



## XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

### Aplicação de Religadores Automáticos para Proteção de Banco de Capacitores Série em Redes de Distribuição

<b>Marco Aurélio Andreoli Tres</b>	<b>Dirceu José Ferreira</b>	<b>Evaldo Flausino Senne</b>
<b>CPFL Paulista</b>	<b>CPFL Paulista</b>	<b>CPFL Paulista</b>
<a href="mailto:marcotres@cpfl.com.br">marcotres@cpfl.com.br</a>	<a href="mailto:djferreira@cpfl.com.br">djferreira@cpfl.com.br</a>	<a href="mailto:flausino@cpfl.com.br">flausino@cpfl.com.br</a>

#### PALAVRAS-CHAVE

Religadores Automáticos  
Banco de Capacitores Série  
Auto-Religamento  
Regulador de Tensão  
Partida de Motores

#### RESUMO

Um cliente irrigante atendido em 15 kV ligado no final de um alimentador expresso com aproximadamente 29 km de extensão, solicitou à CPFL a ligação de novas cargas de motores. Os estudos de viabilidade concluíram que o sistema não apresentava estabilidade de tensão para atender a plenitude das cargas e indicavam para a necessidade de construir uma nova subestação. No entanto, o tempo para a sua construção era insuficiente, pois o cliente necessitava ligar seus motores antes do período seco. Optou-se então pela instalação de um banco de capacitores série para oferecer uma melhor regulação de tensão para as cargas.

Normalmente a proteção do banco é composta por uma série de dispositivos e equipamentos para evitar avarias das unidades capacitivas durante a ocorrência de curtos-circuitos e surtos de tensão. Para que a instalação deste equipamento fosse possível dentro do prazo esperado, a CPFL projetou a sua instalação usando um religador automático como dispositivo de proteção.

Este artigo mostra a aplicação dos recursos disponíveis nos controladores microprocessados dos religadores automáticos e as parametrizações utilizadas para atender aos requisitos mínimos de proteção de um banco de capacitores série instalado em uma rede aérea de distribuição em 15 kV.

## 1. INTRODUÇÃO

A partir da solicitação de um cliente para o acréscimo de uma grande carga de motores atendidos em média tensão ligados no final de um alimentador expresso com aproximadamente 29 km de extensão, a CPFL elaborou um estudo de viabilidade técnica.

O estudo mostrou que o sistema existente não proporcionava estabilidade de tensão para o montante de carga desejada, apontando para a necessidade de construção de uma nova subestação próxima às cargas de motores. No entanto, o tempo disponível para a construção era insuficiente, pois o cliente pretendia ligar estes motores antes do período seco. Por isso, optou-se pela instalação de um banco de capacitores série para oferecer uma melhor regulação de tensão para as cargas.

Durante as simulações realizadas na configuração de rede sem o banco de capacitores série, verificou-se que o sistema responderia lentamente para a regulação de tensão no processo de partida dos motores devido à existência de bancos de reguladores de tensão e bancos de capacitores shunt chaveados automaticamente. Além disso, os motores do cliente são controlados por chaves do tipo soft-starter, cujos controles são sensíveis às variações bruscas de tensão. As cargas desligariam automaticamente quando a tensão ficasse fora da faixa nominal de operação. Com a rejeição de cargas por efeito “dominó” e em virtude da resposta lenta do sistema na regulação de tensão, surgiria a ocorrência de sobretensão no ponto de acoplamento comum e conseqüente queima de equipamentos, uma vez que as cargas do cliente não possuem proteção adequada. Diante disto, a CPFL preocupou-se em permitir o restabelecimento do sistema quando a tensão no ponto de acoplamento comum estivesse dentro de uma faixa preestabelecida na configuração de rede original, ou seja, com o banco de capacitores série desligado.

Nos bancos de capacitores série em redes de distribuição, a proteção é basicamente composta pelos seguintes equipamentos:

Pára-raios de distribuição;

Varistor;

Reator série;

Chave de by-pass automática;

Fusível externo para cada unidade capacitiva;

Disjuntor ou Religador.

O banco de capacitores série projetado pela CPFL não possuía ainda o varistor, reator série e automação da chave de by-pass e, conforme as especificações do fabricante das unidades capacitivas, estes equipamentos poderiam ser dispensados desde que alguns requisitos de proteção fossem atendidos, ou seja:

Corrente de Curto-Circuito ( $I_{cc}$ ): 2.126 A (pico)

Tempo Máximo de Atuação da Proteção: 500 ms

Tempo de Descarga do Banco: 5 minutos

Para contemplar todos estes requisitos, a CPFL adotou a aplicação de um religador automático com função de desligamento por falta de tensão no lado fonte e auto-religamento com lógicas programáveis que permitisse um tempo de fechamento do religador automático acima de 5 (cinco) minutos.

Nos últimos anos, com os avanços tecnológicos ocorridos, foram verificadas importantes contribuições na área de proteção com a inclusão de novas funções nos relés dos religadores automáticos, atualmente chamados de controladores microprocessados.

As primeiras gerações de religadores automáticos possuíam apenas as proteções tradicionais para sobrecorrentes de fase, terra e sensível de terra, e a interrupção e isolamento do arco elétrico eram feitas em óleo isolante, ampolas de vácuo dentro do óleo isolante ou gás SF<sub>6</sub> (hexafluoreto de enxofre). Em todos os modelos destes religadores automáticos era necessária a intervenção do homem para o fechamento dos contatos.

Nas novas gerações de religadores automáticos dotados de controladores microprocessados, além da proteção tradicional para sobrecorrentes de fase, terra e sensível de terra, foram incluídas várias funções de proteção antes vistas apenas nos relés microprocessados utilizados em disjuntores de alimentadores. Algumas destas novas funções de proteção dos controladores microprocessados são:

Proteção de Seqüência Negativa;

Bloqueio Direcional;

Sub e Sobre Frequência;

Sub e Sobretensão;

Proteção por Perda de Fase;

Auto-Religamento com Lógicas Programáveis.

Além da inclusão de novas funções de proteção, os novos controladores microprocessados armazenam uma quantidade considerável de eventos de proteção e registros de grandezas elétricas que auxiliam na investigação dos tipos de faltas no sistema elétrico e nos estudos sobre qualidade de energia. Eles também possuem protocolos de comunicação para automatização que permitem a inclusão de equipamentos para telecomando via rádio ou celular (GPRS).

Nos modelos mais avançados de religadores automáticos as ampolas de vácuo e os sensores de corrente são revestidas com epóxi, o que fez diminuir o tamanho e o peso do equipamento.

A aplicação incorreta desta função em sistemas de distribuição de 15 kV pode vir a causar problemas para as concessionárias que pretendem utilizá-la sem critério técnico, podendo causar atuações indevidas da proteção e conseqüentemente afetar a operação do sistema e danificar o equipamento.

## 2. REDE DE DISTRIBUIÇÃO

A rede de distribuição que atende ao cliente é constituída de um alimentador expresso com aproximadamente 29 km de extensão em cabo de alumínio 477 MCM. A Figura 1 ilustra o unifilar desta rede com a localização da subestação, dos equipamentos de rede e do ponto de acoplamento comum. A tensão nominal do sistema é de 13,8 kV e a tensão de fornecimento é de 13,2 kV. A Tabela 1 mostra os níveis de curto-circuito no ponto de acoplamento comum na configuração original:

Tabela 1: Correntes de curto-circuito na configuração original

<b>Correntes de Curto-Circuito</b>		
Curto-circuito	Corrente Simétrica (A)	Corrente Assimétrica (A)
Trifásico	865	1.230
Bifásico	749	1.060
Fase – Terra ( $Z_n = 0 \Omega$ )	392	650
Fase – Terra ( $Z_n = 40 \Omega$ )	165	270

<i>Impedâncias até o Ponto</i>	
<b>Z1 = Z2</b>	3,8772 + j 12,0098 Ohms
<b>Z0</b>	8,9253 + j 61,2486 Ohms

Na configuração original da rede, o sistema é operado com 3 bancos de reguladores de tensão (RT-1, RT-2 e RT-3) e bancos de capacitores shunt a jusante do ponto de acoplamento comum.

Na configuração da rede com banco de capacitores série, somente o banco de reguladores RT-1 permanece em operação, sendo que os demais são retirados de serviço (bloqueados na posição de neutro) e os bancos de capacitores shunt são desligados da rede.

Devido à inserção do banco de capacitores série, os valores das correntes de curto-circuito no ponto de acoplamento comum aumentaram, mas ficaram abaixo da capacidade nominal do banco de capacitores série (2.126 A), como visto na Tabela 2:

Tabela 2: Correntes de curto-circuito com banco de capacitores série

<i>Correntes de Curto-Circuito</i>		
Curto-circuito	Corrente Simétrica (A)	Corrente Assimétrica (A)
Trifásico	1.283	1.620
Bifásico	1.111	1.400
Fase – Terra ( $Z_n = 0 \Omega$ )	1.189	1.810
Fase – Terra ( $Z_n = 40 \Omega$ )	179	270

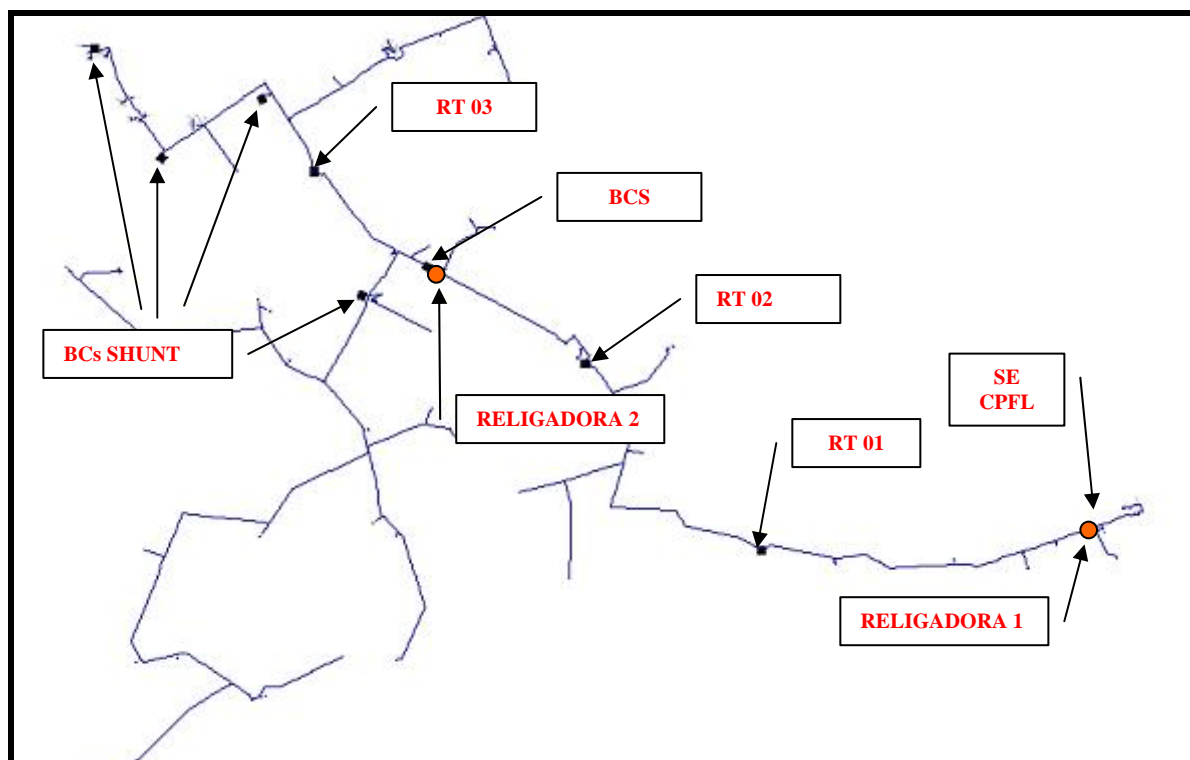


Figura 1 – Unifilar da rede com a localização da subestação, dos equipamentos de rede e do ponto de acoplamento comum.

## 2.1 Banco de Reguladores de Tensão

O banco de reguladores de tensão tem as seguintes características:

- corrente nominal: 300 A
- configuração da ligação: Delta Fechado
- tensão de referência: 13,45 kV
- insensibilidade: 1 %

## 2.2 Banco de Capacitores Série

O banco de capacitores série é constituído por 30 unidades capacitivas (10 por fase) de 250 kvar / 6 kV, 144  $\Omega$ . A potência total do banco é de 7500 kvar e a impedância resultante 14,4  $\Omega$ . Na configuração implementada, o banco de capacitores série proporciona uma compensação de aproximadamente 164 %.

A Figura 2 ilustra a configuração adotada para o banco de capacitores série.

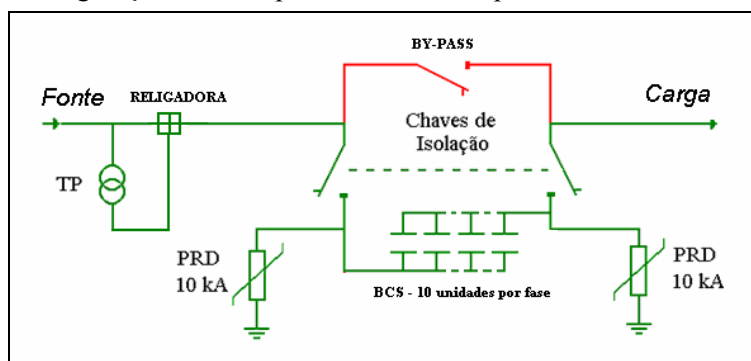


Figura 2 – Configuração do banco de capacitores série utilizada no atendimento às cargas de motores.

## 2.3 Cargas

As cargas do cliente são constituídas por motores de indução usados para irrigação. Os motores são acionados por chaves do tipo soft-starter. No total são 61 motores cujas potências variam de 50 CV a 250 CV. As chaves soft-starter tem a configuração mostrada na Figura 3, sendo que os tiristores permanecem no circuito mesmo após a partida dos motores, uma vez que não possuem chaves de by-pass.

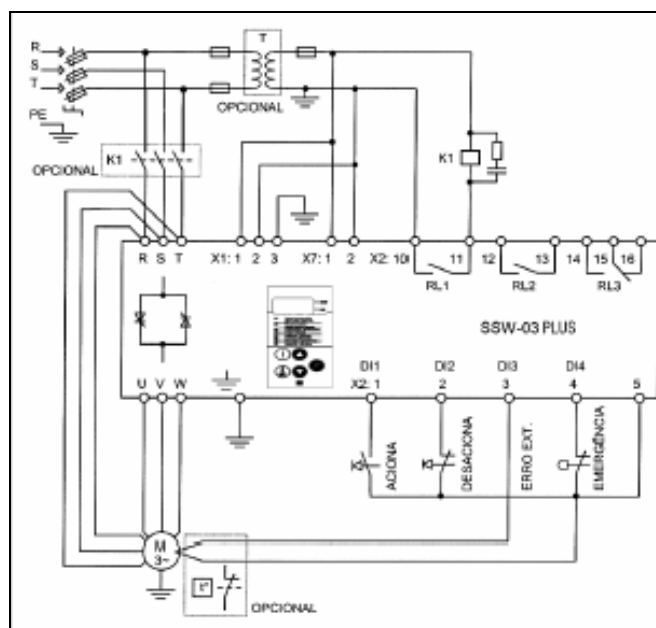


Figura 3 – Configuração da chave soft-starter.

## 2.4 Religador Automático

O religador automático utilizado para a proteção contra sobrecorrente, sub e sobretensão do banco de capacitores série tem as seguintes características:

- Interrupção a vácuo;
- Meio isolante em epóxi;
- Classe de tensão 15 kV;
- Alimentação do controlador microprocessado através de transformador de potencial (TP) externo, monofásico 13800/115V e bateria auxiliar de 24Vcc. O TP é usado para medição e para sensibilizar as proteções de sub e sobretensão do religador.
- Tensão nominal máxima de 15,5kV;
- Corrente nominal de 630A;
- NBI - 110kV;
- Capacidade de interrupção nominal de corrente de 12,5kA;
- Frequência - 60Hz;
- Funções de proteção contra sobrecorrente, sub e sobretensão;
- Auto-religamento com lógicas programáveis por verificação de tensão no transformador de potencial instalado no lado fonte.

### 2.4.1 Ajustes de Proteção

Para atender as especificações de proteção do fabricante do banco de capacitores série e da CPFL, foram implementados os seguintes ajustes no religador automático:

*Proteção contra Sobrecorrente:*

A função de sobrecorrente foi ajustada para atender o montante de carga instalada. Como o religador também exerce a função de proteção do banco de capacitores série, o tempo de atuação foi ajustado para 500 milissegundos, o tempo de religamento foi ajustado para 300 segundos (5 minutos) e a proteção sensível de terra foi bloqueada. As Figuras 4, 5, 6 e 7 ilustram as telas com estes ajustes:

Operations Parameters - Overcurrent Protection

Edit Group: **Normal** Change Setting Group Help Cancel OK

	Phase	Ground	Negative Sequence
Minimum Trip	400 Amps	30 Amps	120 Amps
Overcurrent Alarm	400 Amps	30 Amps	120 Amps
Alarm Time Delay	0 Seconds	0 Seconds	0 Seconds
	<input type="checkbox"/> Block Phase Trips	<input type="checkbox"/> Block Ground Trips	<input checked="" type="checkbox"/> Block NegSeq Trips

TCCP Minimum Trip [see help for min/max limits per CT ratio] ...

Figura 4 – Ajustes de sobrecorrente das proteções de fase e terra

**Reclosing**

Edit Group: **Normal**    Change Setting Group

Recloser Timing

	Phase/Neg Seq	Ground
Open Interval #1	300 Seconds	300 Seconds
Open Interval #2	300 Seconds	300 Seconds
Open Interval #3	300 Seconds	300 Seconds

Reset Time: 310 Seconds

☒ Reset targets 2 seconds after reclose

☐ Allow sequence coordination up to 2 operations

79G Ground Open Interval #3 (sec). MIN = 1.8, MAX = 1000

OK Cancel Help

Figura 5 – Ajustes do tempo de religamento e tempo de rearme

**Operations Parameters - TCC1**

Edit Group: **Normal**    Change Setting Group    TCC Editor    Help    Cancel    OK

TCC1

	Phase	Ground	Negative Sequence
Curve Type	Kyle 101	Kyle 101	Kyle 101
Time Multiplier	1	1	1
<input checked="" type="checkbox"/> TCC1 Mult Enable	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Time Adder	0 Seconds	0 Seconds	0 Seconds
<input type="checkbox"/> TCC1 Add Enable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Minimum Response Time	0.5 Seconds	0.5 Seconds	0.5 Seconds
<input checked="" type="checkbox"/> TCC1 MRTA Enable	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
High Current Trip	1 × Min Trip	1 × Min Trip	1 × Min Trip
HCT Time Delay	0.01 Seconds	0.01 Seconds	0.01 Seconds
<input type="checkbox"/> TCC1 HCT Enable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reset Coefficient	1e-006 Seconds	1e-006 Seconds	1e-006 Seconds
<input type="checkbox"/> TCC1 Disk Reset	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

☐ Fast Trip Block

User Curves...    Import Curve Parameters from TCC Editor

Import TCC1P    Import TCC1G    Import TCC1Q

Figura 6 – Ajustes das curvas de tempo definido das proteções de fase e terra



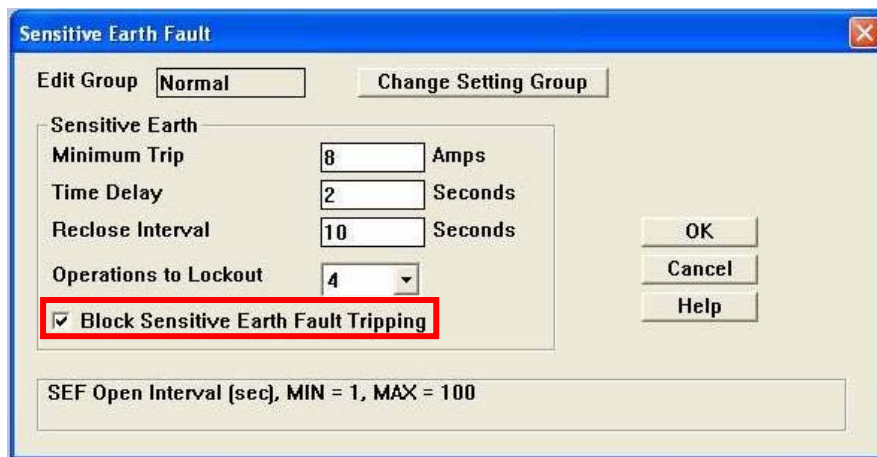


Figura 7 – Esta figura mostra que a proteção sensível de terra foi bloqueada.

#### *Proteção contra Sub e Sobretensão:*

Na situação original do sistema quando ocorre abertura das proteções a montante do ponto de acoplamento comum, os bancos de reguladores de tensão bem como os bancos de capacitores shunt permanecem no estado em que estavam, uma vez que a falta de fonte impede a operação dos controles. Com o restabelecimento do sistema e considerando o tempo de atuação dos controles, durante pequenos períodos as cargas do cliente ficam sujeitas às tensões fora dos seus limites operativos. Para evitar este tipo de problema o religador automático foi ajustado para que, na condição de abertura de proteção à montante, seja desligado e só religue após o sistema regular a tensão dentro das condições aceitáveis de operação. Este recurso é disponibilizado pela função de auto-religamento mostrada na Figura 8:

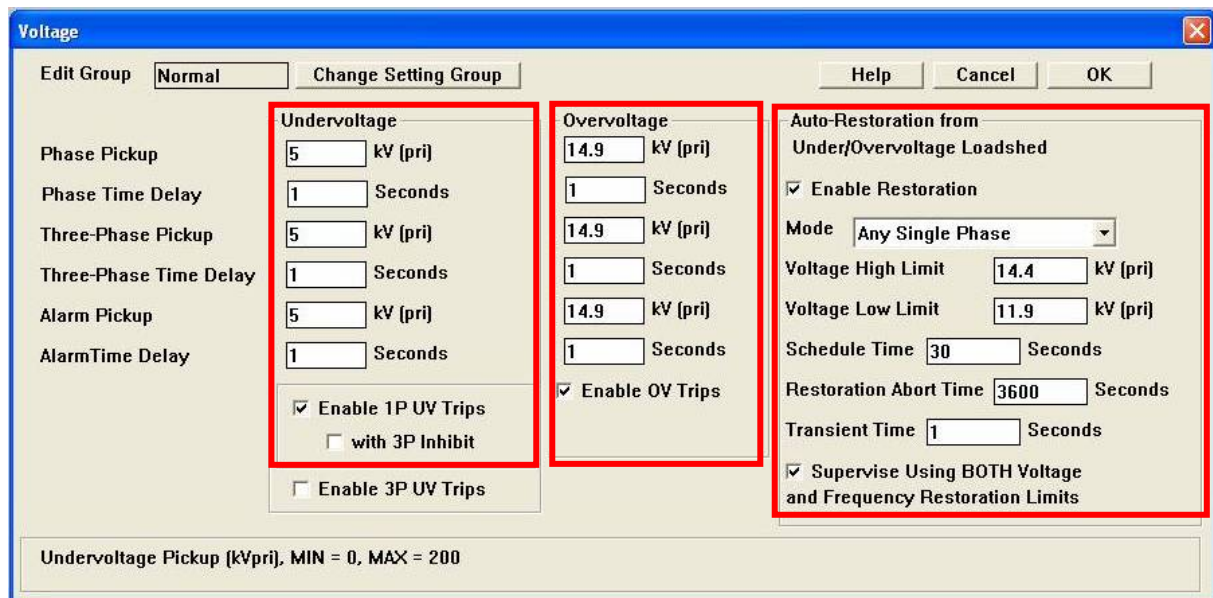


Figura 8 – Ajustes das funções de sub e sobretensão e de auto-religamento do controlador microprocessado.

A função “Undervoltage” simula a condição de abertura de proteção à montante através do sinal de tensão abaixo de 5 kV. A função de “Overvoltage” é a condição para abertura do religador em caso de ocorrer uma sobretensão. A função “Auto-Restoration” é a que libera o religamento desde que a tensão esteja dentro da faixa pré-estabelecida entre 11,9 kV a 14,4 kV. Deve-se tomar cuidado com relação ao tempo para abortar a restauração, especificamente desse religador automático. Neste caso o



tempo de 3600 segundos é o valor máximo oferecido pelo controlador microprocessado que foi utilizado. O ideal seria que este tempo pudesse ser ajustado além dos 3600 segundos de forma a evitar que, em caso de desenergização do circuito por um longo período, não ocorra o bloqueio indesejado do religador automático. Por se tratar de um controlador microprocessado dotado de protocolo de comunicação DNP3, pode-se optar pela instalação de um componente para telecomando via centro de operações caso não seja possível o restabelecimento do sistema antes dos 3600 segundos.

### 3. APLICAÇÕES PRÁTICAS

Com as implementações adotadas, primeiramente a CPFL realizou testes de campo, quando foi possível verificar a atuação do religador automático.

No teste de campo que verificou o comportamento do banco de capacitores série, a função de auto-religamento foi desabilitada. Com o equipamento inserido no circuito, as cargas do cliente foram ligadas paulatinamente, até próximo da energização do 20º motor, quando ocorreu a abertura do religador automático. O teste foi repetido mais duas vezes, escolhendo-se outros motores para serem ligados.

Os registros 64, 59 e 56 mostrados na Figura 9 dão os detalhes das ocorrências. O registro 53 retrata a atuação do religador pela função de subtensão, causada pela abertura intencional do religador situado à montante, quando foi possível atestar a operação adequada do religador.

Registro	Data	Hora	Evento	I a	Ib	Ic	3Io	Vc
53	30/08/2007	14:57:09.975	VOLTAGE TRIP	0	0	0	0	0
54	30/08/2007	14:12:17.059	SEQUENCE RESET	23	25	18	0	110
55	30/08/2007	14:01:56.857	FAULT DATA (pri)	555	647	746	7	76
56	30/08/2007	14:01:56.824	OVERCURRENT TRIP	555	647	746	7	21
57	30/08/2007	13:48:47.074	SEQUENCE RESET	24	26	16	1	109
58	30/08/2007	13:38:26.869	FAULT DATA (pri)	487	590	635	4	78
59	30/08/2007	13:38:26.836	OVERCURRENT TRIP	487	590	635	4	35
60	30/08/2007	13:01:20.568	gnd trip blk off	16	16	12	0	110
61	30/08/2007	13:01:17.063	GND TRIP BLK ON	17	15	12	0	110
62	30/08/2007	12:53:35.308	SEQUENCE RESET	16	15	12	0	110
63	30/08/2007	12:43:15.051	FAULT DATA (pri)	701	838	929	50	42
64	30/08/2007	12:43:15.011	OVERCURRENT TRIP	701	830	897	8	11

Figura 9 – Registro de eventos do religador

Com os registros das medições de qualidade de energia elétrica foi possível atestar que as correntes que provocaram a atuação do religador automático foram causadas pelo fenômeno de ressonância subsíncrona entre o banco de capacitores série e os motores, principalmente quando da partida dos motores de maior potência. Este fenômeno está ligado ao grau de compensação oferecida pelo banco de capacitores série, ou seja, 164%. Para contornar o problema, a CPFL concluiu que o equipamento fosse alterado para que a compensação ficasse próxima de 100%. Após estas alterações, a CPFL prosseguiu na implementação do banco de capacitores série projetado e manteve o uso do religador automático conforme havia previsto.

Durante o período de indisponibilização de uso do banco de capacitores série, o sistema operou na configuração original sendo mudado o grupo de ajustes do religador automático, alterando os valores das proteções de sobrecorrente, as curvas a tempo dependente, o tempo de religamento e a sequência de operações. Mesmo com a mudança do grupo de ajuste, as funções de proteção de sub e sobretensão e auto-religamento foram mantidas com os mesmos valores de ajustes.

Os recursos de auto-religamento tem mostrado bons resultados pelo fato de evitar que o cliente fique sujeito a sobretensões quando da ocorrência de piscas no fornecimento de energia elétrica.

#### **4. CONCLUSÕES**

Os resultados da aplicação do religador automático atenderam as expectativas, o que possibilitou a realização de testes no banco de capacitores série dentro do prazo previsto e apresentando também um bom desempenho na configuração da rede elétrica com o banco de capacitores série desligado.

Deve-se atentar para as parametrizações de auto-religamento para que não provoque aberturas indesejadas do religador automático em situações de manutenção da rede. A experiência contribuiu para que a CPFL atue junto aos fornecedores de religadores automáticos para melhorar os recursos disponibilizados.

#### **5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Norma Técnica CPFL Registro N°. 2912 – *“Proteção de Redes Aéreas de Distribuição – Sobrecorrente – Versão Maio/2003”*.

Manual de Instruções COOPER Power System – *“Guia de Programação do Controle Microprocessado de Religador Form 6 – S240-70-4P”*.

MARTINS, W. B.; CAMARGO, J.; SUZUKI, M.; FERREIRA, D. J.; CAIXETA, G. P.; *“Relatório Técnico CPFL – Novo sistema de compensação reativa – PD96, outubro, 2007.”*

CAMARGO, J.; *“Aplicação de capacitor série no sistema de distribuição de energia elétrica - X SENDI, 1988.”*.