



## **Avaliação da Utilização de Relés de Sobrecorrente de Seqüência Negativa em Sistemas de Distribuição**

**Eng. Evaldo Flausino Senne**  
CPFL Paulista  
[flausino@cpfl.com.br](mailto:flausino@cpfl.com.br)

**Eng. Paulo César Scarassati**  
CPFL Paulista  
[pcsca@cpfl.com.br](mailto:pcsca@cpfl.com.br)

**Carlos Alberto Mohallem Guimarães, PhD**  
Universidade Federal de Itajubá  
[mohallem@unifei.edu.br](mailto:mohallem@unifei.edu.br)

**Eng. Newton José de Salles**  
CPFL Paulista  
[njsalles@cpfl.com.br](mailto:njsalles@cpfl.com.br)

**Paulo Marcio da Silveira, Dr.**  
Universidade Federal de Itajubá  
[pmsilveira@unifei.edu.br](mailto:pmsilveira@unifei.edu.br)

### **RESUMO**

O trabalho enfoca o uso das grandezas de seqüência-negativa nos sistemas de proteção. A ênfase é dada aos relés numéricos, uma vez que eles facilitaram o cálculo das componentes simétricas. As grandezas de correntes de seqüência-negativa (designada por  $I_2$ ) são muito úteis nos sistemas de proteção. A simplicidade no cálculo dessas grandezas, que é efetuado pelos relés numéricos modernos, reforçou o seu uso na teoria e nos métodos utilizados pelos dispositivos atuais dos sistemas de proteção.

Os esquemas de proteção apresentam constantes modificações e aperfeiçoamentos e as mudanças dos tradicionais esquemas de proteção muitas vezes requerem a aquisição e instalação de equipamentos adicionais.

Com a introdução dos relés numéricos, outras funções foram incorporadas ao equipamento, como por exemplo, sobrecorrente de seqüência negativa.

O objetivo é mostrar a aplicação dos recursos disponíveis nos relés numéricos com a utilização da função de sobrecorrente de seqüência negativa, seus benefícios e cuidados que deverão ser tomadas pelas equipes de campo, quando da operação desses equipamentos com o uso da função em sistemas de distribuição, face aspectos de proteção e operação em regime permanente e manobra no sistema envolvido.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Distribuição, Proteção e Sobrecorrente de Seqüência Negativa.

### **1. INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos, com avanços tecnológicos ocorridos, foram verificadas importantes contribuições na área de proteção pelo aparecimento de relés programáveis, denominados de numéricos. Eles

possuem diversas funções de proteção e seus ajustes incorporam os dados do sistema que se pretende proteger.

Uma lista abrangente de relés de sobrecorrente não direcionais incluiria relés instantâneos, relés de tempo definido e tempo inverso. A lista poderia ainda ser classificada por grandezas de operação incluindo correntes de seqüência-negativa, residual e fase individual. Considerando-se o conjunto e dependendo da forma da característica, da faixa de tempo e pick-up, e da dinâmica, esses relés são adequados para aplicações de proteção de alimentadores e de religadores instalados ao longo da rede de distribuição. Devido às necessidades passadas referentes ao uso de relés específicos ou separados no sistema, as características de sobrecorrente para essas aplicações podem parecer diferentes e desconexas. Entretanto, a tecnologia de relés microprocessados avançou até o ponto em que isto não é somente viável, mas tem vantagens econômicas importantes para que todas essas características sejam consideradas coletivamente como atributos de um relé de sobrecorrente universal. Além disso, as funções de backup e redundância são atendidas uma vez que um único processador facilmente acomoda o burden computacional de dois relés completos e independentes.

Até pouco tempo atrás, quando havia a necessidade de se detectar faltas tipo fase-fase na rede de distribuição nas tensões 15/25 kV, em não sendo possível, a opção era a instalação de um novo religador, evitando que o trecho de rede não visto pelo relé ficasse desprotegido.

Os elementos de sobrecorrente de seqüência negativa adicionada aos relés numéricos podem ser ajustados para responder com maior rapidez e sensibilidade às faltas fase-fase que a tradicional proteção de sobrecorrente de fase, além de evitar custos adicionais com a aquisição de um novo religador. Com isso são obtidos ganhos financeiros significativos pela redução de custos de novas aquisições e respectivas manutenções do equipamento.

A aplicação incorreta da função em sistemas de distribuição de 13,8/ 25 kV pode, vir a causar problemas para as concessionárias que pretendem utilizar sem critério técnico principalmente em atuações indevidas da proteção.

## 2. FUNÇÃO DE SEQUÊNCIA NEGATIVA

Qualquer desbalanço num sistema trifásico, com ou sem terra, faz com que apareça componentes simétricas de seqüência negativa. A componente de seqüência negativa pode ser calculada através da expressão:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

Donde,  $I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2.I_b + a.I_c)$  onde  $a = 1\angle 120^\circ$

Para tensão, vale a mesma expressão. Assim, uma proteção pode calcular a corrente de seqüência negativa I2 através das correntes de fase. Em condições normais de operação, com o sistema trifásico equilibrado, essa corrente é Zero.

Isto é, o surgimento da componente de seqüência negativa I2 significa que há desbalanço de corrente através do circuito onde está aplicada a proteção e pode ser causada por:

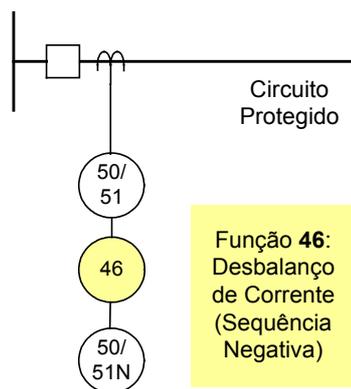
- Uma fase aberta
- Duas fases abertas
- Carga desequilibrada (comum para circuitos primários de Distribuição)

- Curto-circuito fase-terra
- Curto-circuito bifásico
- Curto-circuito bifásico-terra.

Um critério de desbalanço poderia ser o valor percentual da corrente I2 (seqüência negativa) com relação à corrente I1 (seqüência positiva).

O desbalanço de corrente é um fator grave para máquinas rotativas, uma vez que induz correntes de frequência dupla no rotor (ferro), causando aquecimento.

Portanto a função de seqüência negativa é utilizada principalmente para proteção de motores e geradores, podendo também se utilizada em alimentadores de redes de distribuição, desde que tomada os cuidados necessários para não ocorrer a operação indevida da proteção. Seu código ANSI é 46.



**Figura 1 – Função de Desbalanço de Corrente**

### 3. RELIGADORES DE DISTRIBUIÇÃO INSTALADOS AO LONGO DE ALIMENTADORES

A instalação de religadores automáticos convencionais (hidráulicos ou microprocessados) ao longo de redes de distribuição melhora os indicadores de continuidade de fornecimento, em razão de sua característica de operação, cuja função é restabelecer automaticamente a alimentação, no caso de faltas momentâneas e, em caso de faltas permanentes evitar a interrupção do sistema urbano de distribuição.

Entretanto, quando da necessidade de instalação de um novo religador em cascata por uma necessidade técnica (complementar zonas de proteção não detectada pelo equipamento de proteção instalado a montante) acarreta custos a concessionária que muitas das vezes não se sabe ao certo se o valor investido no equipamento trará retorno ou qual impacto trará nos indicadores de alimentadores, Subestação ou conjunto elétrico envolvido.

Uma das soluções que poderá ser utilizada para esse tipo de problema, é a utilização otimizada de funções de proteção do religador já instalado ou que poderá ser substituído, que somente alguns equipamentos modernos possuem em conjunto com a ferramenta proposta, possibilitando uma melhor tomada de decisão.

Sugere-se que o painel do religador seja provido de um controle microprocessado que disponha além das funções convencionais, sobrecorrente de seqüência negativa.

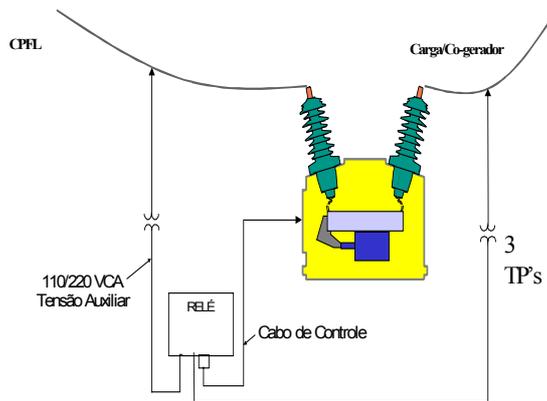
A fim de melhorar a qualidade, poderá também ser provido de outras funções tais como:

Utilização de proteções convencionais (50/51, 50/51N);

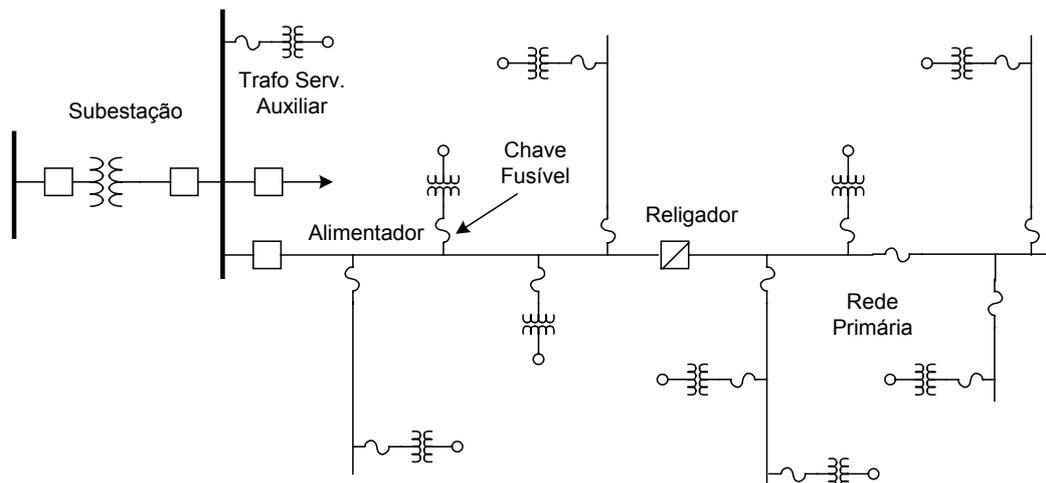
Utilização da proteção de sobrecorrente de seqüência negativa (46) em razão de baixos níveis de curto-circuito no ponto mais distante da rede, caso haja necessidade;

Possibilidade de utilização de lógicas para melhoria no resultado pretendido.

A operação e aplicação deste equipamento foi testada e verificada em campo com sucesso. A figura abaixo mostra o esquema de ligação do religador automático de distribuição.



**Figura 2 – Modelo de conexão de religador**



**Figura 3 - Coordenação da Proteção de Sobrecorrente de um Alimentador Radial**

#### 4. RELÉS DE PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE

Deverão ser verificadas que tipo de relés estão instalados nos bays de alimentadores (eletromecânicos, estáticos ou digitais). No caso, em sendo digitais, se o mesmo já tem incorporado a função de sobre corrente de seqüência negativa. Não possuindo essa função deverá ser avaliados a viabilidade e custo de sua substituição.

No caso de relés eletromecânicos os mesmos deverão ser substituídos e avaliados o custo da substituição.

Em ambos os casos, deverão ser verificados a redução de custos com manutenção.



**Figura 4 – Relé Convencional x Digital**

## **5. UTILIZAÇÃO DE NOVOS RECURSOS DE PROTEÇÃO NA ENGENHARIA DE DISTRIBUIÇÃO**

Elementos de sobrecorrente de seqüência negativa foram adicionados aos relés numéricos. Os elementos de sobrecorrente de seqüência negativa podem ser ajustados para responder com maior rapidez e sensibilidade às faltas fase-fase do que a tradicional proteção de sobrecorrente de fase, porque os elementos de sobrecorrente de seqüência negativa não respondem a cargas de corrente balanceadas.

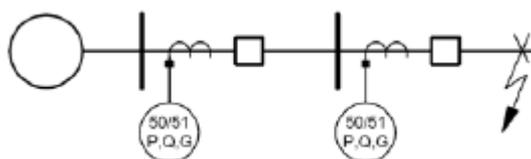
Da mesma forma como elementos de sobrecorrente de terra, os elementos de sobrecorrente de seqüência negativa podem ser ajustados abaixo dos níveis de corrente de carga. Por outro lado, os relés de sobrecorrente de fase têm de ser ajustados acima dos níveis de corrente de carga, tornando-se insensíveis para a detecção de faltas bifásicas com baixo nível de curto-circuito.

A tabela 1 mostra que correntes de seqüência negativa são geradas durante as faltas não balanceadas. Com a utilização de elementos de sobrecorrente de seqüência negativa, os elementos de sobrecorrente de fase são necessários apenas para faltas trifásicas.

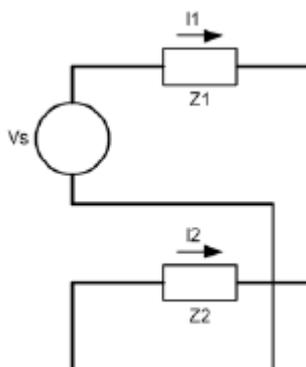
**Tabela 1 – Comparação entre Cobertura da Proteção Tradicional e da Nova Proteção**

Condição do Sistema	Correntes Geradas			Cobertura da Proteção Tradicional		Cobertura da Nova Proteção		
	Corrente de Fase ( $I_p$ )	Corrente Seqüência Negativa ( $I_2$ )	Corrente Seqüência Zero ( $I_0$ )	Elementos de Sobrecorrente de Fase	Elementos de Sobrecorrente Residual/Terra	Elementos de Sobrecorrente de Fase	Elementos de Sobrecorrente de Seqüência Negativa	Elementos de Sobrecorrente Residual/Terra
Falta FT	X	X	X		X			X
Falta FFT	X	X	X	X	X	X	X	X
Falta FF	X	X		X	X	X	X	
Falta Trifásica	X			X		X		
Carga Balanceada	X							

A Figura 5 mostra um alimentador radial típico que requer a coordenação dos dispositivos de proteção de sobrecorrente. Neste ponto, podemos considerar que a fonte é solidamente aterrada. Os estudos de curto-circuito ou os cálculos manuais vão apresentar as magnitudes das faltas correspondentes que o sistema vai fornecer aos relés. O dispositivo de sobrecorrente localizado mais à “jusante” vai ser ajustado com a maior sensibilidade. Os elementos de fase são ajustados com a maior sensibilidades possíveis, permanecendo sempre acima da máxima corrente de carga estimada. Infelizmente, isto limita sua sensibilidade para faltas fase-fase. Os elementos de terra ( $G = 3I_0$ ) são ajustados com a maior sensibilidade possível e acima do maior valor de desbalanço estimado. Para faltas entre fases, os elementos de fase operam. Para faltas monofásicas, os elementos de terra operam. Para faltas bifásica-terra, geralmente não há descoordenação pois os relés de terra são ajustados com valores entre 3 a 10 vezes mais sensíveis do que os elementos de fase, e o seu tempo de operação é menor. Para os dispositivos de sobrecorrente de seqüência-negativa, a preocupação é a sua coordenação com os elementos de fase e de terra.



**Figura 5 – Alimentador Ramal Radial**



**Figura 6 - Corrente de Falta Fase-Fase e Magnitude da Corrente de Seqüência-Negativa**

$$I_a = I_1 + I_2 = 0$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 = (a - a^2) I_2$$

$$I_c = a I_1 + a^2 I_2 = -(a - a^2) I_2$$

$$|I_b| = |I_c| = |I_2| \sqrt{3}$$

A Figura 6 é uma ilustração simples, ainda que descritiva, da relação entre a corrente de uma falta entre fases e a corrente de seqüência-negativa. Quando é efetuada a coordenação do elemento de sobrecorrente de fase e do elemento de sobrecorrente de seqüência-negativa, a corrente de fase equivalente do elemento de seqüência-negativa é  $\sqrt{3}$  da corrente  $I_2$  medida. Portanto, quando se coordena dispositivos de sobrecorrente de fase e seqüência-negativa, o fator  $\sqrt{3}$  tem que ser considerado.

Se um transformador delta-estrela estiver incluído na coordenação, os elementos de sobrecorrente de seqüência-negativa podem propiciar a coordenação da proteção de sobrecorrente de backup para os relés de sobrecorrente de terra no lado estrela do transformador, conforme mostrado nas figuras 7 e 8. A figura mostra a conexão do diagrama de seqüências para uma falta à terra no lado de baixa tensão de um transformador delta-estrela. Em transformadores ideais, simplesmente é efetuado o defasamento de  $30^\circ$  de um lado para o outro. A magnitude de corrente, em pu, não é alterada a partir do lado primário para o lado secundário. A corrente em pu no relé 51Q é a mesma que a do relé 51G. Além disso, o relé 51Q pode também proteger o transformador e o lado de baixa tensão do sistema para faltas entre fases desequilibradas. Observe que um relé de sobrecorrente de neutro no lado de alta tensão do transformador não fornece nenhuma proteção de backup para o lado de baixa tensão. A conexão delta no lado de alta tensão do transformador não permite a circulação das correntes de seqüência-zero, conforme indicado nas figuras 7 e 8 através de  $I_{0H} = 0$ . A discussão acima focou nos sistemas de

potência solidamente aterrados, onde a quantidade de corrente de faltas à terra é grande e a impedância equivalente de seqüência-zero da fonte é pequena.

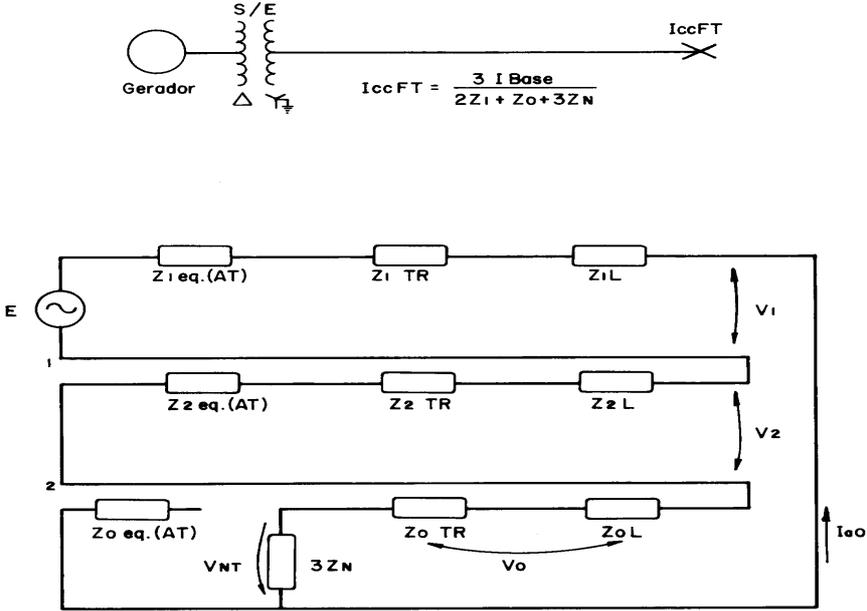


Figura 7 - Diagrama Unifilar e Diagrama de Seqüências – Fase-Terra

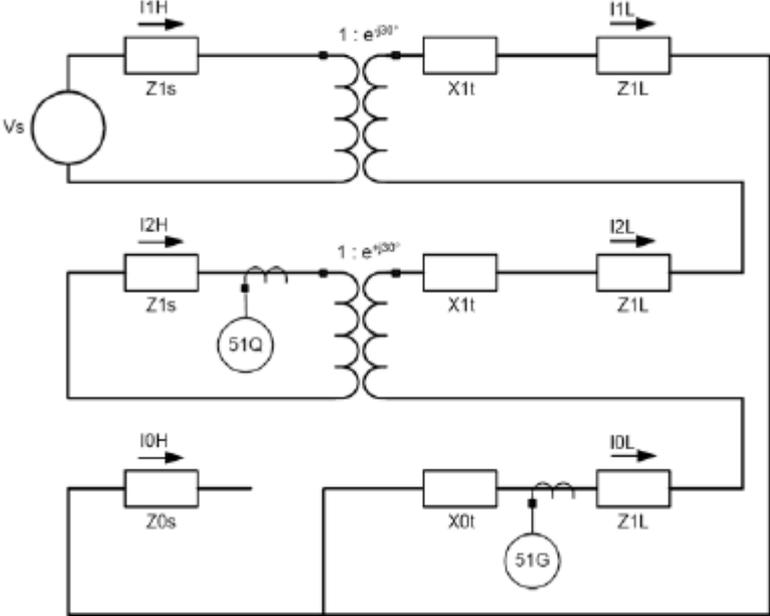


Figura 8 - Coordenação da Proteção de Sobrecorrente de um Alimentador Radial

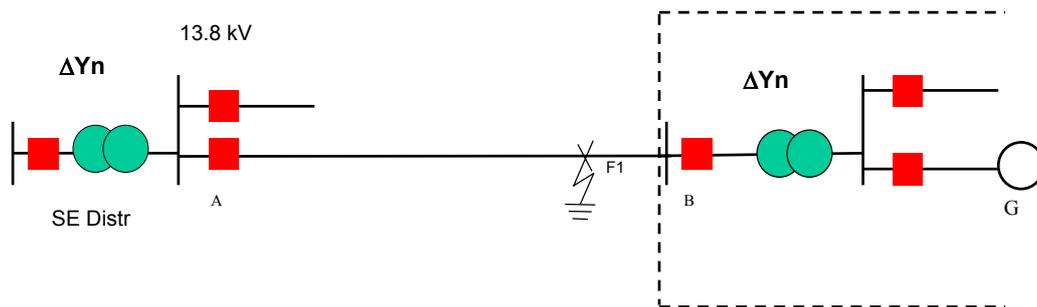
## 6. APLICAÇÕES PRÁTICAS

Até pouco tempo, quando havia circuitos cuja corrente de carga apresentava valores próximos a correntes de curto-circuito fase-fase, optava-se pela instalação de um novo religador ao longo do alimentador, já que o relé do bay de saída do alimentador não apresentava as características discutidas nos itens anteriores.

Entretanto, com a implementação de novos recursos disponibilizados pela engenharia de proteção, foram verificados ganhos na utilização dos mesmos.

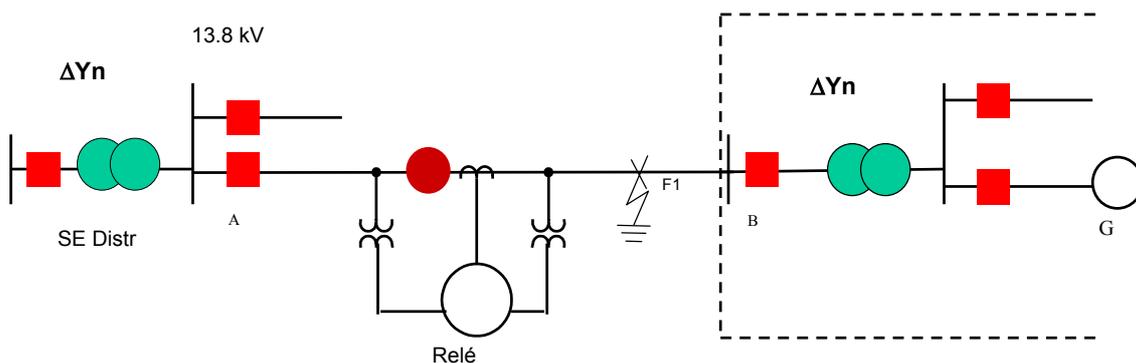
Os elementos de sobrecorrente de seqüência negativa também podem cobrir faltas fase-fase-terra, onde a resistência de falta à terra seja alta. Alta resistência de falta à terra faz a falta fase-fase-terra parecer como uma falta fase-fase para um relé.

O método de ajustes para elementos de sobrecorrente de seqüência negativa requer um esforço mínimo de coordenação.



**Figura 9 – Configuração Rede CPFL sem religador**

Com a instalação de um religador, conforme mostrado na figura 10, a mesma falta no ponto F1 será eliminada pela abertura do religador, fazendo com que um menor número de consumidores sofra uma interrupção no fornecimento de energia. Entretanto, nesse caso haverá um acréscimo nos custos envolvidos com a instalação do novo religador.



**Figura 10 – Configuração Rede CPFL com religador**

Uma maior sensibilidade para detecção de faltas é outro benefício da instalação deste religador, uma vez que o pick-up dos elementos de sobrecorrente poderá ser ajustado em valores menores.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As componentes de seqüência-negativa estão presentes em todos os tipos de falta, exceto na falta trifásica.

Os diagramas de seqüência-negativa são basicamente iguais aos diagramas de seqüência-positiva, exceto pela ausência das fontes e por defasamentos diferentes em algumas conexões dos transformadores de potência.

Faltas e desbalanços produzem componentes de seqüência-negativa.

As grandezas de seqüência-positiva foram corretamente associadas à carga e às condições equilibradas.

Hoje, os relés numéricos podem medir com confiabilidade as grandezas de seqüência-negativa e também fornecer as ferramentas para os engenheiros de relés de proteção analisarem essas componentes. Atualmente, esses profissionais podem utilizar as grandezas de seqüência-negativa com Na grande maioria dos casos é possível a utilização do uso de sobrecorrente de seqüência negativa na distribuição.

Cada caso deve ser analisado com rigor, para que se possa tomar decisões corretas, evitando principalmente a operação indevida das proteções para condições de carga ou operações de manobra na rede de distribuição.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALERO, Fernando. *Rebirth Of Negative-Sequence Quantities In Protective Relaying With Microprocessor-Based Relays*. Schweitzer engineering laboratories, inc., La Paz, Bolívia.

ELNEWEIHI, A. F. Schweitzer, E. O. Feltis, M. W. *Negative-Sequence Overcurrent Element Application and Coordination in Distribution Protection*. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 8, Number 3, July/1993, pp. 915-924.

SENNE, Evaldo F.; MOHALLEM, Carlos A. G.; SCARASSATI, Paulo C.; DIAS, Evaldo B. & ABOUD, Ricardo L. *Proteção da Interconexão de Cogeneradores e Utilização de Religadores em Paralelo com o Sistema de Distribuição da CPFL*, VIII, Power -Gen Latin América, 2003.

MAEZONO, Paulo Koiti. *Conceitos e Princípios de Proteção de Relés*, Virtus Consultoria e Serviços Ltda, 2005.

SENNE, Evaldo F.; MOHALLEM, Carlos A. G.; SCARASSATI, Paulo C.; SALLES, Newton J.; IWAMOTTO, Hamilton. & SUZUKI, Massayuki. *Critérios de Proteção e Manobra Condicionada para a Conexão de Autoprodutores em Paralelo com o Sistema de Distribuição da CPFL*, VII STPC 2003.

SENNE, E.F. CPFL, Mohallem. UNIFEI, Scarassati. CPFL. *Proteção da Interconexão de Cogeneradores e Utilização de Religadores em Paralelo com o Sistema de Distribuição da CPFL*, POWER GEN LATIN AMERICA, 2003

ELNEWEIHI, A. F. *Useful Applications for Negative-Sequence Overcurrent Relaying* - 22nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October 24-26, 1995.

SENNE, Evaldo Flausino. *Interconexão de Autoprodutores com o Sistema de Distribuição: Uma Abordagem pela Ótica da Proteção*. Monografia para Universidade Federal de Itajubá, Especialização em Engenharia Elétrica, 2003.

SCHWEITZER, E. O. III, Scheer G. W., Feltis, M. W. *A Fresh Look at Distribution Protection* II International Symposium on Distribution, Automation and Demand Side Management, Florida, 1992.