dessa proposta de controle é que ela evita com segurança as condições de corrida de contatos. Se, em vez disso, nós supervisionarmos a saída do elemento TOC com um elemento de sobrecorrente com um valor de ajuste maior (50), ele pode ter seu tempo de atuação esgotado, mas tem a sua saída bloqueada pelo elemento 50. Se nesse tempo o elemento 50 atuou momentaneamente em função de uma mudança nas condições do sistema, o elemento TOC atuaria instantaneamente. O efeito desse tipo de supervisão é que o elemento TOC se comporta indesejavelmente como um elemento instantâneo. Controlar a atuação do elemento TOC com elementos 50, com valores de ajustes maiores, permite que se use a atuação do elemento TOC para coordenação.

### **Falta na Linha de Distribuição, na Seção Protegida (direção: para frente)**

Vamos a seguir revisar como a lógica da Figura 17 afeta o controle de torque do elemento TOC de fase, para dois casos de falta trifásica: uma falta na linha, à frente (na seção protegida) e uma falta fora da seção protegida.

Para uma falta trifásica na linha, à frente, todas as três magnitudes de tensão de fase diminuem enquanto as magnitudes das três correntes de fase aumentam. Essas duas condições causam a atuação (pick up) de todos os três elementos 27 e dos elementos de sobrecorrente de fase com valores baixos de ajuste (50P6). A atuação do elemento 50P6 bloqueia a saída “E 1”. Devido à saída “E 1” ser uma lógica 0, “E 2” é também uma lógica 0.

Se o disjuntor estiver fechado (“3PO” é uma lógica 0) por 1800 ciclos, a saída de “OU 3” é também uma lógica 0. Isso força a saída de “OU 4” para uma lógica 1 (apesar do status do elemento 50P4). Incluindo “3PO” nessa lógica, automaticamente dá a você a funcionalidade da lógica de atuação para partida a frio (cold load pickup).

Se o elemento de sobrecorrente da demanda de fase não está atuado (“Phase Demand-PDEM” é uma lógica 0), e não atuou durante os últimos 15 minutos, e se a entrada do bloqueio do controle local não está atuada, o controle de torque do elemento TOC de fase (51PTC) atua sem a influência do elemento de sobrecorrente 50P5. Devido ao fato de que nenhuma entrada para “E 4” é influenciada pela atuação de 50P4 ou 50P5, a atuação do elemento TOC de fase atinge o tempo de atuação mínimo originalmente ajustado.

### **Falta Fora da Seção Protegida (direção reversa)**

Quando se estabelece uma falta trifásica na linha, em qualquer lugar do sistema, todas as três magnitudes de tensão de fase diminuem, e apesar disso o elemento 50P6 não atua. A combinação dessas duas ocorrências assegura as saídas “E 1”, “E 2”, e “OU 3”. Assegurar a saída de “OU 3” bloqueia a saída de “E 3”. Para assegurar a entrada do controle de torque do elemento TOC de fase durante os próximos 1800 ciclos (30 segundos), a magnitude de corrente de fase tem que ultrapassar os limites de atuação dos maiores valores de ajuste de ambos os elementos de sobrecorrente 50P4 e 50P5 (novamente, ver Figura 17).

Após se esgotar o tempo de 30 segundos ajustado no elemento de drop-out temporizado, decorridos 870 segundos, qualquer corrente de fase deve exceder o limite de 50P5 para habilitar o elemento 51P. O efeito de usar dois elementos 50 com ajustes diferentes é escalonar em degraus (“stair-step”) o controle de torque do elemento de fase TOC. Esse escalonamento do limite de corrente mínimo do controle de torque de TOC acompanha a diminuição esperada na corrente de linha, quando o motor recupera a velocidade síncrona (lembrar Figura 3).

## O PROBLEMA DO “SYMPATHETIC TRIP” DEVIDO AO DESEQUILÍBRIO DE CARGA CAUSADO POR UMA FALTA

A Figura 19 mostra o diagrama unifilar do sistema e os diagramas de seqüência para uma falta monofásica (single-line-ground / SLG) numa linha radial. Para a falta mostrada, o Disjuntor X deve eliminar a falta enquanto o Religador Y permanece fechado. A abertura do Religador Y para a falta mostrada resulta em confusão para a equipe de campo (o que poderia causar desnecessária verificação da linha) e um desgaste desnecessário para o contato do religador.

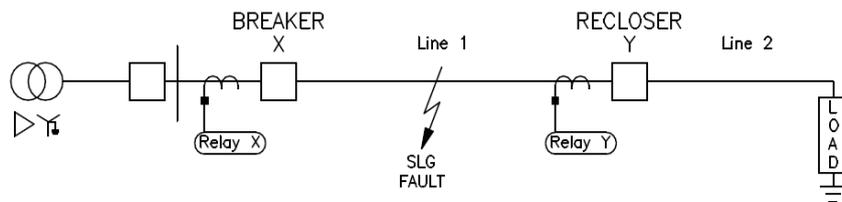


Figura 19: Sistema Unifilar Mostrando uma Linha Radial com uma Falta à Terra

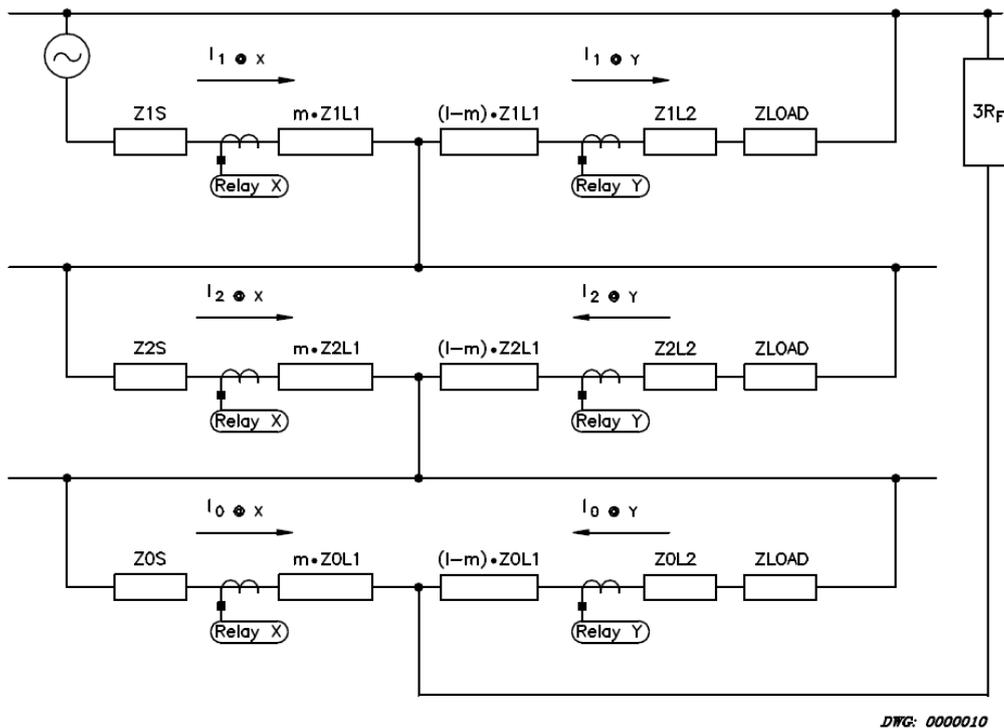


Figura 20: Diagrama de Seqüência para Falta Monofásica em um Alimentador Radial com uma Carga Conectada em Estrela Aterrada na Extremidade da Linha

No exemplo mostrado na Figura 19, a carga é conectada fase-terra na extremidade do alimentador. Com esse tipo de conexão de carga, o mesmo valor de  $Z_{CARGA}$  é incluído em todos os três diagramas de impedância da Figura 20. Se a carga for, ao invés, conectada fase-fase,  $Z_{CARGA}$  é uma impedância infinita no diagrama de seqüência zero.

Na Figura 20, observe que  $Z_{CARGA}$  redistribui as correntes totais de seqüência zero ( $3I_0$ ) e seqüência negativa ( $3I_2$ ). Essa redistribuição de correntes afeta a sensibilidade do Relé X.  $Z_{CARGA}$  diminui as correntes  $|3I_0|$  e  $|3I_2|$  medidas pelo Relé X. Este fato nos encoraja a abaixar o limite de atuação do elemento de sobrecorrente de terra para o Relé X, de forma a manter a sensibilidade para faltas à terra.

A presença de  $Z_{CARGA}$  nos diagramas de impedância de sequência negativa e zero permite ao Relé Y medir as correntes  $3I_0$  e  $3I_2$ , para uma falta na direção reversa. Este fato pode nos motivar a elevar o limite de atuação do elemento de sobrecorrente de terra do Relé Y, para dessensibilizar a proteção para faltas na direção reversa. Entretanto, isto causa a dessensibilização do Relé Y como proteção para faltas à terra, localizadas a sua frente, e complica a coordenação com o Relé X.

Se os limites de atuação do elemento de sobrecorrente de terra não direcional, ou do elemento de sobrecorrente de sequência negativa, para o Relé Y, estão com valores baixos de ajuste, qualquer um deles pode dar trip indesejavelmente para a falta reversa mostrada. Se esses elementos vão ou não operar, depende da localização da falta e da magnitude da impedância da carga.

Para cargas de alimentadores não aterradas,  $Z_{CARGA}$  não dessensibiliza a proteção de sobrecorrente de terra de sequência zero do Relé X. Nesse tipo de aplicação, o risco do Relé Y dar trip para a falta mostrada na Figura 19 é mínimo, porque o relé não sente a corrente de sequência zero para faltas na direção reversa envolvendo a terra.

## O CONTROLE DIRECIONAL PERMITE LIMITES MENORES E SEGUROS

Para manter a sensibilidade à faltas à terra, nós precisamos abaixar o valor de atuação (pick up) dos elementos de sobrecorrente de terra do Relé X. Isso possibilita ao Relé X manter o mesmo grau de cobertura de faltas à terra com alta resistência, como quando a carga não está conectada. Entretanto, abaixando os valores de atuação de sobrecorrente do Relé X pode requerer abaixar os ajustes dos valores de atuação do sobrecorrente de terra do Relé Y. Isso torna o Relé Y mais suscetível a operar para faltas reversas.

Limites sensíveis dos elementos de sobrecorrente de terra do Relé Y requerem controle direcional para manter o mesmo grau de segurança que os limites maiores de atuação. Esses limites de atuação do sobrecorrente devem ser ajustados acima do desequilíbrio normal do sistema, a menos que o elemento direcional de terra inclua uma lógica de segurança que considere o máximo desequilíbrio de carga esperado [2], [6].

### Exemplo de “Sympathetic Trip” Induzido por Uma Falta

Vamos usar o exemplo seguinte para ver como o controle direcional permite limites seguros e baixos de ajuste do elemento de sobrecorrente de terra do Relé Y. Para o exemplo do sistema radial mostrado na Figura 19, suponha os seguintes valores de impedância secundária do sistema:

Impedâncias da Linha e de Sequência Positiva da Fonte:  $Z_{1S} = Z_{1L1} = Z_{1L2} = 1 \Omega \angle 90^\circ$

Impedâncias de Sequência Zero da Linha e da Fonte:  $Z_{0S} = Z_{0L1} = Z_{0L2} = 3 \Omega \angle 90^\circ$

Impedância da Carga por Fase:  $Z_{CARGA} = 20 \Omega \angle 0^\circ$

Usando a análise de componentes simétricas, nós podemos facilmente calcular os valores de corrente de sequência zero e negativa, distribuídas para os Relés X e Y. A Tabela 1 resume os resultados desses cálculos para a falta na Linha 1, localizada em  $m = 0,5$ , onde  $m$  = comprimento da linha por unidade (a tensão da fonte de alimentação para esse exemplo é de 66,4 V secundários).

**Tabela 1: Magnitudes de Corrente para a Falta Fase A-Terra Mostrada na Figura 19**

Local de Medição	$I_{FASE}$ (PRÉ-FALTA)	$I_{FASE}$ (FALTA)	$I_2$ (FALTA)	$I_0$ (FALTA)	$V_2$ (FALTA)	$V_0$ (FALTA)
Relé X	3,3A $\angle -8,5^\circ$	27,32A $\angle -85,5^\circ$	9,11A $\angle -90,1^\circ$	8,59A $\angle -97,4^\circ$	---	---
Relé Y	3,3A $\angle -8,5^\circ$	0,29A $\angle -12,8^\circ$	0,68A $\angle 175,7^\circ$	1,89A $\angle 159,9^\circ$	13,67V $\angle -180^\circ$	38,66V $\angle 173^\circ$

Na Tabela 1, o elemento de sobrecorrente de terra não direcional do Relé Y, com limite de atuação menor do que 5,67 A secundários (corrente de operação de  $3I_0$ ) opera para a falta reversa mostrada na Figura 19.

### **Elementos Direcionais Evitam “Sympathetic Trips” do Religador**

Na Tabela 1, observe que a direção das correntes de sequência negativa e zero, para o relé Y, é em direção à barra. Esta é a mesma direção do fluxo de corrente de uma falta na direção reversa, envolvendo a terra. Uma vez que o sistema do nosso exemplo é radial, qualquer detecção de falta na direção reversa pelo elemento direcional de terra, deve temporariamente elevar o limite de operação do elemento de sobrecorrente de terra temporizado.

### **Proposta para o Elemento Direcional Detectar Condições de “Sympathetic Trip”**

Os relés aplicados nos alimentadores radiais da distribuição medem correntes de sequência negativa fluindo em direção à barra, para faltas desequilibradas fora da seção protegida. Essa direção do fluxo de corrente é a mesma de uma falta na direção reversa. Portanto, nós podemos usar elementos direcionais para faltas desequilibradas, e uma outra lógica para detectar as condições que precedem um “sympathetic trip”.

### **Detectando Faltas Desequilibradas Fora da Seção Protegida**

Para um alimentador radial da distribuição, qualquer falta que se configure como reversa para um elemento direcional, tem que estar fora da seção protegida. Detecte essa condição de falta na direção reversa usando uma combinação de elementos direcionais para faltas desequilibradas.

Use um elemento direcional para sequência negativa para reconhecimento de faltas reversas. Esse elemento direcional pode sentir faltas desequilibradas na direção reversa, se a carga do alimentador for conectada fase-terra, fase-fase, ou se houver um transformador de potência conectado em delta-estrela, entre o relé e uma falta monofásica fora da seção protegida.

Para aumentar a sensibilidade do elemento direcional, visando detectar faltas externas (onde a corrente de falta à terra é medida pelo relé), o conjunto completo formado pelo elemento direcional para falta desequilibrada também inclui um elemento direcional de sequência zero. Esse elemento é ativo para faltas desequilibradas, onde a magnitude da corrente de sequência zero é um múltiplo (maior do que um) da magnitude da corrente de sequência negativa [6].

Como nós vimos anteriormente nos gráficos de dados, os relés dos alimentadores medem correntes desequilibradas em ambas as ocasiões, durante e após a falta reversa. A magnitude dessa corrente desequilibrada diminui com o tempo, logo que os motores, ou recuperam a sua velocidade síncrona, ou são desligados pelos seus próprios dispositivos de proteção térmica para sobrecarga. Isto nos diz que a proteção tem que “suportar” esse período de tempo sob condições desequilibradas. Faça isso através do aumento temporário dos valores de atuação

dos elementos TOC. Nós podemos imaginar a redução da corrente no alimentador, em termos de tempo, como sendo uma série de degraus limites decrescendo, onde o limite de atuação de cada degrau é menor do que o degrau precedente. O degrau final é o valor ajustado de atuação do elemento TOC. Esta proposta é a mesma que aquela descrita na lógica desenvolvida pela NPC.

A saída referente à detecção de falta reversa, proveniente desse elemento direcional, é usada como uma das entradas para um temporizador programável. A duração dessa temporização é ajustável em um temporizador com funções de pickup temporizado (TDPU – Time-delayed pickup) e de dropout temporizado (TDDO – Time-delayed dropout). A saída desse temporizador é então usada na lógica que eleva, temporariamente, o valor de atuação dos elementos TOC.

### Elemento Direcional para Faltas Desequilibradas (patente pendente)

Um elemento direcional para sequência negativa modificado (32Q) detecta todas as faltas desequilibradas fora da seção protegida. A modificação é que o elemento direcional automaticamente comuta entre dois algoritmos de medidas direcionais. A decisão de qual algoritmo usar é baseada na diferença de ângulo, medida entre  $V_{A2}$  and  $I_{A2}$ :  $\angle Z_2$ . O elemento direcional para faltas desequilibradas usa o algoritmo descrito pela Equação 1, se  $\angle Z_2$  for maior do que  $30^\circ$ . Quando  $\angle Z_2$  for menor do que  $30^\circ$ , o relé usa a Equação 2 para os cálculos direcionais.

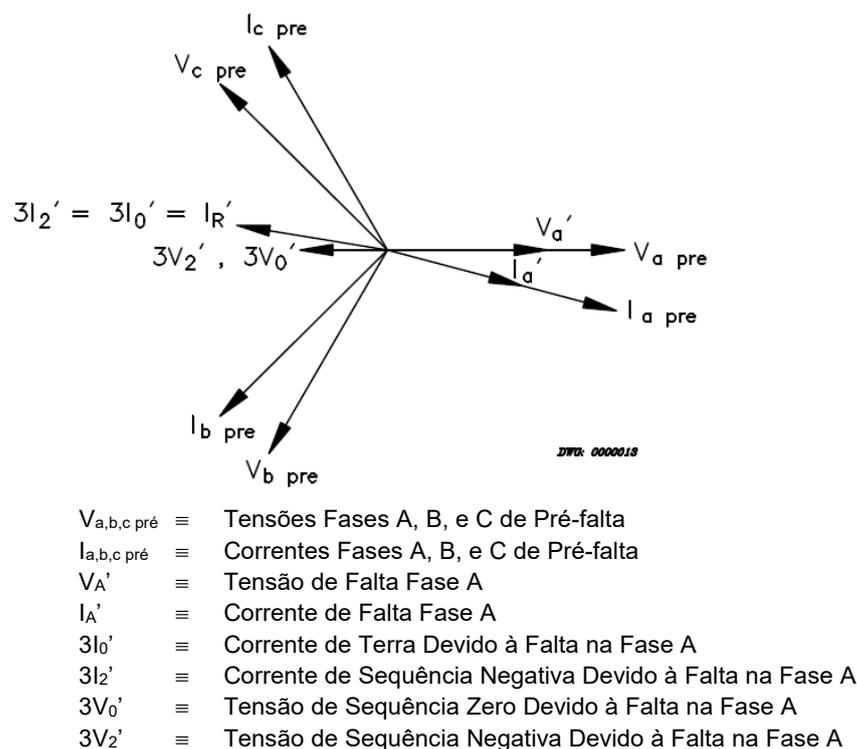
$$\text{Re}\left[V_{A2} \cdot (I_{A2} \cdot 1\angle Z_{1L})^*\right] / |I_{A2}|^2 \quad \text{Equação 1}$$

$$\text{Re}\left[V_{A2} \cdot (I_{A2})^*\right] / |I_{A2}|^2 \quad \text{Equação 2}$$

onde:

Re	≡	Componente Real
$V_{A2}$	≡	Tensão de Sequência Negativa Referida à Fase A
$I_{A2}$	≡	Corrente de Sequência Negativa Referida à Fase A
$Z_{1L}$	≡	Impedância Réplica da Linha de Sequência Positiva
*	≡	Conjugado Complexo

As Equações 1 e 2 diferem pois a Equação 1 inclui um deslocamento do ângulo de fase de  $I_{A2}$ . O fundamento lógico para essa diferença é melhor ilustrado através da revisão de fasores mostrada na Figura 21. Esses fasores representam os fasores das tensões e correntes de pré-falta e de falta, medidos pelo relé de proteção de um alimentador radial que não está sob falta, para uma falta na fase A de um alimentador radial adjacente. Para as condições de pré-falta com carga equilibrada, o ângulo entre  $V_{a\text{ pré}}$  e  $I_{a\text{ pré}}$  é o ângulo da carga do alimentador. Observe que  $I_{a\text{ pré}}$  está ligeiramente atrasada de  $V_{a\text{ pré}}$ . Isso indica que o alimentador está atendendo à uma carga ligeiramente indutiva.



**Figura 21: Fasores de Fase e de Sequência para a Pré-Falta e Falta à Terra fora da Seção Protegida Atendendo uma Carga com Baixo Valor Angular**

Na Figura 21, observe que a diferença angular entre  $3V_2'$  e  $3I_2'$  é pequena (menor do que  $30^\circ$ ). Sem ajustar o ângulo de  $3I_2'$  pelo ângulo de réplica da linha, o cálculo direcional de  $\text{Re}[V_2 \cdot (I_2)^*]$  é, de forma desejável, grande e positivo (positivo indica uma falta na direção reversa). Ajustando  $3I_2'$  pelo ângulo de linha do alimentador, para as quantidades de sequência dadas na Figura 21 (conforme Equação 1), diminuí a magnitude do cálculo direcional, tornando difíceis as decisões direcionais.

Fontes de alimentação típicas são muito indutivas e cargas de alimentadores são mais resistivas. Como o tipo das cargas (altamente indutivas ou resistivas) pode variar durante o dia, um elemento direcional completo tem que usar os dois algoritmos diferentes descritos nas Equações 1 e 2. Se o ângulo da impedância da carga do alimentador for sempre alto, o algoritmo mostrado na Equação 1 é a escolha apropriada para todas as detecções direcionais. O fato de possuir ambos os algoritmos, e destes estarem disponíveis para os cálculos direcionais, faz com que esta lógica do elemento direcional seja aplicável para a maioria dos circuitos dos alimentadores com ambas as cargas, indutiva e resistiva, as quais podem ser inseridas ou desinseridas a qualquer instante.

### Lógica de Detecção de Falta Equilibrada Fora da Seção Protegida (patente pendente)

Nós não podemos confiar nos elementos direcionais polarizados de sequência negativa ou zero, para detectar faltas equilibradas fora da seção protegida. A Figura 2 mostrou o diagrama de sequência para uma falta no alimentador adjacente. Observe na Figura 2 que a direção de  $I_1$  não é alterada durante a falta fora da seção protegida. Esta observação nos mostra que um elemento direcional de fase, de um alimentador que não está sob falta, não pode fazer a detecção de uma falta reversa, para uma falta na linha adjacente, ou na linha de alimentação.

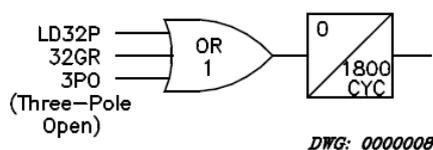
Quando aplicados em alimentadores radiais, as decisões efetuadas pelo elemento direcional de fase devem ser anuladas, ou ignoradas, ou nem usadas para evitar que haja conflito nas detecções de direção da falta, para os elementos de sobrecorrente de proteção controlados pelo torque.

Para reconhecer uma condição de falta trifásica fora da seção protegida, nós, ao invés, detectamos uma diminuição simultânea na tensão e na corrente de fase de todas as três fases. A seguir o critério de detecção de falta equilibrada fora da seção protegida: a magnitude de cada tensão de fase diminui até 10% e a queda em cada corrente de fase é de mais de 0,25 A (quando comparado com o ciclo precedente). Se o relé detecta essas reduções em todas as três fases simultaneamente, ele aciona o ponto da lógica denominado LD32P. Observe que LD32P é completamente independente da outra lógica direcional, para evitar os conflitos das decisões direcionais descritos acima.

### Lógica com Elemento Direcional Para Evitar o “Sympathetic Trip”

A lógica completa requerida para evitar a ocorrência de “sympathetic trip”, usando os elementos direcionais para detecção de faltas desequilibradas, modificados e a lógica LD32P, é muito similar à lógica da NPC, mostrada anteriormente. A única diferença entre a lógica mostrada na área tracejada da Figura 17, e a que é apresentada a seguir, é a lógica de detecção de faltas fora da seção protegida.

A Figura 22 ilustra a lógica necessária para substituir aquela que é mostrada dentro da área tracejada na Figura 17. Qualquer falta fora da seção protegida aciona o ponto da lógica 32GR, ou o ponto da lógica LD3P.



**Figura 22: Lógica de Detecção de Falta Fora da Seção Protegida Usando Relé Direcional**

Uma vantagem significativa dessa proposta é que ela não requer o uso de ajustes. Este é um benefício significativo, admitindo-se que os ajustes dos limites de atuação dos elementos de subtensão de fase (27A1, 27B1, 27C1), e dos elementos de sobrecorrente detectores de falta (50P6, 50Q6, 50G6), podem ser difíceis de ser determinados para todas as configurações de manobras dos alimentadores e de carregamento. No caso do sistema da NPC, as faltas no alimentador de 12,47 kV e as configurações de manobra e carregamento são bem conhecidas.

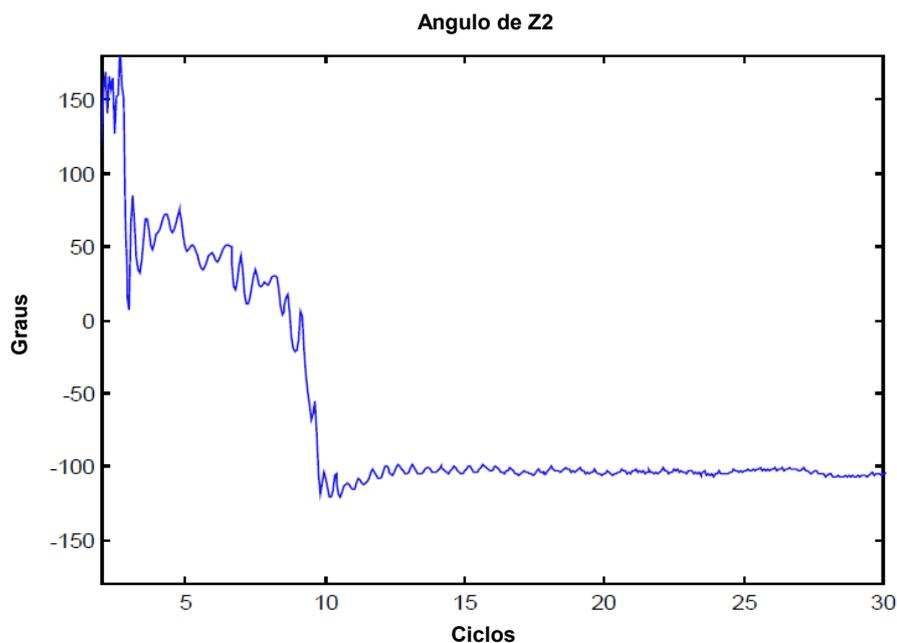
A mesma lógica para evitar “sympathetic trip” mostrada na Figura 22 é também muito apropriada nas aplicações com risco de abertura pelo “sympathetic trip” induzido por faltas.

### Performance da Lógica com Elemento Direcional para uma Falta no 69 kV Fora da Seção Protegida

A lógica com elemento direcional descrita acima não está instalada nos relés dos alimentadores 1210 e 1215. A fim de se determinar como teria sido o desempenho dessa nova lógica para evitar o “sympathetic trip,” usando relé direcional na falta do sistema da NPC descrita anteriormente, nós usamos os dados recuperados dos relés dos alimentadores em uma simulação no computador. Vamos agora examinar como teria sido o desempenho dessa lógica para o Alimentador 1215, durante e após a falta no 69 kV.

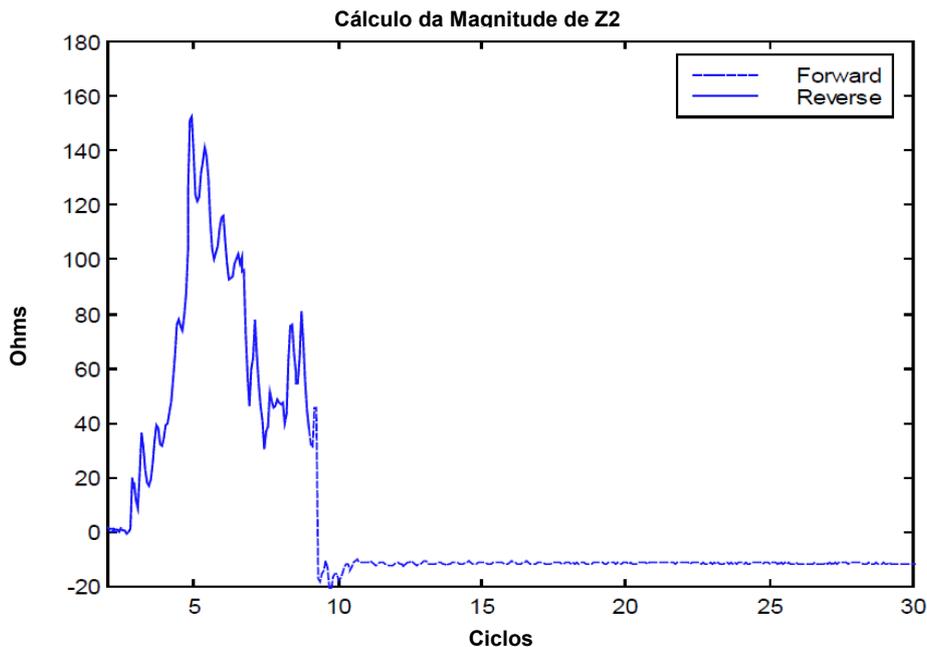
Sabemos que inicialmente a falta na linha de transmissão de 69 kV era desequilibrada. Para essa falta, nós esperamos que os relés dos alimentadores usem o elemento direcional para falta desequilibrada (32GR), para detectar a direção da falta como reversa.

Conforme dados do registrador de eventos do relé do alimentador 1215, inicialmente é feito o cálculo de  $\angle Z_2$  e é determinado qual algoritmo o elemento 32Q usaria para essa falta. A Figura 23 mostra o  $\angle Z_2$  calculado para todo o registro de eventos. Por favor, observe que os dados dos ângulos mostrados na Figura 23, antes do início da falta no 69 kV, não são confiáveis porque a magnitude das quantidades de sequência negativa é muito pequena. Por essa simples razão, os cálculos do elemento 32Q são inúteis até que o relé efetue a medida de  $3I_2$  maior do que o limite mínimo de atuação ajustado.



**Figura 23: Diferença Angular Entre  $V_{A2}$  e  $I_{A2}$  Medida pelo Relé do Alimentador 1215 Durante e Após a Falta à Terra no Sistema de 69 kV da NPC**

Na Figura 23 observe que após o início da falta no 69 kV, o  $\angle Z_2$  é inicialmente maior do que  $30^\circ$ , e assim permanece durante aproximadamente seis ciclos. Utilizando essa informação do ângulo, o elemento direcional para faltas desequilibradas usa o cálculo de impedância de sequência negativa com compensação do ângulo da linha, até depois do Ciclo 6. Após seis ciclos, o elemento 32Q usa o algoritmo do elemento direcional não compensado.



**Figura 24: Resultados dos Cálculos do Elemento Direcional 32Q para o Relé do Alimentador 1215 Durante e Após a Falta à Terra no Sistema de 69 kV da NPC**

A Figura 24 mostra os cálculos, para essa falta, do elemento direcional para detecção de faltas desequilibradas. O relé deve detectar uma falta reversa quando a impedância de sequência negativa calculada for maior do que a metade da impedância réplica da linha, mais  $0,1 \Omega$ . Nesse caso, a impedância réplica da linha é de  $2 \Omega$  secundários. Observando a figura, nós podemos ver que o elemento direcional, com ângulo compensado, corretamente detecta a falta no 69 kV como reversa, porque a impedância calculada é maior do que  $1,1 \Omega$  secundários, após o início da falta. (Conforme item [6] de Referências, o limite direcional reverso é automaticamente ajustado no valor da metade da impedância réplica da linha mais  $0,1 \Omega$ ). No instante 6 ciclos, aproximadamente, onde o elemento direcional para faltas desequilibradas usa o algoritmo descrito na Equação 2, o elemento 32Q continua a detectar a falta fora da seção protegida como reversa, porém tem valor resultante elevado na saída, quando comparado com o limite ajustado para reversa. Próximo ao Ciclo 10, onde a falta na alta tensão evoluiu, a operação do elemento 32Q é bloqueada pela lógica de supervisão de sobrecorrente de sequência negativa.

### **Comparação da Performance Das Novas Lógicas para Evitar o “Sympathetic Trip”**

Como se comportam esses novos esquemas lógicos para evitar o “sympathetic trip” quando de faltas reais fora da seção protegida? Vamos a seguir comparar a performance daquela lógica mostrada na área tracejada da Figura 17 (subtensão e não sobrecorrente) e a lógica com o esquema direcional da Figura 22, para o Alimentador 1215 durante a falta no 69 kV descrita anteriormente.

O último gráfico da Figura 25 mostra uma comparação de tempo dessas duas lógicas. Conforme esperado, ambos os esquemas lógicos atuaram corretamente (mostrado como uma transição de uma lógica 0 para uma lógica 1 no último gráfico da Figura 25). Também observe que a lógica com elemento direcional para detecção de faltas desequilibradas detecta a falta fora da seção protegida mais rapidamente do que a lógica com elementos de subtensão. Essa diferença de tempo é função de dois fatores: 1) o esquema com elementos de subtensão requer um elemento 27 com pick up temporizado, para evitar atuações falsas da lógica durante transitórios de tensão, e para conceder algum tempo para que os elementos de

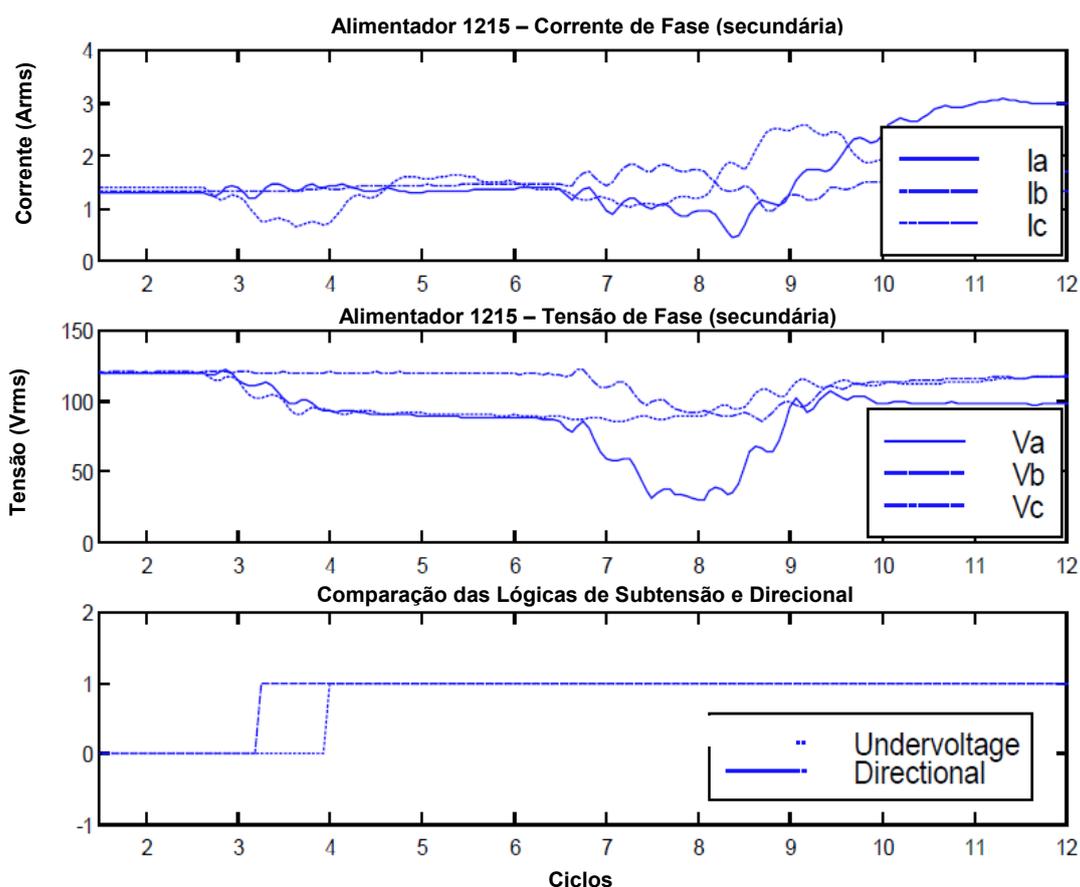
sobrecorrente atuem, e 2) os elementos de subtensão ajustados para  $0,85 \cdot V_{NOM}$  são tipicamente mais lentos do que os elementos direcionais. Após uma revisão cuidadosa dos dados, os engenheiros da NPC descobriram que o valor de um ciclo, para o tempo de pick up temporizado dos elementos 27, precisa ser diminuído para 0,5 ciclo (talvez até 0,25 ciclo).

Comparando a lógica de subtensão e não sobrecorrente (Figura 17) e a lógica para evitar “sympathetic trip” com elemento direcional (Figura 22), nós percebemos que a última é muito mais simples. Além disso, a lógica com elemento direcional elimina os requisitos de ajustes. A Tabela 2 lista uma comparação simples dessas duas propostas para o “sympathetic trip”.

**Tabela 2: Comparando as Lógicas de “Sympathetic Trip” da Figura 17 e da Figura 22**

	Figura 17	Figura 22
# portas E	2	0
# portas OU	3	1
# Temporizadores *	3	0
# Ajustes	7	0

\* Não incluindo o temporizador 3PO.



**Figura 25: Comparação da Performance das Duas Novas Lógicas de “Sympathetic Trip”**

## SUMÁRIO

Os pontos importantes apresentados nesse *paper* incluem:

1. O efeito das impedâncias de carga na sensibilidade dos elementos de sobrecorrente de terra. Abaixando os limites de atuação dos elementos de sobrecorrente de terra restabelece a sensibilidade de detecção de faltas.
2. Essas mesmas cargas permitem que os relés instalados à sua frente efetuem a medida da corrente de falta para faltas à terra reversas. Devido ao fato de que esses relés medem corrente residual para faltas à terra reversas, existe o risco de que eles atuem para “sympathetic trips”.
3. Elementos direcionais proporcionam segurança para os alimentadores radiais, quanto à ocorrência de “sympathetic trips”. Elementos de sobrecorrente com controle de torque, em conjunto com elementos direcionais, resolvem os problemas de ocorrências de “sympathetic trip” induzidos por uma falta, identificados nos itens 1 e 2 acima.
4. Cargas monofásicas de motor com baixa inércia perdem rapidamente a velocidade durante as condições de tensão reduzida, em consequência de uma falta. Essas perdas bruscas da velocidade dos motores causam problemas de recuperação demorada da tensão DVR para os sistemas de potência. O problema da DVR para a proteção de alimentadores se manifesta através de correntes elevadas de fase e de sequência, após a eliminação de uma falta. Devido ao fato de que o valor dessas correntes elevadas pode ser equivalente a muitas vezes o valor do limite de atuação dos elementos de sobrecorrente temporizados, usados para proteger o alimentador, esses relés podem atuar para “sympathetic trips”.
5. Nós apresentamos dois métodos viáveis para detectar faltas fora da seção protegida que precedem as condições de altas correntes para uma condição de DVR: 1) subtensão de fase e não sobrecorrente, e 2) elementos direcionais para detecção de faltas desequilibradas e DV/DI para faltas equilibradas.
6. Para os dois esquemas lógicos para evitar a ocorrência de “sympathetic trips” apresentados, a metodologia baseada em elementos direcionais requer um número menor de ajustes, e possibilita a detecção mais rápida de faltas fora da seção protegida.

## REFERÊNCIAS

- [1] E. O. Schweitzer III e J. Roberts, “Distance Element Design,” Anais da 19th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, Outubro 1992.
- [2] E. O. Schweitzer III, J. Roberts, E. Poggi, R. Arora, “Limits to the Sensitivity of Ground Directional and Distance Protection,” Anais da 19th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, Outubro 1992.
- [3] B. R. Williams, W. R. Schmus, e D.C. Dawson, “Transmission Voltage Recovery Delayed by Stalled Air Conditioner Compressors,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 3, Agosto 1992.
- [4] D. Jackson, “Sympathetic Tripping on Distribution Feeders,” Anais da 46th Annual Conference for Protective Relay Engineers, Texas A&M University, College Station, TX, Abril, 1993.

- [5] R. E. Owen, "Solutions to Sympathetic Tripping of Distribution Feeders," Rocky Mountain Electric League, Colorado Springs, CO, Maio 1977.
- [6] A Guzmán, J. Roberts, D. Hou, "New Ground Directional Element Operates Reliably for Changing System Conditions," Atas da 23rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, Outubro 1996.
- [7] K. Behrendt, "Relay-to-Relay Digital Communication for Line Protection and Control," Atas da 23rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, Outubro 1996.
- [8] O. Mirza, "A Novel Approach to Handle the Cold Load Pickup Problem," Atas da 22nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, Outubro 1995.

## BIOGRAFIA

**Jeff Roberts** recebeu seu BSEE da Washington State University em 1985. Ele trabalhou para a Pacific Gas and Electric como Engenheiro de Relés de Proteção por mais de três anos. Em 1988, ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc como um Engenheiro de Aplicação. Atualmente ele é o Gerente de Engenharia de Pesquisas.

Ele tem escrito muitos *papers* nas áreas de projetos de elementos de distância, sensibilidade dos elementos de distância e direcional, projeto do elemento direcional, e análises dos dados dos registros de eventos.

Ele detém várias patentes e tem outras patentes pendentes. Ele é também membro do IEEE.

**Terrance L. Stulo** recebeu seu BSEE da University of Wisconsin, Madison em 1983. Ele trabalhou como um engenheiro de proteção para muitas empresas do Meio-Oeste dos U.S.A., e para uma agência federal de marketing de potência. Atualmente ele é Chefe de Equipe do Grupo de Proteção de Sistemas na Nevada Power Company. Ele obteve seu PE no estado de Wisconsin.

**Andres Reyes** recebeu seu BSEE e seu BSME da Autonomous University of Santo Domingo em 1982. Ele trabalhou numa indústria de manufaturados de 1982 até 1990. Em 1990, ele ingressou na Nevada Power Company, onde sua última posição foi Engenheiro de Proteção de Sistemas até maio de 1997. Atualmente, ele é Engenheiro de Aplicação para a Omicron Electronics Corp. USA.

## APPENDIX A

ZCALC.MCD S. E. Zocholl 12/20/92

### Cálculo da impedância do motor como uma função do escorregamento através dos dados de placa do motor.

FLA := 271 Corrente nominal RHP := 1200 Potência (HP) nominal

LRA := 1626 Corrente com rotor travado QLR := .8 Torque com rotor travado

FLW := 1783 Velocidade nominal a plena carga

SynW := 1800 Velocidade síncrona

$I_L := \frac{LRA}{FLA}$  Torque com rotor travado p.u.  $rad := \frac{p}{180}$   $j := \sqrt{-1}$

$I_L := 6$

$R_0 := \frac{SynW - FLW}{SynW}$  Resistência do rotor à velocidade nominal

$R_1 := \frac{QLR}{I_L^2}$  Resistência do rotor com rotor travado

$R_3 := \frac{R_0}{5}$  Resistência do estator

$R := R_1 + R_3$  Resistência total do motor

$Z := \frac{1}{I_L}$  Impedância total do motor

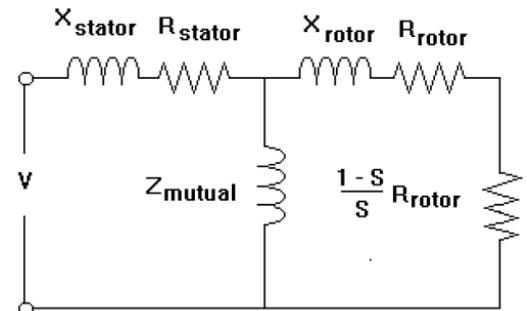
$X := \sqrt{Z^2 - R^2}$  Reatância total

$X_1 := \frac{X}{2}$  Reatância com o rotor travado Padrão Nema para QLR < 1 (para QLR > 1 usar 2/3)

$X_3 := X + X_1$  Reatância do estator

$X_0 := \frac{\tan(12.75 \cdot rad)}{1 + R_0 + R_3} - X_3$  Reatância do rotor à velocidade nominal

$X_m := 5$  Impedância mútua do motor (valor admitido)



## Cálculo da Impedância do Motor

$i := 0..14$  Índice para o número dos cálculos do escorregamento

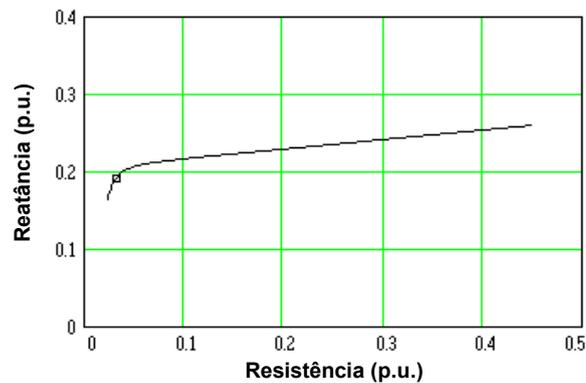
$\omega_i := i \cdot 0.07$  Velocidade  $s_i := 1 - \omega_i$  Escorregamento

$$R_{rotor_i} := \frac{R_1 - R_0}{1 - R_0} \cdot (1 - \omega_i) + \frac{(R_0 - R_1 \cdot R_0)}{1 - R_0}$$
 Resistência do rotor

$$X_{rotor_i} := \frac{X_1 - X_0}{1 - R_0} \cdot (1 - \omega_i) + \frac{(X_0 - X_1 \cdot R_0)}{1 - R_0}$$
 Reatância do rotor

$$Z_{estator} := R_3 + j \cdot X_3 \quad Z_{rotor_i} := \frac{R_{rotor_i}}{1 - \omega_i} + j \cdot X_{rotor_i} \quad Z_{mútua} := j \cdot X_m$$

$$Z_{motor_i} := Z_{estator} + \frac{Z_{rotor_i} \cdot Z_{mútua}}{Z_{rotor_i} + Z_{mútua}}$$
 Impedância nos terminais



$i$	$\omega_i$	$s_i$	$ Z_{motor_i} $	$\frac{\arg(Z_{motor_i})}{\text{rad}}$	$Z_{motor_i}$
0	0	1	0,165	81,865	0,023 + 0,164i
1	0,07	0,93	0,169	81,843	0,024 + 0,168i
2	0,14	0,86	0,173	81,785	0,025 + 0,172i
3	0,21	0,79	0,178	81,687	0,026 + 0,176i
4	0,28	0,72	0,182	81,538	0,027 + 0,18i
5	0,35	0,65	0,186	81,324	0,028 + 0,184i
6	0,42	0,58	0,19	81,024	0,03 + 0,188i
7	0,49	0,51	0,194	80,607	0,032 + 0,192i
8	0,56	0,44	0,199	80,02	0,034 + 0,196i
9	0,63	0,37	0,203	79,17	0,038 + 0,2i
10	0,7	0,3	0,208	77,885	0,044 + 0,204i
11	0,77	0,23	0,215	75,786	0,053 + 0,208i
12	0,84	0,16	0,223	71,895	0,069 + 0,212i
13	0,91	0,09	0,245	62,746	0,112 + 0,218i
14	0,98	0,02	0,521	30,062	0,451 + 0,261i