**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA EP/FEA/IEE/IF**

**JOSÉ EZEQUIEL RAMOS**

**UNIVERSALIZAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA TECNOLOGIA CABOS PARA-RAIOS ENERGIZADOS (PRE)**

**SÃO PAULO**

**2010**

**JOSÉ EZEQUIEL RAMOS**

**UNIVERSALIZAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA TECNOLOGIA CABOS PARA-RAIOS ENERGIZADOS (PRE)**

Tese apresentada ao Programa de Pós

Graduação em Energia da Universidade de

São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade

de Economia e Administração / Instituto

de Eletrotécnica e Energia / Instituto de

Física) para obtenção do título de Doutor

em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Piantini

**SÃO PAULO**

**2010**

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.**

**FICHA CATALOGRÁFICA**

Ramos, José Ezequiel.

**Universalização da energia elétrica através da tecnologia cabos para-raios**

**energizados (PRE)** / José Ezequiel Ramos; orientador Alexandre

Piantini. – São Paulo, 2010

348p.: il.; 30 cm.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Energia) –

EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo.

1. Energia – qualidade 2. Descargas atmosféricas 3. Sistemas

elétricos de potência - proteção I. Título.

Aos meus pais Gabriel e Améla, à minha esposa Nadir e aos meus filhos Thiago e Tainara

“If you think you can do a thing or think you cannot do a thing, you’re right”

Henry Ford (1863 – 1947)

**AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter colocado tantas pessoas maravilhosas em meu caminho na realização deste trabalho. Entre elas o Prof. Piantini, por acolher desde o primeiro momento, a proposta de pesquisa sobre a Tecnologia PRE e por ter sido, como orientador, um amigo que sempre me incentivou, com serenidade e muita competência técnica. Agradeço a toda equipe de trabalho do Prof. Piantini, notadamente o Acácio S. Neto, Paulo Futoshi e Thaís Ohara, pelo apoio e importantes contribuições para realização deste trabalho. Sou muito grato pela zelosa atenção e ajuda prestada pela equipe da Biblioteca Prof. Fonseca Telles, através da Maria de Fátima, Maria Penha e Maria de Lourdes. Meus agradecimentos à Professora Dra. Francinete Perdigão e Prof. Dr. Tomás Daniel Menendez Rodrigues pela confiança. Agradeço também ao Hélio Bastos pela inclusão do projeto de pesquisa sobre o PRE no conjunto dos projetos de P&D da CERON e aos companheiros Marcos Azzi, Nicolau e Álvaro, o apoio concreto, transformados em providências que garantiram a realização dos trabalhos de campo.

Agradecimentos especiais ao Valdemir A. Pires, pela ajuda valiosa na realização das pesquisas e, sobretudo pelo apoio, amizade e companheirismo. Também de maneira especial, agradeço ao Ary D’Ajuz, grande amigo, que despertou em mim o interesse pela Tecnologia PRE. Agradeço imensamente ao Paulo Borges, José Braga, Maggio Henrique Lobo, André Luiz e Gilberto C. Menezes, às equipes da CERON em Porto velho, Ariquemes, Jaru, Ouro Preto do Oeste, Ji-Paraná e Pimenta Bueno, pelo empenho de todos na realização das medições de campo.

Meus agradecimentos aos Engenheiros e Técnicos da ELETRONORTE, sempre muito prestativos no fornecimento de informações imprescindíveis ao desenvolvimento desta tese. Adicionalmente, meus zelosos agradecimentos à equipe de gerentes e operadores da UHE Samuel.

Obrigado a minha esposa e filhos pelo apoio constante. Obrigado aos meus pais Gabriel e Amélia, às minhas irmãs Maria Margarida, Elizabeth, Bernadete, Claudete e meu irmão Márcio Fábio, pelo carinho, apoio e incentivo.

**RESUMO**

RAMOS, J. E. **Universalização da energia elétrica através da tecnologia cabos para-raios energizados (PRE)**. 2010, 348p. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

A universalização da energia elétrica, como uma das principais políticas públicas de inclusão social, tem como desafio a escolha de alternativas tecnológicas capazes de conciliar os aspectos de viabilidade técnica e econômica. A Tecnologia cabos para-raios energizados (PRE), objeto de estudo desta tese, se insere neste contexto. Assim, este trabalho consiste na análise de viabilidade do PRE no esquema trifásico, cuja instalação é associada à linha de transmissão 230 kV do sistema de transmissão de Rondônia. São analisados os aspectos de seu desempenho técnico, operacional e econômico. No aspecto técnico é analisado o desempenho do sistema de aterramento quanto à resistência de terra, tensões de toque e de passo, além de análise da queda de tensão, desequilíbrio de tensão e capacidade de carregamento da instalação. A abordagem técnica é aprofundada após análise do desempenho operacional avaliado a partir da classificação das interrupções verificadas em mais de 180 meses de operação do Sistema PRE Rondônia. Em decorrência dessa avaliação, são obtidos índices operacionais de continuidade, analisados comparativamente em relação a outras alternativas tecnológicas, visando analisar a viabilidade da Tecnologia PRE. Uma das constatações resultantes da análise das causas das interrupções indica um elevado impacto das descargas atmosféricas no desempenho do PRE. Este aspecto é extensivamente analisado quanto aos efeitos das descargas diretas e indiretas sobre a instalação, partindo-se de medições de campo nos contrapesos das torres, medições de resistividade do solo e ensaios na cadeia de isoladores do PRE. Simulações são realizadas utilizando-se os programas computacionais ATPDraw, ERM e CDEGS para análise das tensões resultantes de descargas diretas, tensões induzidas por descargas indiretas e cálculo de resistência de terra, respectivamente. São investigados os efeitos de parâmetros importantes no desempenho do sistema frente a descargas atmosféricas e comparados os números de interrupções estimadas e verificadas em campo, partindo-se de um roteiro metodológico minuciosamente detalhado, a fim de permitir a repetição dos procedimentos em situações semelhantes às analisadas neste trabalho. Após uma análise comparativa do desempenho do sistema PRE em relação a outras

alternativas convencionais, são estabelecidos índices de referência para o desempenho operacional da Tecnologia PRE e desenvolvida uma análise econômica da implantação dessa tecnologia em Rondônia.

Palavras-chave: Tecnologia PRE, descargas atmosféricas, interrupções, índices operacionais e desempenho operacional.

**ABSTRACT**

RAMOS, J. E. **Universalization of electric energy services through the energized shield wire line technology (SWL)**. 348p. Doctorate Thesis. Graduate Program on Energy, Universidade de São Paulo, 2010.

As one of the major public policies of social inclusion, the universalization of electric energy services has as a challenge to choose appropriate technological solutions that combine technical and economic aspects. The energized shield wire line technology (SWL), subject of this thesis, is in this context. This study aims at evaluating the viability of the SWL technology (three-phase scheme) installed on a 230 kV transmission line in the State of Rondônia. The analysis covers its technical, operational, and economic performance. The former aspect considers the performance of the grounding system regarding the ground resistance and step and touch voltages, analysis of voltage drop, voltage unbalance and the load capacity of the installation. The technical issue is deeply held after the analysis of the system operational performance in Rondônia based on the classification of outages considering a period greater than 180 months. The operational indices that result from this evaluation are compared to those corresponding to other technology alternatives in order to evaluate the viability of SWL technology. The analysis of the causes of interruptions reveals that lightning has a significant impact on the SWL performance. Thus, an extensive analysis is carried out regarding the effects of direct and indirect strokes on the SWL, including field measurements (soil resistivity and tower footing resistance) and laboratory tests (determination of the positive and negative critical flashover overvoltages of insulator strings). Simulations are performed using computer programs of proved validity (ATPDraw, ERM, and CDEGS) for the analysis of lightning overvoltages resulting from direct and indirect strokes and for the calculation of ground resistance. The effects of important parameters on the system lightning performance are investigated and the estimated and observed frequencies of interruptions are compared. The applied methodological procedure is described in detail, to allow the method to be used in other cases similar to the situations examined on this study. After a comparative analysis of the performance of the SWL with respect to other conventional alternatives, reference indices for the operational performance of

SWL Technology are set and an economic analysis of the SWL technology in Rondônia is carried out.

Keywords: SWL Technology, lightning overvoltages, lightning performance, interruptions, operational indices and operational performance.

**LISTA DE FIGURAS**

**Figura 2.1 Esquema proposto para uso do cabo para-raios como um sistema de distribuição monofásico em Média Tensão.................................................22**

**Figura 2.2 Diferentes esquemas para utilização da tecnologia PRE................................24 Figura 2.3 Cadeia de isoladores rígida................................................................................28 Figura 2.4 Torre típica de uma LT e o circuito equivalente do PRE trifásico................32 Figura 2.5 Linha lateral do PRE para atendimento a cargas distantes da LT...............33 Figura 2.6 Capacidade de carregamento do PRE em relação à distância.......................35 Figura 2.7 Diagrama unifilar mostrando a expansão da Tecnologia PRE em Gana..... 37 Figura 2.8 Área de abrangência do PRE Rondônia...........................................................43**

**Figura 2.9 Diagrama unifilar com indicação dos trechos e localidades contempladas no projeto do PRE Rondônia....................................................44**

**Figura 2.10 Parâmetros para modificação na cabeça das torres......................................46**

**Figura 2.11 Suportes para instalação dos cabos para-raios em torres sem e com cabos para-raios energizados.......................... ................................................ 46**

**Figura 2.12 Torre de derivação dos cabos para-raios para a linha lateral......................47 Figura 2.13 Cadeia de isoladores rígida, com dispositivo centelhador............................48 Figura 2.14 Circuito elétrico simplificado do Sistema RE de Rondônia..........................50**

**Figura 2.15 Instalação de capacitores de compensação, equalização e para-raios no Sistema PRE de Rondônia...........................................................................52**

**Figura 2.16 Conjunto resistor-reator (circuito R-L).........................................................52 Figura 2.17 Esquema geral de uma instalação do Sistema PRE de Rondônia................53**

**Figura 2.18 Capacidade de transmissão versus distância, utilizando-se o cabo de alumínio com alma de aço, código Auk.......................................................54**

**Figura 2.19 Cerca de proteção da malha independente – SE Ariquemes II....................56 Figura 2.20 Geometria da malha de terra independente – cargas maiores.....................57 Figura 2.21 Geometria da malha de terra independente – cargas menores....................57**

**Figura 2.22 Geometria da malha de terra das subestações distribuidoras......................59 Figura 2.23 Diagrama unifilar de proteção para as subestações supridoras..................61**

**Figura 2.24 Pontos de medição das tensões de passo e toque em Ariquemes (SEQM)...............................................................................................................64**

**Figura 2.25 Pontos de medição das tensões de passo e toque em Jaru (SEJA)...............65 Figura 3.1 Características do terreno no Estado de Rondônia.........................................69 Figura 3.2 Distribuição geográfica das estações meteorológicas da REMAR.................71 Figura 3.3 Precipitação em Porto Velho.............................................................................72 Figura 3.4 Precipitação mensal verificada no ano de 2002...............................................72**

**Figura 3.5 Características mensais dos dias e horas de trovoadas registradas em Porto Velho, no período de 1996 a 2005.....................................................74**

**Figura 3.6 Resistência de terra dos contrapesos das torres da LT SMAQ......................75 Figura 3.7 Resistência de terra dos contrapesos das torres da LT AQJR.......................75 Figura 3.8 Resistência de terra dos contrapesos das torres da LT JRJP........................76**

**Figura 3.9 Faixas de variação da resistividade do solo ao longo da LT SMAQ, trecho entre a UHE Samuel e Itapuã do Oeste..........................77**

**Figura 3.10 Faixas de variação da resistividade do solo ao longo da LT AQJR.............78**

**Figura 3.11 Faixas de variação de resistividade do solo ao longo da LT JRJP, trecho entre Jaru e Ouro Preto do Oeste.................................79**

**Figura 3.12 Faixas de variação da resistividade do solo entre Ji-Paraná e Pimenta Bueno....................................................................................................80**

**Figura 3.13 Faixas de variação da resistividade do solo entre Pimenta Bueno e Vilhena................................................................................................................81**

**Figura 3.14 Ilustração do método empregado para medição da resistência de terra do sistema de aterramento da Tecnologia PRE...............................................83**

**Figura 3.15 Valores medidos de resistência de terra no contrapeso da torre 164..........85**

**Figura 3.16 Medições de resistência de terra na malha da subestação distribuidora do PRE, em Itapuã do Oeste......................................................84**

**Figura 3.17 Croquis das malhas de terra das instalações PRE em**

**Samuel.................................................................................................................86**

**Figura 3.18 Croquis contendo os pontos de medição das tensões de toque e passo na subestação distribuidora do PRE em Itapuã do Oeste..............................88**

**Figura 3.19 Croquis com os pontos de medição das tensões de toque e passo na torre 164 e cerca transversal ao eixo da LT 230 kV.................................89**

**Figura 3.20 Proteção ao redor da torre 164, local de derivação da terceira fase para a subestação distribuidora em Itapuã do Oeste.....................................91**

**Figura 3.21 Diagrama unifilar da subestação distribuidora do PRE Itapuã do Oeste....................................................................................................................94**

**Figura 3.22 Curvas de carga do PRE Itapuã.....................................................................95**

**Figura 3.23 Curvas de carga – Medições feitas nos alimentadores da subestação distribuidora do PRE, em Itapuã do Oeste......................................................95**

**Figura 3.24 Localização das instalações do Sistema PRE em relação à subestação de 230 kV da HUE Samuel................................................................................98**

**Figura 3.25 Pontos de medição de corrente nas instalações do PRE em Samuel............99 Figura 4.1 Fluxograma das etapas de análise e classificação das interrupções.............103 Figura 4.2 Diagrama unifilar básico de proteção das subestações supridoras..............105**

**Figura 4.3 Diagrama de bloco ilustrando a relação da Tecnologia PRE com as demais partes do sistema elétrico em que está inserido................................111**

**Figura 4.4 Formato da planilha utilizada para sistematização das interrupções.........114**

**Figura 4.5 Diagrama unifilar simplificado, com indicação das subestações supridora (SEQM), distribuidora (SEJA) e subestação da**

**UTE Jaru (SEJR).............................................................................................118**

**Figura 4.6 Diagrama unifilar operacional da subestação Jaru, alimentada pela Tecnologia PRE e pelo terciário do transformador da subestação**

**ELETRONORTE.............................................................................................119**

**Figura 4.7 Participações do DEC e FEC de todo sistema elétrico contendo o PRE Jaru...........................................................................................................121**

**Figura 4.8 Interrupções de origem interna não-programadas do PRE Jaru (código 4)...........................................................................................................123**

**Figura 4.9 Pátio da subestação supridora do PRE em Samuel.......................................126 Figura 4.10 Pátio da subestação distribuidora do PRE em Itapuã do Oeste................126 Figura 4.11 Diagrama unifilar da subestação supridora do PRE em Samuel...............127**

**Figura 4.12 Proporção do DEC e FEC de todo o sistema elétrico contendo o PRE Itapuã....................................................................................................131**

**Figura 4.13 Interrupções de origem interna não-programadas do PRE Itapuã...........132 Figura 5.1 Tipos de descargas atmosféricas.....................................................................141 Figura 5.2 Tipo de descargas atmosféricas nuvem-solo..................................................142 Figura 5.3 Etapas iniciais e propagação do líder escalonado (“stepped leader”).........142 Figura 5.4 Etapas para estabelecimento da corrente de retorno (“return stroke”).....143**

**Figura 5.5 Descargas elétricas no interior da nuvem**

**(“K-streamers and J-streamers”)..................................................................145**

**Figura 5.6 Etapas da descarga de retorno subseqüente**

**(“subsequent return stroke”)..........................................................................145 Figura 5.7 Evolução de uma descarga atmosférica nuvem-solo.....................................146**

**Figura 5.8 Distribuição das amplitudes dos picos de corrente de descargas nuvem-solo descendentes negativas................................................................152**

**Figura 5.9 Parâmetros da frente de onda – descarga negativa.......................................154 Figura 5.10 Representação da LT 230 kV, entre a UHE Samuel e Ji-Paraná..............158 Figura 5.11 Torres da LT 230 kV no trecho entre a UHE Samuel e Ji-Paraná............158 Figura 5.12 Estrutura de suspensão simples – torre básica............................................159 Figura 5.13 Cabo OPGW instalado entre os cabos para-raios energizados..................161 Figura 5.14 Contrapeso típico da LT 230 kV, entre a UHE Samuel e Ji-Paraná.........162 Figura 5.15 Montagem da cadeia de isoladores para ensaio...........................................163 Figura 5.16 Ensaio de impulso atmosférico......................................................................164**

**Figura 5.17 Formas de onda de impulso atmosférico aplicado na**

**cadeia de isoladores..........................................................................................165 Figura 5.18 Disrupção no centelhador da cadeia de isoladores sob ensaio...................165**

**Figura 5.19 torre típica de 33 metros no trecho entre UHE Samuel e Itapuã do Oeste.................................................................................................168**

**Figura 5.20 Geometria de uma torre típica de 30 metros...............................................170**

**Figura 5.21 Circuito representativo para obtenção da tensão de topo da torre...........173 Figura 5.22 Forma de onda da corrente de descarga utilizada nas simulações............175**

**Figura 5.23 Relação entre a resistência de terra com solo ionizado e a resistência de terra submetida a corrente de 60 Hz.........................................................177**

**Figura 5.24 Principais dados da LT SMAQ utilizados nas simulações..........................178**

**Figura 5.25 Tensões nos terminais dos isoladores do PRE, resultante de descarga direta no meio do vão, com amplitude igual a 5 kA......................................179**

**Figura 5.26 Tensões nos terminais dos isoladores do PRE, resultante de descarga direta no meio do vão, com amplitude igual a 31 kA....................................180**

**Figura 5.27 Tensões fase-terra na cadeia de isoladores do PRE, trecho entre a subestação supridora em Samuel e a torre 40, simulada com descarga de corrente igual a 5 kA..................................................................................182**

**Figura 5.28 Tensões fase-terra na cadeia de isoladores do PRE, trecho entre a subestação supridora em Samuel e a torre 40, simulada com**

**descarga de corrente igual a 31 kA................................................................183 Figura 5.29 Descarga atmosférica em uma estrutura metálica......................................188**

**Figura 5.30 Rampa de corrente se propagando ao longo do canal, sem indicação da imagem.........................................................................................................190**

**Figura 5.31 Rampa de corrente na estrutura metálica, sem indicação da imagem......191 Figura 5.32 Tensões induzidas em função da altura ht da estrutura metálica..............193 Figura 5.33 Tensões induzidas U, medida e calculada - Caso A....................................194 Figura 5.34 Tensões induzidas U, medida e calculada – Caso B....................................194**

**Figura 5.35 Tensões induzidas entre os terminais do isolador da linha PRE mais próximo ao local de incidência da descarga, para diferentes distâncias (d) entre o condutor e o canal de descarga. I = 45 kA, tf = 2** ∝**s...................195**

**Figura 5.36 Descarga atmosférica incidindo a uma distância “d” da linha PRE, em frente a uma das torres..............................................................................196**

**Figura 5.37 Tensões induzidas entre os terminais do isolador da linha PRE mais próximo ao local de incidência da descarga, considerando diferentes tempos de frente (tf). I = 45 kA, d = 50 m.......................................................197**

**Figura 5.38 Mapa isoceráunico do Brasil.........................................................................199 Figura 5.39 Localização dos sensores que compõem a rede BrasilDAT........................200**

**Figura 5.40 Localização dos sensores da rede BLDN no Estado de Rondônia.............202**

**Figura 5.41 Distribuição espacial da densidade de descargas nuvem-solo (positivas e negativas) detectadas pela rede de sensores da BLDN**

**no período de 2000 a 2004...............................................................................203**

**Figura 5.42 Mapa de densidade de descargas atmosféricas no Brasil, com resolução de 25 km x 25 km, obtido a partir de registros da rede**

**BrasilDAT e LIS...............................................................................................205 Figura 5.43 Representação simplificada do EGM...........................................................207 Figura 5.44 Representação do EGM sobre uma torre típica do PRE............................209 Figura 5.45 Raio de atração de acordo com o EGM........................................................210**

**Figura 5.46 Incidência de descargas atmosféricas em estruturas com diferentes alturas..............................................................................................211**

**Figura 5.47 Área de exposição de uma LT a descargas atmosféricas............................213**

**Figura 5.48 Representação de uma linha de transmissão dada pela rotina LCC do ATPDraw........................................................................................216**

**Figura 5.49 Representação no ATPDraw dos isoladores................................................217**

**Figura 5.50 Modelagem da LT 230 kV com cabos para-raios energizados, considerando a presença do cabo OPGW......................................................217**

**Figura 5.51 Distribuição dos valores de resistência de terra da LT SMAQ..................218 Figura 5.52 Distribuição dos valores de resistência de terra da LT AQJR...................222**

**Figura 5.53 Espaços de abrangência da distância máxima d(I) e distância crítica dc(I,h)....................................................................................................232**

**Figura 5.54 Tensões no topo da torre calculadas para dois circuitos equivalentes distintos.............................................................................................................233**

**Figura 5.55 Estrutura típica de LT 34,5 kV utilizada pela CERON..............................243**

**Figura 5.56 Interrupções no Sistema PRE Itapuã devido a saídas da LT 230 kV provocadas por descargas atmosféricas entre a UHE Samuel e**

**Ji-Paraná. Os dados de 1997 são a partir de 22 de setembro.......................250**

**Figura 5.57 Interrupções no Sistema PRE Jaru devido a saídas da LT 230 kV provocadas por descargas atmosféricas entre a UHE Samuel e**

**Ji-Paraná. Os dados de 2000 cobrem o período até 14 de novembro..........252**

**Figura 5.58 Operação e abertura da chave de aterramento rápido na subestação do PRE, em Samuel, para permitir que a linha PRE seja reenergizada....255**

**Figura 5.59 Distribuição mensal do número total de descargas atmosféricas (DA) no Estado de Rondônia....................................................................................257**

**Figura 5.60 Distribuição mensal do número médio de interrupções por descargas atmosféricas verificadas no Sistema PRE de Rondônia...............................259**

**Figura 5.61 Comparação entre NIV e NIE do Sistema PRE de Rondônia....................263 Figura 5.62 série histórica do índice operacional DEC da CERON...............................278 Figura 5.63 Série histórica do índice operacional FEC da CERON..............................279 Figura 5.64 Características dos índices DEC e FEC do Sistema PRE Itapuã...............281 Figura 5.65 Características dos índices DEC e FEC do Sistema PRE Jaru..................282**

**Figura 5.66 Características mensais do FEC associado ao PRE Itapuã, referente ao período de 22/09/1997 a 2007.....................................................................283**

**Figura 5.67 Características mensais do FEC associado ao PRE Jaru, referente ao período de 1996 a 14/11/2000.....................................................................284**

**LISTA DE TABELAS**

**Tabela 2.1 Capacidade de transmissão da tecnologia CCMAT........................................16 Tabela 2.2 Dados das localidades incluídas no projeto PRE.............................................43 Tabela 2.3 Resultados dos ensaios feitos na cadeia de isoladores rígida..........................48 Tabela 2.4 Impedâncias de balanceamento........................................................................51 Tabela 2.5 Capacitâncias de equalização e compensação.................................................51**

**Tabela 2.6 Dados utilizados para cálculo das malhas de terra independentes do PRE Rondônia..............................................................................................55**

**Tabela 2.7 Dimensões e resistências de terra calculadas para as malhas independentes.....................................................................................................56**

**Tabela 2.8 Dados técnicos das malhas de terra das subestações distribuidoras ............58 Tabela 2.9 Levantamento das falhas em equipamentos do PRE Jaru.............................66**

**Tabela 3.1 Relação dos municípios onde estão localizadas as estações meteorológicas automáticas de superfície da REMAR..................................70**

**Tabela 3.2 Dias de chuva, valores médios de temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica............................................................................................71**

**Tabela 3.3 Dias e horas de trovoadas em Porto Velho – de 1996 a 2005.........................73 Tabela 3.4 Valores previstos e medidos no sistema de aterramento do PRE Itapuã......85 Tabela 3.5 Resultado das medições de tensão de toque e tensão de passo.......................91 Tabela 3.6 Desequilíbrios de tensão medidos na RD de Itapuã do Oeste........................92 Tabela 3.7 Medições de tensão nas subestações supridora e distribuidora.....................97**

**Tabela 3.8 Correntes medidas na malha de terra da subestação (Im) e malha de terra independente (Imi)................................... ..........................................99**

**Tabela 4.1 Codificação das interrupções de origem externa e origem interna.............113 Tabela 4.2 Potência instalada da UTE Jaru, no ano de 1995........................................ .116**

**Tabela 4.3 DEC e FEC anual de todo sistema elétrico contendo o**

**Sistema PRE Jaru............................................................................................120**

**Tabela 4.4 Falhas de equipamentos verificadas no PRE Jaru........................................123 Tabela 4.5 Evolução do atendimento a Itapuã do Oeste, antes do PRE........................125**

**Tabela 4.6 Evolução no atendimento a Itapuã do Oeste através da Tecnologia PRE................................................................................................128**

**Tabela 4.7 DEC anual de todo o sistema elétrico contendo o Sistema PRE Itapuã................................................................................................................129**

**Tabela 4.8 FEC anual de todo o sistema elétrico contendo o Sistema PRE Itapuã................................................................................................................130**

**Tabela 4.9 Falhas nos equipamentos do PRE Itapuã, no período de 22/09/1997 a 2007....................................................................................................................133**

**Tabela 4.10 Interrupções não-programadas da LT 230 kV............................................135 Tabela 5.1 Relações entre Ng e Th obtidas em diferentes regiões do Mundo...............149**

**Tabela 5.2 Tipos e quantidades de estruturas na LT 230 kV, trecho entre a UHE Samuel e Ji-Paraná.................................................................................159**

**Tabela 5.3 Alturas e quantidades de torres da LT 230 kV entre a UHE Samuel e Ji-Paraná...........................................................................................................160**

**Tabela 5.4 Tensões disruptivas medidas e normalizadas para diferentes ajustes do centelhador............................................................................... .....166**

**Tabela 5.5 Resistências de terra calculadas para algumas torres da LT SMAQ..........175**

**Tabela 5.6 Trechos da LT SMAQ considerados nas simulações de descargas diretas................................................................................................................178**

**Tabela 5.7 Valores mínimos de corrente que provocam disrupção na cadeia de isoladores de ambos os condutores da linha PRE.........................................181**

**Tabela 5.8 Tensão nos terminais da cadeia de isoladores do PRE.................................184 Tabela 5.9 Tensão fase-terra no PRE................................................................................184**

**Tabela 5.10 Combinação de valores de resistência de terra e corrente de descarga que podem provocar disrupção na cadeia de isoladores do PRE................185**

**Tabela 5.11 Densidades de descargas atmosféricas em Porto Velho..............................199 Tabela 5.12 Coeficiente das distâncias de atração rs e rg.................................................208**

**Tabela 5.13 Correntes críticas de disrupção na cadeia de isoladores dos cabos PRE da LT SMAQ – Trecho entre a UHE Samuel e Itapuã do Oeste.................220**

**Tabela 5.14 Resistências de terra calculadas para algumas torres da LT AQJR.........221**

**Tabela 5.15 Correntes críticas de disrupção para descarga incidente na torre de 30 m da LT AQJR.......................................................................................222**

**Tabela 5.16 Correntes críticas de disrupção para descarga incidente na torre de 33 m da LT AQJR..................................................................................... 223**

**Tabela 5.17 Número de descargas diretas por trecho e total na linha PRE Itapuã......226**

**Tabela 5.18 Estimativas do número médio anual de descargas diretas (NL) e do número de interrupções (NIDD) da linha PRE Itapuã.................................227**

**Tabela 5.19 Estimativa do número médio de descargas diretas (NL) com indicação daquelas que resultaram em interrupções da linha PRE Itapuã – período de 10,28 anos.....................................................................................................227**

**Tabela 5.20 Estimativa do número médio anual de descargas diretas (NL) e do número de interrupções (NIDD) da linha PRE Jaru..................................................228**

**Tabela 5.21 Estimativa do número total de interrupções no Sistema PRE de Rondônia, causadas por descargas diretas.......................................................................230**

**Tabela 5.22 Estimativa do número médio de vezes em que as tensões induzidas na linha PRE Itapuã ultrapassam o valor da CFO............................................237**

**Tabela 5.23 Estimativa do número total de interrupções no Sistema PRE de Rondônia, causadas por descargas indiretas....................................................................238**

**Tabela 5.24 Estimativas do número médio anual de interrupções da linha PRE Itapuã................................................................................................................239**

**Tabela 5.25 Estimativas do número médio de interrupções na linha PRE Itapuã, no período de 10,28 anos..................................................................................240**

**Tabela 5.26 Estimativas do número médio anual de interrupções da linha PRE Jaru.................................................................................................240**

**Tabela 5.27 Estimativas do número médio de interrupções da linha PRE Jaru, no período de 4,875 anos..................................................................................241**

**Tabela 5.28 Estimativa global do número médio de interrupções no Sistema PRE de Rondônia...........................................................................................................241**

**Tabela 5.29 NIDI médio anual estimado para a LT 34,5 kV. Os valores entre parêntesis representam o NIDI pro 100 km de linha....................................245**

**Tabela 5.30 NIDD e NIDI médio anual estimado para a LT 34,5 kV. Os valores entre parêntesis estão referidos à extensão de 100 km de linha...................246**

**Tabela 5.31 Desempenho comparativo entre o PRE e LT 34,5 kV frente a descargas atmosféricas......................................................................................................247**

**Tabela 5.32 Resumo das interrupções por descargas atmosféricas verificadas e estimadas – PRE Itapuã..................................................................................251**

**Tabela 5.33 Resumo das interrupções por descargas atmosféricas verificadas e estimadas – PRE Jaru......................................................................................253**

**Tabela 5.34 Valor médio mensal do número de interrupções verificadas (NIV) no período, causadas por descargas atmosféricas no Sistema PRE**

**de Rondônia......................................................................................................259**

**Tabela 5.35 DEC e FEC totais do sistema elétrico contendo o PRE Itapuã, referente ao período de 22/09/1997 a 2007.....................................................................267**

**Tabela 5.36 DEC e FEC totais do sistema elétrico contendo o PRE Jaru, referente ao período de 1996 a 14/11/2000.....................................................................272**

**Tabela 5.37 Índices de desempenho operacional do Sistema PRE de Rondônia..........274**

**Tabela 5.38 Índices de desempenho operacional de todo sistema elétrico contendo o PRE Rondônia........................................................................................... ...277**

**Tabela 5.39 Índices operacionais comparativos...............................................................279**

**Tabela 5.40 DEC e FEC do PRE Itapuã totalizados mensalmente. A quantidade de meses do período é indicada pela letra n........................................................285**

**Tabela 5.41 DEC e FEC do PRE Jaru totalizados mensalmente. A quantidade de meses do período é indicada pela letra n........................................................286**

**Tabela 5.42 DEC, FEC e TMR de referência do PRE de Rondônia – 1º trimestre......287 Tabela 5.43 DEC, FEC e TMR de referência do PRE de Rondônia – 2º trimestre......288 Tabela 5.44 DEC, FEC e TMR de referência do PRE de Rondônia – 3º trimestre......288 Tabela 5.45 DEC, FEC e TMR de referência do PRE de Rondônia – 4º trimestre......289**

**Tabela 5.46 DEC, FEC e TMR anuais – Valores de referência do PRE de Rondônia...........................................................................................................289**

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACC: Acoplamento Capacitivo entre Cabos

ACSR: Aluminum Conductor Steel Reinforced

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

AT: Alta Tensão

ATP: Alternative Transients Program

ATPDraw: Pré-processador gráfico do ATP

AWG: American Wire Gage

A21: Estrutura de ancoragem - suporta deflexão com ângulo até trinta graus; BLDN Brazilian Lightning Detection Network

BT: Baixa Tensão

CCC: Conta de Consumo de Combustível

CCMAT: Corrente Contínua Modulada em Alta Tensão

CDEGS: Current Distribution, Electromagnetic interference, Ground and Soil structure analysis

CEMAT: Centrais Elétricas Matogrossenses

CEMIG: Companhia Energética de Minas Gerais

CEPLAC: Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira CERON: Centrais Elétricas de Rondônia

CIGRÉ Conseil International des Grands Réseaux Électriques CF: Chave Faca

CFO: Critical impulse flashover voltage

COD Centro de Operação da Distribuição

CODI: Comtê de Distribuição

COR: Centro de Operação Regional

COS: Centro de Operação de Sistemas

Cpc: Confiabilidade por consumidor

CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DA: Descarga Atmosférica

DEC: Duração equivalente de interrupção por consumidor;

DIC: Duração das interrupções por unidade consumidora considerada DNAEE: Departamento Nacional de águas e Energia Elétrica DPC: Divisor Potencial Capacitivo

EAT: Extra Alta Tensão

EGM: Electrogeometric Model

ELETROBRAS: Centrais Elétricas Brasileiras

ELETRONORTE: Centrais Elétricas do Norte do Brasil

EMTP Electromagnetic Transients Program

ERM: Extended Rusck Model

ERSA: Empresa Mineradora Estanho de Rondônia S.A. FEC: Frequência equivalente de interrupção por consumidor FIC: Frequência de interrupções por unidade consumidora considerada IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística ICMS: Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers IMPACT Improved Accuracy from Combined Technology INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IREQ: Institute of Research of Hydro-Quebec

LIOV Lightning-Induced OverVoltage

LIS: Lightning Imaging Sensor

LPATS Lightning Positioning and Tracking Sensor

LTCA: Linha de Transmissão em Corrente Alternada LTCC: Linha de Transmissão em Corrente Contínua LT AQJR: Linha de Transmissão entre Ariquemes e Jaru LT JRJP: Linha de Transmissão entre Jaru e Ji-Paraná LT SMAQ: Linha de Transmissão entre Samuel e Ariquemes MCM: Mil Circular Mil

MDT: Modelo Digital do Terreno

MT: Média Tensão

MRT: Monofilar com Retorno pela Terra

MSFC: Marshall Space Flight Center

NASA: National Aeronautics and Space Administration NBI: Nível Básico de Isolamento

NBR Norma Brasileira Registrada

Ng: Número médio de descargas atmosféricas que incidem no solo por ano, em relação a determinada área, ou densidade de descargas atmosféricas NIDA: Número de Interrupções provocadas por descargas atmosféricas, com saída de operação apenas do Sistema PRE

NIDD: Número estimado de Interrupções por Descargas Diretas NIDI: Número Estimado de Interrupções por Descargas Indiretas NIE: Número de Interrupções Estimadas, resultante de cálculo das interrupções provocadas por descargas diretas e indiretas na LT com

cabos para-raios energizados

NIV: Número de Interrupções Verificadas, provocadas por descargas atmosféricas sobre a LT 230 kV , com saídas da LT e PRE, ou apenas

do PRE

ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico

OPGW: Optical Ground Wire

ORON: Departamento Regional de Operação de Rondônia PLC: Power Line Carrier

PRE: Cabos Para-Raios Energizados

RD: Rede de Distribuição

REMAR: Rede de Estações Meteorológicas do Estado de Rondônia RMC: Resistência Mecânica Calculada

SBE: Sociedade Brasileira de Eletrificação

SCGE: Sistema Computadorizado de Gestão de Equipamentos SE: Subestação

SEAQ: Subestação 230 kV em Ariquemes

SEDAM: Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental SEJA: Subestação Distribuidora do PRE em Jaru

SEJR: Subestação Distribuidora da UTE Jaru

SEQM: Subestação supridora do PRE em Ariquemes

SIN: Sistema Interligado Nacional

SRTM: Shuttle Radar Topographic Mission

S21: Estrutura de suspensão simples – deflexão zero grau S22: Estrutura de suspensão simples reforçada – deflexão zero grau S22T: Estrutura de Transposição

S23: Estrutura de suspensão – suporta ângulo até vinte graus.

TC: Transformador de Corrente

Td: Tunderstorm days

TE: Transformador Elevador

TF: Taxa de Falhas

Th: Tunderstorm hours

TMR: Tempo Médio de Retorno

TP: Transformador de Potencial

TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission

T21: Estrutura de ancoragem - suporta deflexão com ângulo até sessenta graus;

T21T: Estrutura de ancoragem especial, utilizada na travessia do Rio Jamari UAT: Ultra Alta Tensão

UHE: Usina Hidrelétrica

UTE: Usina Térmica

URSS: União das Repúblicas Socialistas Soviéticas

**SUMÁRIO**

**CAPÍTULO 1 ..........................................................................................................................1 INTRODUÇÃO.........................................................................................................................1 1.1 Objetivo............................................................................................................................. 7 1.2 Motivação e Justificativa..................................................................................................8 1.3 Estrutura do Trabalho....................................................................................................11**

**CAPÍTULO 2...........................................................................................................................14**

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS E EXPERIÊNCIAS COM A TECNOLOGIA PRE...........................................................................................................................................14**

**2.1 Atendimento a Pequenas Cargas através de Linhas de Transmissão........................14 2.1.1 Tecnologias DPC, ACC, e ACC Modificado..............................................................17 2.1.2 Tecnologia Cabos Para-Raios Energizados...............................................................20 2.2 Aspectos Gerais da Tecnologia PRE.............................................................................20 2.2.1 Levantamento Histórico..............................................................................................21 2.2.2 Comportamento do PRE Frente a Descargas Atmosféricas....................................26 2.2.3 Cadeia de Isoladores Rígida........................................................................................28 2.2.4 Ferroressonância..........................................................................................................29 2.2.5 Sobretensões Induzidas por Curto-Circuito na LT..................................................30 2.2.6 Sobretensões por Contato e Sobretensões Transitórias............................................30 2.2.7 Sistema de Aterramento..............................................................................................30 2.3 Características Técnicas da Tecnologia PRE no Esquema Trifásico.........................31 2.4 Experiências com a Tecnologia PRE em outros Países...............................................36 2.5 Experiências com a Tecnologia PRE no Brasil............................................................41 2.5.1 Histórico da Tecnologia PRE em Rondônia..............................................................41**

**2.5.2 Isolação dos Cabos Para-Raios na Torre 230 kV......................................................45 2.5.3 Balanceamento das Fases do PRE Rondônia............................................................49 2.5.4 Capacidade de Transmissão........................................................................................53 2.5.5 Características Técnicas do Sistema de Aterramento..............................................54 2.5.6 Filosofia de Proteção....................................................................................................60 2.5.7 Desempenho Técnico do Sistema PRE de Rondônia................................................62**

**CAPÍTULO 3...........................................................................................................................67 MEDIÇÕES REALIZADAS..................................................................................................67 3.1 Características do Solo e Dados Meteorológicos de Rondônia...................................67 3.2 Medição da Resistência de Terra da LT 230 kV..........................................................74 3.3 Medição da Resistividade do Solo ao Longo da BR-364..............................................76 3.4 Medições Realizadas no Sistema PRE Itapuã..............................................................82 3.4.1 Medições da Resistência de Terra do Sistema de Aterramento...............................82 3.4.2 Medições das Tensões de Toque e Passo....................................................................86 3.4.3 Medições do Desequilíbrio de Tensão........................................................................92 3.4.4 Medições de Potência Ativa e Reativa........................................................................93 3.4.5 Medições de Tensão.....................................................................................................96 3.4.6 Medições de Corrente no Sistema de Aterramento do PRE em Samuel................97**

**CAPÍTULO 4.........................................................................................................................101 ANÁLISE DAS INTERRUPÇÕES NO SISTEMA PRE DE RONDÔNIA....................101 4.1 Metodologia Adotada no Levantamento das Interrupções.......................................102 4.2 Interrupções no Sistema PRE Jaru.............................................................................116 4.3 Interrupções no Sistema PRE Itapuã..........................................................................124 4.4 Interrupções da LT 230 kV com a Tecnologia PRE..................................................134**

**4.5 Viabilidade Econômica do PRE Rondônia.................................................................136**

**CAPÍTULO 5.........................................................................................................................139**

**IMPACTO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NO DESEMPENHO OPERACIONAL DO SISTEMA PRE................................................................................139**

**5.1 Caracterização das Descargas Atmosféricas..............................................................140 5.1.1 Características Gerais................................................................................................140 5.1.2 Parâmetros de Incidência de Descargas Atmosféricas...........................................147 5.1.3 Características das Ondas de Corrente de Descarga..............................................150 5.2 Caracterização da LT 230 kV com Cabos Para-Raios Energizados........................155 5.2.1 Dados Cadastrais da LT 230 kV...............................................................................155 5.2.2 Instalação do Cabo OPGW.......................................................................................160 5.2.3 Geometria do Contrapeso.........................................................................................161 5.2.4 Ensaio na Cadeia de Isoladores do PRE..................................................................163 5.2.5 Linha entre a UHE Samuel e Ariquemes – LT SMAQ..........................................167 5.2.6 Linha entre Ariquemes e Jaru – LT AQJR.............................................................169 5.3 Descargas Diretas..........................................................................................................170 5.3.1 Considerações Gerais.................................................................................................171 5.3.2 Simulações de Descargas Atmosféricas Diretas sobre o PRE................................174 5.3.2.1 Procedimentos Adotados........................................................................................174 5.3.2.2 Análise dos Resultados das Simulações.................................................................179 5.4 Descargas Indiretas.......................................................................................................185**

**5.5 Análise dos Efeitos das Descargas Atmosféricas no Sistema PRE de Rondônia.......................................................................................................................198**

**5.5.1 Densidade de Descargas Atmosféricas em Rondônia.............................................198 5.5.2 O Modelo Eletrogeométrico – EGM.........................................................................205 5.5.3 Raio de Atração – Ra.................................................................................................210**

**5.5.4 Área de Exposição – Ae.............................................................................................213 5.5.5 Determinação da Corrente Crítica de Disrupção no Sistema PRE.......................214 5.5.5.1 Modelagem para Simulações com o ATPDraw....................................................215**

**5.5.5.2 Corrente Crítica de Disrupção na Cadeia de Isoladores do PRE na LT SMAQ......................................................................................................................217**

**5.5.5.3 Corrente Crítica de Disrupção na Cadeia de Isoladores do PRE na LT AQJR.......................................................................................................................221**

**5.5.6 Efeito das Descargas Diretas no PRE Rondônia.....................................................223**

**5.5.6.1 Estimativa do Número Médio de Interrupções da Linha PRE Itapuã Provocadas por Descargas Diretas.......................................................................225**

**5.5.6.2 Estimativa do Número Médio de Interrupções da Linha PRE Jaru Provocadas por Descargas Diretas.......................................................................228**

**5.5.7 Efeito das Descargas Indiretas no PRE Rondônia..................................................230**

**5.5.7.1 Método Utilizado para Estimativa das Interrupções por Descargas Indiretas..................................................................................................................230**

**5.5.7.2 Resultados Obtidos.................................................................................................236 5.5.8 Efeitos das Descargas Diretas e Indiretas sobre o PRE..........................................238**

**5.5.9 Desempenho de Linha Convencional em 34,5 kV Frente a Descargas Atmosféricas e Comparação com o PRE.............................................................242**

**5.5.10 Comparação entre as Interrupções Verificadas e Estimadas..............................248**

**5.5.10.1 Interrupções Verificadas no PRE devido a Descargas**

**Atmosféricas...........................................................................................................249 5.5.10.2 Análise das Diferenças entre NIE e NIV.............................................................254**

**5.6 Discussão sobre Índices de Desempenho Operacional para o Sistema PRE de Rondônia.......................................................................................................................266**

**5.6.1 Índices Operacionais Verificados no Sistema PRE Itapuã....................................267 5.6.2 Índices Operacionais Verificados no Sistema PRE Jaru........................................271 5.6.3 Análise dos Índices Operacionais do Sistema PRE de Rondônia..........................274 5.6.4 Índices Operacionais Característicos – Índices de Referência..............................280**

**CAPÍTULO 6.........................................................................................................................291 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..............................291 6.1 Principais Conclusões...................................................................................................291 6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros..............................................................................299**

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS................................................................................301 ANEXO..................................................................................................................................319**

**C A P Í T U L O 1**

**INTRODUÇÃO**

A universalização da energia elétrica a toda população, composta por diferentes realidades dentro de um mesmo país ou região, depende fundamentalmente do estágio de desenvolvimento tecnológico e respectiva viabilidade econômica das alternativas disponíveis. Tomando-se como referência a realidade da Região Amazônica, Ramos (2000) apresenta uma série de alternativas apropriadas para fornecimento de energia elétrica a pequenas comunidades, baseadas nas seguintes fontes primárias:

• vento (energia eólica);

• sol (energia solar);

• pequenos potenciais hidrelétricos:

o pequenas centrais hidrelétricas ( potência até 10.000 kW);

o minicentrais hidrelétricas (potência de 100 a 1.000 kW);

o microcentrais hidrelétricas (potência até 100 kW);

• aproveitamento da energia cinética dos rios:

o turbina hidrocinética – protótipo desenvolvido pela UnB;

o turbina hidrocinética TYSON;

o roda d’água RUTTEN;

• aproveitamento da biomassa;

• queima de combustível fóssil.

Contudo, nesta Tese, o tema da universalização da energia elétrica é delimitado àquelas alternativas associadas aos sistemas de transmissão de energia elétrica, sendo analisada de forma particular a tecnologia cabos para-raios energizados (PRE) no esquema trifásico.

Um dos fatores críticos para atendimento a pequenas cargas derivadas das linhas de transmissão (LT’s) de Alta Tensão (AT) e Extra Alta Tensão (EAT), é o elevado custo das

2

instalações necessárias para promover o rebaixamento da tensão a valores padronizados de Média Tensão (MT) e Baixa Tensão (BT), apropriados para o atendimento a cargas residenciais, comerciais e de pequenas indústrias. Nesse sentido, é comum haver pequenas cidades, vilarejos, comunidades rurais, fazendas, etc., localizadas próximas às rotas das grandes LT’s, mas que, no entanto, não são atendidas pela energia elétrica por elas transportada.

Em relação às Linhas de Transmissão em Corrente Contínua (LTCC), Souza (1991) apresenta duas possibilidades baseadas nas instalações de derivações tipo paralelo e tipo série, sendo mais apropriada, segundo o autor, a alternativa de derivação série com possibilidade de menor custo e variedade nos tipos de arranjos. A proposta apresentada por Lima et al. (1991), está baseada no conceito de transmissão simultânea de corrente contínua e alternada, em um sistema denominado de CCMAT. Ambas as propostas apresentam o inconveniente de ainda não terem nenhuma instalação operando na prática, dificultando as comprovações de viabilidade técnica e econômica.

De acordo com D’Ajuz e Oliveira Júnior (1992), Rose (1997), as tecnologias não convencionais relacionadas a linhas de transmissão em corrente alternada (LTCA), apropriadas para atendimento a pequenas cargas são:

Divisor de potencial capacitivo (DPC), conectado metalicamente ao cabo fase; Cabo para-raios isolado, aproveitando o acoplamento capacitivo entre este cabo e o cabo fase (ACC);

Cabo auxiliar isolado, lançado na mesma estrutura do circuito principal, otimizando o acoplamento capacitivo (ACC modificado);

Cabo para-raios isolado e energizado (PRE).

A Tecnologia DPC é normalmente empregada em linhas de alta tensão (69 kV, 88 kV ou 138 kV) podendo, a depender do tamanho da carga, ser empregada também em linhas de 230 kV. A extração da tensão para utilização nas localidades próximas às linhas, é feita através da conexão de unidades capacitivas ao cabo fase, estabelecendo um divisor capacitivo de potencial.

A Tecnologia ACC é apropriada para sistemas compostos por linhas de EAT. Em termos de valores padronizados no Brasil, esta alternativa pode ser aplicada em sistemas

3

compostos por linhas de 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV ou 750 kV. A tecnologia consiste no aproveitamento da indução elétrica dos condutores fase sobre os cabos para-raios, sendo a potência extraível dependente da disposição geométrica dos cabos fase da linha, do nível de tensão, do nível de isolamento necessário ao cabo para-raios e no caso de se estar utilizando um novo cabo isolado, vai depender de seu comprimento e, por último, das necessidades de regulação da carga.

A Tecnologia ACC modificado, se baseia no mesmo princípio da indução elétrica, através da utilização de um circuito auxiliar cujos cabos ficam próximos aos condutores fase da linha principal. Essa alternativa permite a extração de potência considerável, em função da distância otimizada entre os cabos da linha e do circuito auxiliar.

As três tecnologias acima mencionadas têm sido objeto de intensas pesquisas realizadas pelo “Institute of Research of Hydro-Quebec” (IREQ), desde os anos 70, tendo desenvolvido o primeiro sistema, baseado na tecnologia ACC e denominado por ela de SCC1, com a finalidade de alimentar repetidoras de microondas ao longo da rede de 735kV da Hydro-Quebec (BOLDUC, et al., 2004; OLIVEIRA JÚNIOR, MAIA e ESMERALDO, 1991). Uma segunda e terceira geração desses sistemas associados a LTCA, denominados de SCC2 e SCC3, foram posteriormente desenvolvidas com base na tecnologia DPC.

A Tecnologia cabo para-raios isolado e energizado, aqui denominada de Tecnologia PRE, ou simplesmente PRE, foi desenvolvida pelo Professor Francisco Iliceto da Universidade de Roma. Ela é baseada na isolação e energização dos cabos para-raios de uma linha de transmissão em corrente alternada (LTCA), por meio da qual é feita o transporte de energia elétrica em Média Tensão, utilizando ou não o solo como caminho para as correntes de retorno. Desse modo, a utilização dos cabos para-raios pode-se dar de quatro formas diferentes. A primeira delas é aplicável a LT com apenas um cabo para-raios. Esse cabo é energizado a partir de um transformador com neutro aterrado, de forma a possibilitar o atendimento de cargas monofásicas, cujo retorno é feito pelo solo.

A segunda se aplica a LT com dois cabos para-raios, compondo um sistema monofásico semelhante ao primeiro, exceto que o retorno de corrente não é pelo solo e sim pelo outro cabo. Desse modo, essa alternativa consiste na Tecnologia PRE no esquema monofásico com retorno metálico.

4

Na terceira alternativa, os dois cabos para-raios de uma LT são energizados a partir de um transformador com neutro aterrado. Na subestação distribuidora um sistema trifásico é obtido instalando-se dois transformadores monofásicos, um em cada cabo para-raios energizado, sendo os enrolamentos secundários ligados em delta aberto (conexão V). Dessa forma, é possível suprir uma pequena carga trifásica (em torno de 10 % do total). Um transformador de aterramento conectado ao secundário dos terminais em V, torna possível a obtenção de um sistema trifásico de baixa tensão a quatro fios, disponível para atender cargas entre fase e neutro.

A quarta alternativa constitui-se na Tecnologia PRE no esquema trifásico, onde duas fases são suportadas pelos cabos para-raios e a terceira fase é o solo. Esse fato introduz algumas questões particulares a essa tecnologia voltadas à obtenção de um sistema trifásico equilibrado, visto que o caminho de retorno pela terra possui uma resistência muito menor que a dos cabos condutores usualmente utilizadas nas redes de distribuição, além de uma reatância também menor que a do cabo. Adicionalmente, as capacitâncias entre os cabos para raios em relação à capacitância de cada cabo ao solo, também são desequilibradas. Enfim, esse é o sistema mais apropriado para atendimento de cargas trifásicas sem restrição e com valores que podem chegar a centenas de kVA’s.

De acordo com Iliceto et al. (1989), a Tecnologia PRE foi concebida a partir da combinação de duas diferentes técnicas, já amplamente conhecidas, quais sejam: 1. cabos para-raios isolados, utilizados com a finalidade de reduzir perdas em LT’s de Extra Alta Tensão, provocadas por correntes induzidas nos cabos para-raios e/ou para a transmissão da comunicação via carrier;

2. sistema monofásico, que utiliza o retorno pela terra, designado por Monofilar com Retorno pela Terra (MRT). Esse sistema é amplamente utilizado pelo Canadá, bem como na Austrália, Nova Zelândia e antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS). No Brasil, esse sistema é largamente utilizado como opção mais econômica na eletrificação rural.

A Tecnologia PRE foi implantada primeiramente em Gana. A segunda experiência com essa tecnologia é em Rondônia, viabilizada por meio de um convênio entre as Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE) e as Centrais Elétricas de Rondônia

5

(CERON). O projeto foi desenvolvido para atendimento a seis localidades próximas a LT 230 kV entre a Usina Hidrelétrica de Samuel (UHE Samuel) e a Subestação de Ji-Paraná, abrangendo uma população de 85.000 habitantes. Por razões financeiras o projeto foi concluído somente em duas localidades, quais sejam: Jaru, que esteve em operação no período de 30/12/95 a 14/11/2000 e Itapuã do Oeste (antigo Jamari), em operação desde 22/09/1997 (RAMOS, et al., 2006).

Cumpre salientar que a Tecnologia PRE implantada em Rondônia é no esquema trifásico. Além da isolação e energização dos cabos para-raios, essa tecnologia compreende uma subestação supridora, a instalação de reator, resistor e capacitores para equalização da impedância das fases, malhas de aterramento para conexão da terceira fase e uma subestação distribuidora. Por essa razão, a Tecnologia PRE implantada em Rondônia é designada neste trabalho como Sistema PRE de Rondônia, ou simplesmente, PRE Rondônia. Nos casos específicos das instalações destinadas ao atendimento às localidades de Jaru e Itapuã do Oeste, é feita a menção de Sistema PRE Jaru, Sistema PRE Itapuã, ou simplesmente PRE Jaru e PRE Itapuã.

Embora tenha havido rigoroso estudo técnico visando garantir o funcionamento do Sistema PRE de Rondônia dentro dos parâmetros técnicos e de segurança, sua implantação não se deu a partir de prévia análise técnica e econômica que levasse em conta os detalhes pertinentes ao seu desempenho técnico e operacional, obtidos a partir de anos de observação na região onde seria instalado. Isto por razões óbvias, pois a experiência é pioneira no Brasil, não havendo, portanto, base de dados verificados na prática e de conformidade com a região, visto que o desempenho dos sistemas elétricos depende das variáveis impostas pelo ambiente natural a que estão submetidos. Assim, havia uma lacuna, uma questão que devia ser resolvida, pois, seria a Tecnologia PRE viável sob o ponto de vista técnico e econômico em relação a outras alternativas convencionais equivalentes? A resposta a essa questão foi desenvolvida no âmbito da Dissertação de Mestrado (RAMOS, 2000), tomando-se como referência os dados operacionais do PRE Jaru durante três anos, ou seja, de 1996 a 1998.

Apesar da comprovação de sua viabilidade técnica e econômica em relação a linhas de 34,5 kV e usinas a base de grupos geradores diesel (UTE), o desempenho do Sistema PRE de Rondônia, traduzido em índices operacionais como: duração equivalente de interrupção por consumidor (DEC), frequência equivalente de interrupção por consumidor

6

(FEC), tempo médio de restabelecimento (TMR), taxa de falhas (TF) e confiabilidade por consumidor (Cpc), mostraram que, de fato, as descargas atmosféricas foram as principais causadoras das interrupções, respondendo por cerca de 72% de todas as saídas de operação atribuídas ao desempenho do PRE Jaru. Essa constatação, embora fosse esperada, remete à necessidade de continuar a análise de viabilidade visando conhecer como as descargas atmosféricas atuam e impactam o Sistema PRE de Rondônia.

Sabe-se que o desempenho das linhas de transmissão e redes de distribuição urbana e rural estão sujeitas às intempéries ambientais, entre as quais as descargas atmosféricas que provocam surtos de tensão, podendo levar o sistema a falhar. Em relação às descargas atmosféricas indiretas, consideradas nesta tese como aquelas descargas que ocorrem próximas às instalações, elas são responsáveis pela indução de tensões, cujas amplitudes são bem inferiores em relação aos surtos de tensão por descargas diretas. No entanto, embora tais transitórios não representem risco para as linhas de transmissão, eles podem exceder a tensão de descarga disruptiva a 50% (U50), ou “critical impulse flashover voltage” (CFO) dos sistemas de média tensão, como é o caso da Tecnologia PRE.

Mas não é só isso. O esforço de se conhecer as variáveis que envolvem o fenômeno e as características associadas à geometria, nível de isolamento, proximidade de objetos altos e resistência de aterramento das linhas e redes urbana e rural, tem sido alvo de muitas pesquisas, especialmente no que diz respeito às sobretensões induzidas por descargas atmosféricas próximas, cujas teorias nem sempre convergem para um mesmo resultado. Esse aspecto foi amplamente pesquisado por Piantini (1991), tendo concentrado sua análise nas teorias propostas por Chowdhuri-Gross, Liew-Mar e Rusck. A teoria e conseqüentemente a proposta de Rusck foi considerada mais apropriada para cálculo das tensões induzidas, embora o modelo em sua forma original não permitisse a análise de situações realistas. Foram então introduzidas várias modificações, resultando em uma nova proposta de cálculo denominada de “Extended Rusck Model” (ERM). Esse modelo foi validado através de várias comparações entre as tensões medidas e calculadas envolvendo experimentos tanto em escala real como em escala reduzida (PIANTINI; JANISZEWSKI, 1998, 2003 e 2009).

Embora as pesquisas de Piantini tenham sido voltadas a oferecer uma metodologia de cálculo das tensões induzidas por descargas atmosféricas em redes de distribuição de energia elétrica (urbanas e rurais), elas também se aplicam às linhas de transmissão, o que vem ao

7

encontro dos propósitos deste trabalho, uma vez que o objeto de estudo faz parte da LT 230 kV do sistema de transmissão de Rondônia, cujos cabos para-raios são isolados e energizados em 34,5 kV, compondo um sistema de Média Tensão trifásico, onde uma das fases é o solo. Assim, o estágio atual do conhecimento acerca do comportamento das tensões transitórias sobre os sistemas elétricos causadas por descargas atmosféricas diretas e indiretas, permite a continuidade da pesquisa referente ao desempenho técnico e operacional da Tecnologia PRE na região. Consequentemente, a realização da pesquisa dentro destes propósitos contribui com a oferta de subsídios para a análise de viabilidade técnica, operacional e econômica da Tecnologia PRE como alternativa capaz de promover a universalização da energia elétrica às comunidades próximas aos corredores das grandes linhas de transmissão. É com essa motivação que este trabalho é desenvolvido.

Pelas razões expostas, o objeto de estudo deste trabalho é a Tecnologia PRE implantada em Rondônia, sendo considerados para análise mais de 180 meses de operação deste sistema, compreendendo os períodos de 1996 a 14/11/2000 para o PRE Jaru e de 22/09/1997 a 2007 para o PRE Itapuã.

**1.1 Objetivo**

A Tecnologia PRE no esquema trifásico está centrada na robustez e simplicidade operacional, evitando com isso o uso de sofisticados equipamentos de regulação e controle baseados em complexos circuitos eletrônico-digitais. Contudo, os aspectos de seu funcionamento e mútua interação entre os cabos para-raios energizados e os condutores da LT, envolvem fenômenos bem mais complexos que aqueles associados aos conceitos de distribuição convencional em média tensão. Assim, o grande desafio enfrentado pelas novas tecnologias é a falta de conhecimento sobre as mesmas, o que pode levar à sua rejeição. Portanto, este trabalho está inserido neste propósito, tendo por objetivo geral **analisar a viabilidade da Tecnologia PRE no esquema trifásico**. Esta meta é alcançada a partir dos seguintes objetivos específicos relativos ao Sistema PRE implantado em Rondônia:

1. realizar medições no Sistema PRE;

2. realizar o levantamento e classificação das interrupções;

3. avaliar o desempenho da Tecnologia PRE frente a descargas atmosféricas diretas e indiretas;

8

4. comparar os desempenhos da Tecnologia PRE e de outras alternativas convencionais de média tensão;

5. estabelecer índices de referência para o desempenho operacional da Tecnologia PRE.

**1.2 Motivação e Justificativa**

A possibilidade de se converter, com eficiência, energia elétrica em outras formas de energia, como calor, luz e força motriz, por exemplo, contribuiu notavelmente para a melhoria das condições de vida das populações que têm acesso a esse importante insumo. Nesse sentido, a demanda de energia elétrica é um reflexo do desenvolvimento social e econômico de determinado país ou região.

A radiografia da exclusão elétrica no Brasil revela que tal problema social se faz realidade, na maioria dos casos, em pequenas comunidades fragilizadas economicamente e/ou distantes dos grandes centros, como é o caso das comunidades isoladas na Região Amazônica. Nesse sentido, e sob o ponto de vista do desafio tecnológico, há um conjunto de alternativas apropriadas para atendimento a pequenas comunidades, ou de outra forma, atendimento a pequenas cargas, que pode favorecer a implementação de políticas públicas relacionadas à universalização da energia elétrica. A tecnologia cabos para-raios energizados (PRE) se insere neste contexto, rompendo com alguns paradoxos, visto que em um país de dimensões continentais como o Brasil, é comum haver comunidades localizadas próximas às rotas de linhas de transmissão, mas que não são beneficiadas por tal empreendimento, dado o elevado custo em subestações abaixadoras e linhas de Média Tensão.

Em Rondônia, a paisagem marcada pela recente ampliação da ocupação humana, também comporta o Sistema de Transmissão, cujas primeiras linhas de transmissão (LT) em 230 kV, possuem sua rota próxima à BR-364, que corta o estado de um extremo ao outro. Algumas localidades situadas próximas são incluídas neste sistema através da Tecnologia PRE no esquema trifásico. A experiência obtida em mais de 15 anos de operação do Sistema PRE de Rondônia é um dos motivos principais para o desenvolvimento desta pesquisa.

9

Assim, por utilizar os próprios cabos para-raios das LT’s e por envolver baixos custos de implantação, a Tecnologia PRE traz na sua concepção a possibilidade de integração social e inclusão elétrica entre as pequenas comunidades e o grande empreendimento representado pelas LT’s de Alta e Extra Alta Tensão. Essa particularidade a torna bastante atrativa no cenário de expansão do sistema elétrico brasileiro, visto que, no Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2006-2015, produzido no âmbito do Ministério de Minas e Energia (MME, 2006), está prevista a ampliação de mais 41.127 km de LT’s, a ser agregada à Rede Básica de Transmissão1 até o final de 2015.

Entretanto, como o planejador poderá incluir novas experiências com a Tecnologia PRE no conjunto das alternativas se ela não é suficientemente conhecida e dominada como as alternativas convencionais? Aliás, esse é o grande desafio enfrentado pelas novas tecnologias, como afirmam Souza, Derzi e Correia (2004) na avaliação que fazem acerca das barreiras e facilitadores para a produção e difusão de tecnologias renováveis na região amazônica. Segundo esses autores, a falta de conhecimento das tecnologias existentes no mercado nacional e internacional, bem como de resultados de experiências aplicadas na região, leva à rejeição da tecnologia em certas situações e ao retrabalho de pesquisa em outros.

Outra delicada questão deve-se ao receio de que a utilização dos cabos para-raios possa vir a comprometer o desempenho operacional da LT. Nesse sentido, é injustificável que um sistema de MT possa deteriorar o desempenho do sistema de AT ou EAT envolvido com o transporte de grandes blocos de potência.

Pesquisas têm sido desenvolvidas no tocante à Tecnologia PRE e sua relação com as descargas atmosféricas. Essas pesquisas têm sido realizadas com o propósito de demonstrar que a isolação e conseqüente energização dos cabos para-raios não afetam negativamente o desempenho da LT. O trabalho de Gatta, Iliceto e Cinieri (2001) tem justamente esse propósito. Contudo, não há pesquisas semelhantes em relação ao Sistema PRE de Rondônia.

Os resultados operacionais do PRE Jaru, no período de 1996 a 1998 (RAMOS, 2000), mostram claramente que há outros aspectos da tecnologia que precisam ser pesquisados, entre os quais o desempenho da Tecnologia PRE frente a descargas atmosféricas, analisada não apenas sob o ponto de vista da comprovação da capacidade de proteção oferecida pelos cabos

1 A Rede Básica compreende as linhas de transmissão com tensões de 230 kV a 750 kV.

10

para-raios, mas, adicionalmente, sob o ponto de vista do sistema de Média Tensão em si, no que diz respeito ao número de interrupções por descargas atmosféricas diretas e indiretas. Portanto, um dos pontos de maior relevância deste trabalho está justamente na avaliação da experiência operacional e do desempenho do Sistema PRE de Rondônia frente a descargas atmosféricas, tomando-se como referência medições de campo no próprio local da instalação e os resultados obtidos de sua prática operacional, verificadas em mais de 15 anos de operação.

No aspecto econômico, sabe-se que a comparação de alternativas não é feita levando-se em conta apenas o investimento inicial. Uma modelagem econômica completa vai lançar mão dos índices operacionais formatados para cada alternativa. A esse respeito, cabem alguns comentários sobre a prática usual adotada pelas empresas de energia elétrica, através de suas áreas de planejamento. Para suprir suas necessidades de expansão, melhorias ou reformas, são feitos estudos prévios de viabilidade técnica e econômica das alternativas, tendo-se como uma de suas principais referências os índices de desempenho operacional verificados em instalações semelhantes na mesma região do futuro empreendimento, ou localizado em regiões próximas. São utilizados para análise os índices DEC, FEC, entre outros, obtidos a partir de suas séries históricas. Assim, o estabelecimento de índices de referência para o desempenho operacional da Tecnologia PRE, um dos produtos deste trabalho, irá possibilitar ao planejador a tomada de decisão com a mesma segurança com que é feita em relação às alternativas convencionais.

É certo que o estabelecimento de índices operacionais de referência como DEC, FEC e outros, romperá com uma dificuldade inerente às novas tecnologias, aumentando desse modo sua competitividade em relação às demais. Em consequência, como uma alternativa viável economicamente, o gestor público, por exemplo, poderá maximizar a aplicação dos recursos disponíveis, atendendo maior número de pessoas com o mesmo volume de recursos.

Adicionalmente, sob o ponto de vista ambiental, a opção pela Tecnologia PRE em substituição à geração a base de óleo diesel, tem a relevância de contribuir com a redução na emissão de poluentes para a atmosfera. Da mesma forma, a substituição de linhas em MT convencional, tem o mérito de evitar novos desmatamentos, necessários na abertura de faixa de servidão.

Vale ressaltar o caráter inovador deste trabalho de pesquisa, haja vista a inexistência de estudos a respeito do desempenho do Sistema PRE de Rondônia frente às sobretensões

11

transitórias advindas de descargas atmosféricas diretas e indiretas, assim como a inexistência de índices operacionais de referência para análise de viabilidade do PRE.

Além do que já foi exposto, cumpre informar que recentemente a ELETRONORTE instalou um cabo OPGW (“Optical Ground Wire”) na LT 230 kV no trecho entre a UHE Samuel/Ji-Paraná, de forma que a cabeça das torres passou a suportar três cabos, numa concepção semelhante àquela proposta por D’Ajuz e Martinez (1993). Esse cabo afeta o desempenho da linha e introduz um desafio adicional contemplado no neste trabalho.

**1.3 Estrutura do Trabalho**

No plano geral, o desenvolvimento deste trabalho é feito tomando-se como referência o método teórico-empírico, ou seja, é trabalhado o quadro de referência teórica visando interpretar e dar sentido à investigação experimental e à pesquisa de campo. No plano específico, e de acordo com as conceituações metodológicas feitas por Andrade (1995), são adotados os métodos de procedimento histórico, comparativo e de estudo de caso. Enfim, este trabalho está estruturado em seis capítulos, conforme exposto a seguir.

O Capítulo 2 apresenta as características técnicas e experiências com a Tecnologia PRE, obtidas primeiramente em Gana, na África e, posteriormente, no Brasil e em outros países. Basicamente, este capítulo está estruturado em três partes. Na primeira parte é feita uma revisão bibliográfica sobre as diferentes tecnologias apropriadas para atendimento a pequenas cargas, e que são utilizadas em conjunto com as LT’s de Alta e Extra Alta Tensão. Na segunda parte, tem-se como objetivo central a apresentação das características gerais da Tecnologia PRE, dando ênfase, em uma seção específica, às características da Tecnologia no esquema trifásico.

Por fim, é feita a abordagem sobre as experiências com a Tecnologia PRE em outros países, com enfoque principal para a experiência brasileira. Nesse sentido, é feito um levantamento histórico sobre a introdução da Tecnologia PRE no Brasil e, de forma particular, no Estado de Rondônia. Os principais aspectos do projeto de implantação do Sistema PRE de Rondônia são apresentados, bem como o desempenho técnico do PRE Jaru verificado a partir de sua prática operacional no período de 1996 a 1998.

12

O Capítulo 3 diz respeito às medições realizadas e, adicionalmente, às características do solo e dados meteorológicos de Rondônia. De uma forma geral, o capítulo está estruturado em três blocos. O primeiro bloco contém a base de dados relacionadas às características do solo e dados meteorológicos como clima, umidade relativa do ar, precipitação, altitude, pressão atmosférica e índice ceráunicos relacionados ao número de dias de trovoadas por ano e à quantidade de horas de trovoadas por ano. O segundo bloco contempla as medições de resistência de terra dos contrapesos das torres da LT 230 kV e medições de resistividade do solo, feitas não apenas nas proximidades da LT com cabos para-raios energizados. Neste caso, o objetivo das medições é no sentido de oferecer, no escopo deste trabalho, uma visão geral sobre a resistividade do solo ao longo da BR-364, que corta todo o Estado de Rondônia, sendo uma referência para os traçados das LT’s existentes e futuras.

Finalmente, no terceiro bloco, são apresentadas as medições no Sistema PRE Itapuã com o objetivo de demonstrar a viabilidade técnica da Tecnologia relacionada ao desempenho dos sistemas de aterramento, tensões de toque e passo, desequilíbrio de tensão, níveis de tensão e capacidade de carregamento em relação às potências ativa e reativa.

O Capítulo 4, referente à análise das interrupções no Sistema PRE de Rondônia, contém as principais informações desta tese utilizadas para análise do comportamento do PRE frente a descargas atmosféricas e na discussão de índices operacionais de referência para o PRE. Desse modo, na primeira parte do capítulo é apresentada a metodologia utilizada para análise e classificação das interrupções. Os resultados são apresentados, primeiramente em relação ao PRE Jaru, cujo levantamento das interrupções cobre o período de 1996 a 14/11/2000. Em seguida, são apresentados os resultados das interrupções verificadas no PRE Itapuã relativas ao período de 22/09/1997 a 2007.

Visando demonstrar o significado da Tecnologia PRE nas duas localidades, é feita uma retrospectiva da situação do fornecimento de energia elétrica antes e depois da implantação do PRE. Também é feita a análise econômica, sendo explorada, principalmente, a economia obtida com a utilização do PRE na substituição de UTE baseada na queima de óleo diesel para produção de energia elétrica.

O Capítulo 5 trata dos impactos das descargas atmosféricas no desempenho operacional do Sistema PRE. Basicamente este capítulo compreende sete etapas. Na primeira

13

etapa são feitas as caracterizações das descargas atmosféricas, através da Seção 5.1 e, em seguida, a caracterização da LT 230 kV com cabos para-raios energizados, através da Seção 5.2. A etapa dois está relacionada às Seções 5.3 e 5.4, onde são feitas simulações preliminares visando avaliar o comportamento do PRE frente a descargas atmosféricas diretas e indiretas. A terceira etapa, correspondente às Subseções 5.5.1 a 5.5.4, consiste em uma fundamentação teórica de forma mais abrangente, com o objetivo de subsidiar os procedimentos de cálculo do número médio de interrupções estimadas, provocadas por descargas diretas (NIDD) e descargas indiretas (NIDI).

Na etapa quatro, equivalente à Subseção 5.5.5, é feita a descrição dos procedimentos para posterior determinação das correntes críticas de disrupção no Sistema PRE de Rondônia. A etapa cinco, composta pelas Subseções 5.5.6 a 5.5.8, consiste na determinação do NIDD e NIDI, visando avaliar os efeitos das descargas diretas e indiretas sobre o PRE. Adicionalmente, na Subseção 5.5.9 é feito o cálculo do NIDD e NIDI para uma LT 34,5 kV convencional, visando a comparação de seu desempenho frente a descargas atmosféricas em relação ao PRE. Em seguida, na etapa seis, representada pela Subseção 5.5.10, é feita uma extensa análise com o objetivo de estabelecer uma relação entre o número médio de interrupções estimadas (NIE) e o número de interrupções verificadas (NIV), ambas resultantes da ocorrência de descargas atmosféricas. Por último, ou seja, na Seção 5.6, é apresentada a discussão sobre índices de desempenho operacional para o Sistema PRE de Rondônia, dentro do objetivo de estabelecer índices de referência que possam ser utilizados para prever o desempenho operacional de futuras instalações da Tecnologia PRE.

No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões desta tese, cujas reflexões e aprendizado resultante desta pesquisa também remetem à apresentação de recomendações para futuros trabalhos, visando propor melhorias para a Tecnologia PRE.

**C A P Í T U L O 2**

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS E EXPERIÊNCIAS COM A TECNOLOGIA PRE**

Neste Capítulo, tem-se como propósito a apresentação de uma revisão bibliográfica, focada primeiramente em situar a Tecnologia PRE em relação às outras tecnologias associadas a linhas de transmissão em corrente contínua (LTCC) ou corrente alternada (LTCA) e que sejam apropriadas para o atendimento a pequenas cargas situadas próximas aos corredores dessas linhas. Na sequência, é feita a apresentação dos aspectos gerais da tecnologia PRE, cuja abordagem se inicia com um levantamento histórico, visando identificar qual a origem da Tecnologia PRE, como ela foi concebida, quais os esquemas possíveis de serem utilizados e suas respectivas particularidades técnicas.

Não obstante o rigoroso estudo apresentado por Iliceto, Cinieri e Casely-Hayford (1984) e Iliceto et al. (1989)**,** a comprovação da viabilidade técnica da Tecnologia PRE, nos seus vários esquemas possíveis, só poderia ser comprovada na práticas a partir dos resultados operacionais dos projetos implantados. Nesse sentido, é apresentado neste Capítulo o levantamento das experiências operacionais obtidas em outros países e, de maneira particular, no Brasil, com ênfase no Sistema PRE implantado no Estado de Rondônia. Sobre este sistema é feita inicialmente a apresentação de suas características técnicas, onde são enfatizadas as premissas adotadas na fase de projeto. Finalmente, é apresentada a experiência operacional obtida nos três primeiros anos de operação do PRE Jaru, ou seja, de 1996 a 1998.

**2.1 Atendimento a Pequenas Cargas através de Linhas de Transmissão**

No atual estágio tecnológico a transmissão de elevados blocos de potência elétrica para atender os grandes centros de consumo, somente é possível por meio de linhas de

15

transmissão em corrente alternada e /ou corrente contínua. Assim, é comum haver pequenas cidades, vilarejos, comunidades rurais, fazendas e outros, localizadas próximas às rotas das grandes LT’s sem, no entanto, serem abastecidas pela energia elétrica por elas transportadas. Esse é um problema social, cuja solução através de alternativas convencionais, pode tornar o empreendimento inviável economicamente. Desse modo, quais as alternativas não convencionais que vem sendo propostas ou empregadas para atendimento às pequenas cargas utilizando-se a infra-estrutura das LT’s?

No que diz respeito ao atendimento a pequenas cargas ao longo de linhas de transmissão em corrente contínua (LTCC), algumas alternativas tem sido estudadas por Lima et al. (1991) e Souza (1991). De acordo com Souza, há duas possibilidades de suprir carga CA a partir de uma LTCC. Essas possibilidades são derivação1tipo paralela e derivação tipo série, sendo que a inserção da derivação tipo paralela torna possível suprir cargas CA total e de forma independente da potência transmitida na LTCC. Entretanto, essa alternativa tem como desvantagem a necessidade de se projetar os equipamentos para a mesma tensão nominal da LTCC e a provável necessidade de utilização de disjuntores CC para garantir a confiabilidade do sistema, elevando substancialmente o custo de instalação. Desse modo, a alternativa que se vislumbra como mais viável é a derivação tipo série, que pode apresentar as seguintes vantagens:

“a queda de tensão que determina o isolamento dos equipamentos, função da pequena potência derivada, é muito menor que a tensão nominal de transmissão;

o isolamento pólo-terra é uma estrutura muito simples, sendo consequentemente de mínimo custo e máxima confiabilidade;

as falhas usuais de um conversor (falha de comutação, ‘backfire’, curto-circuito interno, etc) são do tipo fechamento, isto é, resultando em um curto-circuito do próprio conversor. Com isto a operação normal do sistema de transmissão não é afetada. Deve ser notado que um projeto apropriado das válvulas irá evitar virtualmente as falhas do tipo ‘abertura’’. (SOUZA, 1991, p.2).

Como desvantagem da derivação tipo série, Souza avalia que a extração da potência plena da carga pode ficar comprometida se a corrente da LTCC atingir um nível inferior ao mínimo estabelecido para o cálculo da tensão nominal da derivação. O autor recomenda que as pequenas derivações devem ser projetadas levando-se em conta a possibilidade de extração de 1 a 5 % da potência nominal da LTCC para cada uma das derivações série

1 A palavra “tap” utilizada por Souza (1991) é substituída nesta tese por derivação.

16

consideradas ao longo da respectiva linha, ou da mesma ordem das perdas na linha principal, para todas as derivações intermediárias.

Uma alternativa diferente para atendimento a pequenas cargas ao longo de LTCC é apresentada por Lima et al. (1991). A proposta dos autores consiste na transmissão de energia elétrica em corrente contínua modulada em alta tensão, em um sistema denominado por eles de CCMAT. Nesse sistema a LTCC é utilizada para transmitir simultaneamente as componentes CC e CA. Segundo os autores, a tecnologia CCMAT, tem como uma de suas principais vantagens o fato de utilizar basicamente os mesmos equipamentos empregados para a transmissão em corrente contínua sobrepondo a eles a parcela referente a componente alternada. Assim, a potência entre os pontos extremos da linha é transmitida pela componente em corrente contínua, enquanto a componente alternada transmite a energia elétrica para atender as pequenas cargas localizadas ao longo do tronco da LTCC.

Ainda de acordo com Lima et al., a máxima potência possível de ser transmitida em função da distância e de uma carga com fator de potência unitário através de uma linha de transmissão sem perdas, com impedância de surto equivalente a 300 Ω, operando com uma tensão modulada de 20 kV e 120 Hz, é dada conforme Tabela 2.1, mostrado a seguir.

**Tabela 2.1 - Capacidade de transmissão da tecnologia CCMAT**

**Potência Máxima (MW) Distância (km)**

3,00 80

1,56 160

1,20 230

Fonte: Lima et al., (1991).

Por fim, como foi visto, tanto o trabalho de Souza como o de Lima et al. não apresentam relato de alguma aplicação prática, no que diz respeito ao atendimento a pequenas cargas através das grandes linhas de transmissão em corrente contínua.

O atendimento a pequenas cargas a partir de sistemas em corrente alternada, notadamente linhas de transmissão em Alta e Extra Alta Tensão, tem recebido abordagem bastante abrangente por D’Ajuz e Oliveira Júnior (1992), Oliveira Júnior, Maia e Esmeraldo (1991), e Rose (1997). No caso da tecnologia cabos para-raios energizados – PRE, as principais fontes de informações relacionadas à sua concepção, detalhamento técnico e

17

primeiras experiências, estão contidas nos trabalhos publicados pelo Professor Francesco Iliceto em conjunto com outros pesquisadores. Com base nesses autores, a seguir são apresentadas as principais tecnologias não convencionais para atendimento a pequenas cargas através de LT’s em corrente alternada. Essas tecnologias são:

divisor de potencial capacitivo (DPC);

acoplamento capacitivo entre o cabo para-raios isolado e o cabo fase (ACC); acoplamento capacitivo modificado (ACC modificado);

cabos pára raios isolados e energizados (PRE)

Na sequência, são apresentadas as principais características de cada tecnologia, bem como suas vantagens e desvantagens, valendo salientar que de acordo com os interesses deste trabalho, uma abordagem mais ampla é feita com relação à Tecnologia PRE.

**2.1.1 Tecnologias DPC, ACC e ACC Modificado**

O divisor de potencial capacitivo, aqui denominado de tecnologia DPC, é normalmente empregado em linhas de alta tensão (69 kV, 88 kV ou 138 kV) podendo, a depender do tamanho da carga, ser empregado também em linhas de tensão superior a 138 kV. A extração da tensão para utilização nas localidades próximas às linhas é feita através da conexão de unidades capacitivas ao cabo fase, estabelecendo-se um divisor de potencial capacitivo. As principais vantagens dessa alternativa são:

o sua aplicação é possível em LT’s que já estejam em operação;

o sistema de regulação de tensão não muito sofisticado;

o possibilidade de atendimento a cargas trifásicas, bastando triplicar os equipamentos do sistema captor de energia;

o podem ser utilizados fusíveis para proteger o sistema captor de energia, o que diminui os custos de implantação, pois dispensa disjuntor, TC’s de proteção e demais equipamentos de medição.

As principais desvantagens são:

o vulnerabilidade a ressonâncias à frequência natural, principalmente para curtos-circuitos em alguma das fases da LT, no circuito da carga e ainda durante a energização da LT;

18

o a possibilidade de desligamento do tronco principal em caso de defeito no sistema captor quando houver falha na atuação da proteção. Por esse motivo, pode comprometer o sistema elétrico principal.

O acoplamento capacitivo entre o cabo para-raios e o cabo fase, aqui denominado de tecnologia ACC, consiste no aproveitamento da indução elétrica nos condutores fase e os cabos para-raios da linha de transmissão, sendo a potência extraível dependente da disposição geométrica dos cabos fase da linha, do nível de tensão, do nível de isolamento necessário ao cabo para-raios e no caso de se estar utilizando um novo cabo isolado, vai depender de seu comprimento e por último, das necessidades de regulação da carga.

Essa alternativa tecnológica é apropriada para sistemas compostos por linhas de Extra Alta Tensão2. Em termos de valores padronizados no Brasil, essa alternativa pode ser aplicada em sistemas compostos por linhas de 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV ou 750 kV. As principais vantagens dessa alternativa são:

o um defeito no sistema de captação não interfere no desempenho da linha de transmissão;

o fácil implementação em linhas que estejam em operação, no que diz respeito ao isolamento dos cabos para-raios;

o fácil aplicação em sistemas com grau de confiabilidade 50%, ou seja, sistema totalmente ligado ou desligado e com fator de potência próximo da unidade; o aplicação apropriada para sistemas de Extra e Ultra Alta Tensão.

As principais desvantagens são:

o fraco acoplamento para tensões abaixo de 230 kV, situação em que somente é possível a alimentação de cargas muito pequenas, na ordem de uns poucos kVA;

o muito sensível às variações da carga em módulo e fator de potência; o necessidade de regulador de tensão com razoável grau de sofisticação; o alimentação monofásica, necessitando adicionar um conversor mono-trifásico para atendimento a cargas trifásicas;

2 Extra Alta Tensão, EAT: São os sistemas em correntes alternadas em tensões de 230 kV, até 800 kV.

19

O acoplamento capacitivo modificado, aqui denominado de tecnologia ACC modificado, se baseia no mesmo princípio da indução elétrica, através da utilização de um circuito auxiliar cujos cabos ficam próximos aos condutores fase da linha principal. Essa alternativa permite a extração de potência considerável, em função da distância otimizada entre os cabos da linha e do circuito auxiliar. Suas vantagens são semelhantes àquelas mencionadas anteriormente, acrescida da vantagem de ser possível extrair maiores potência em função da distância otimizada entre o condutor do circuito auxiliar e os cabos da LT.

Da mesma forma, as desvantagens são as mesmas daquelas relacionadas para a tecnologia de acoplamento capacitivo entre os cabos fase e os cabos para-raios de uma LT, acrescida da utilização de um cabo adicional, o que impacta os custos de implantação da tecnologia.

As tecnologias DPC e ACC, vem sendo pesquisadas desde longa data pelo Institute of Research of Hydro-Quebec – IREQ. Segundo Bolduc et al. (2004), no final dos anos 70 a Hydro-Quebec começou a desenvolver um sistema de suprimento de energia elétrica denominado por ela de SCC1, utilizando os cabos para-raios de uma LT de 735 kV. Esse sistema coleta a energia induzida pelo acoplamento capacitivo entre os cabos para-raios (isolados nos trechos de interesse) e os condutores da LT .

Em 2003, na apresentação feita ao ONS pela ALUSA & Hydro-Quebec3, a respeito de alternativa tecnológica com possibilidade de ser utilizada no Programa Luz Para Todos, foi apresentado o sistema de acoplamento capacitivo SCC3. Antes, porém, foi feita uma retrospectiva das pesquisas desenvolvidas pelo IREQ baseada nas tecnologias ACC e DPC. Assim, uma segunda geração de sistemas de suprimento de energia associado à LT foi desenvolvido e denominado de SCC2. Diferente do primeiro e com base na tecnologia DPC, ele foi projetado para obter energia diretamente do condutor, nas situações em que a energia induzida nos cabos para-raios, obtido por meio de SCC1, não for suficiente.

Por fim, foi desenvolvido um sistema trifásico, denominado de SCC-3, podendo suprir cargas até 2,0 MVA, sendo inviável economicamente sua aplicação em LT´s acima de 330 kV. Esse sistema apresenta a vantagem de poder ser instalado em uma LT já em

3 A Hydro-Quebec patenteou e desenvolveu parcerias de comercialização em diversos países, tendo escolhido a ALUSA como sua representante legal no Brasil.

20

operação, porém o custo estimado de US$ 1000.00/kVA demanda cuidadosa análise técnica e econômica em relação a alternativas que possam vir a ser escolhida para atender a mesma carga.

**2.1.2 Tecnologia Cabos Para-Raios Energizados – PRE**

A Tecnologia PRE é baseada na utilização do cabo para-raios de uma LT, de forma que, sem comprometer a função básica de proteção da linha contra as descargas atmosféricas, o cabo pode ser também utilizado para transportar energia elétrica, tornando possível reunir, numa mesma infra-estrutura, um sistema de Alta ou Extra Alta Tensão com um sistema de Média Tensão. Para atingir esses objetivos, o cabo para-raios é isolado da torre por meio de cadeia de isoladores equipadas com dispositivo centelhador. O espaçamento entre as hastes do centelhador é ajustado de tal forma, que quando a cadeia de isoladores é submetida a surtos de tensão com valores que ultrapassam a capacidade de isolamento estabelecida pelo ar entre seus terminais, acontece a disrupção, e consequente aterramento do cabo, que por estar energizado, estabelece um curto-circuito tirando a linha PRE de operação.

A Tecnologia PRE pode ser empregada em LT’s com um, ou dois cabos para-raios. Ao todo são quatro esquemas possíveis de emprego da tecnologia, a maioria dos quais emprega o solo para retorno da corrente. Suas principais vantagens estão associadas ao baixo custo de implantação e, a depender do esquema adotado, a possibilidade de atender cargas trifásicas na ordem de alguns MVA’s. Sua principal desvantagem reside no fato de seu desempenho operacional ser significativamente afetado pela incidência de descargas atmosféricas diretas ou indiretas na LT. Esse ponto sensível, é o fato motivador deste trabalho, razão pela qual, a abordagem da tecnologia PRE com mais detalhes é feita nos tópicos seguintes

**2.2 Aspectos Gerais da Tecnologia PRE**

A Tecnologia PRE foi desenvolvida pelo Professor Francesco Iliceto da Universidade de Roma, no escopo de um estudo cujo objetivo era encontrar as alternativas mais apropriadas

21

para atendimento a pequenas cidades e vilarejos na Região Norte de Gana (África). Segundo Iliceto, Cinieri e Casely-Hayford (1984), foram analisadas as seguintes alternativas: utilização de linha de Média Tensão (34,5 kV ou 11 kV), que se mostrou inviável economicamente;

suprimento dos vilarejos através de tensão induzida capacitivamente sobre o cabo para-raios isolado em alguns trechos de uma LT 161 kV (tecnologia ACC). Para manter a tensão razoavelmente constante face às variações da carga, esse tipo de instalação exige sofisticados equipamentos de regulação de tensão, além da necessidade de sua instalação em cada vilarejo próximo à LT, tornando sua aplicação inviável economicamente;

O mesmo comentário feito no item anterior se aplica ao esquema onde um banco de capacitores é conectado diretamente a umas das fases da LT em Alta Tensão (tecnologia DPC).

É nesse contexto que surge uma nova proposta, apresentada pelo Prof. Iliceto ao Banco Mundial4, como órgão financiador dos projetos para desenvolver a eletrificação rural em Gana, cujos aspectos gerais são apresentados a seguir.

**2.2.1 Levantamento Histórico**

A primeira publicação sobre proposta de utilização de cabos para-raios de linhas de transmissão para transporte de energia em média tensão foi feita por Iliceto,Cinieri e Casely Hayford (1984). Nela é feita a análise de um esquema experimental baseado na utilização do cabo para-raios de uma LT 161kV, sendo esses cabos isolados e energizados a partir de um sistema 34,5 kV solidamente aterrado, compondo uma linha de Média Tensão monofásica com retorno pelo solo, conforme ilustrado na Figura 2.1. Essa nova proposta foi concebida a partir da combinação de duas diferentes técnicas, já amplamente conhecidas, quais sejam:

1. cabos para-raios isolados, utilizados com a finalidade de reduzir perdas joules em LT’s de Extra Alta Tensão, provocadas por correntes induzidas nos cabos para-raios, com aplicações conhecidas na antiga União Soviética, Estados Unidos, Turquia, etc. Em

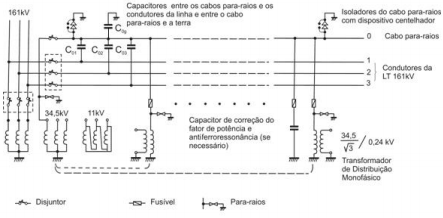
4ILICETO, F. *Lightly loaded long high voltage transmission lines.* Guideline prepared at the request of the World Bank. Washington D.C., 1982-83.

22

alguns casos, tem-se empregado a técnica de isolar os cabos para-raios para comunicação via carrier;

2. sistema monofásico, que utiliza o retorno pela terra, designado por Monofilar com Retorno pela Terra – MRT. Esse sistema é amplamente utilizado pelo Canadá, bem como na Austrália, Nova Zelândia e na antiga União Soviética. No Brasil esse sistema é largamente utilizado como uma das opções mais econômicas na eletrificação rural.

Assim, o conceito de distribuição de energia elétrica proposto tem estreita relação com as referidas técnicas. Entretanto, os aspectos de seu funcionamento e mútua interação, entre os condutores da LT e o cabo para-raios energizado, envolvem fenômenos bem mais complexos, cuja análise é semelhante àquela aplicada para sistemas em Alta e Extra Alta Tensão.

**Figura 2.1 Esquema proposto para uso do cabo para-raios como um sistema de distribuição monofásico em Média Tensão**

Fonte: Figura adaptada de Iliceto et al. (1984)

Na avaliação de Iliceto, Cinieri e Casely-Hayford (1984), o esquema proposto é muito vantajoso sob o ponto de vista econômico, pois apresenta baixo custo de implantação. O custo da isolação dos cabos para-raios é insignificante em comparação a um sistema de Média Tensão separado. Da mesma forma, o sistema de aterramento para retorno da corrente também é muito reduzido, exceto no caso de solos com alta resistividade. Adicionalmente os autores recomendam que sejam considerados os seguintes aspectos técnicos na análise dessa alternativa, quais sejam:

23

a) o cabo para-raios isolado e energizado em Média Tensão não deve ter sua eficiência de proteção comprometida;

b) os isoladores do cabo para-raios devem conter o dispositivo centelhador com eletrodos devidamente espaçados, como é normalmente feito em linha de Extra Alta Tensão com cabos para-raios isolados. O fechamento de arco entre os eletrodos causado por descargas atmosféricas, ou por excepcional sobretensão de manobra (chaveamento), deve se auto-extinguir logo após a ocorrência do distúrbio;

c) na operação em estado permanente o cabo para-raios é submetido à tensão induzida dos condutores da LT (devido ao acoplamento capacitivo e magnético) que se superpõem à queda de tensão devido à carga suprida. Desse modo, a tensão não pode exceder à faixa de variação padronizada;

d) um curto-circuito assimétrico na LT em Alta Tensão pode induzir considerável sobretensão no cabo para-raios. Também esses valores devem ser mantidos dentro de limites aceitáveis;

e) quando o disjuntor de alimentação do cabo para-raios é aberto, pode ocorrer o fenômeno de ferroressonância no circuito formado pelas capacitâncias entre o cabo para-raios e os condutores da LT (C01, C02, C03) e a impedância de saturação e magnetização dos transformadores de distribuição conectados entre os cabos e o solo. Medidas preventivas devem ser estudadas para contornar essa situação;

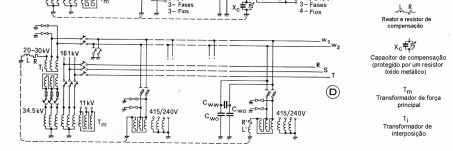
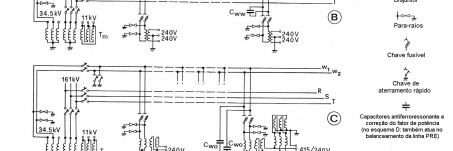
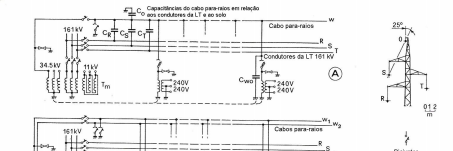
f) a sobretensão no cabo para-raios, induzidas em consequência de manobras de energização e desenergização da LT, bem como a sobretensão advinda das manobras de chaveamento do cabo para-raios, devem ser analisadas, especialmente no que diz respeito à coordenação do isolamento;

g) nos cálculos de queda de tensão, ou acréscimos de tensão induzida ao longo do cabo para-raios, deve-se levar em conta o deslocamento dos condutores fase da LT em relação à fase e à corrente de retorno do cabo para-raios energizado;

h) os eletrodos de aterramento, expostos permanentemente à circulação de corrente, devem ser verificados quanto aos aspectos de aquecimento do solo e segurança.

Em trabalho publicado no IEEE, na revista “Transactions on Power Delivery”, Iliceto et al. (1989) mostram os primeiros resultados operacionais do sistema PRE experimental aplicado em Gana. Nessa publicação, os autores apresentam as diferentes possibilidades de aplicação da tecnologia PRE, compondo um total de quatro esquemas, como mostra a Figura 2.2.

24



**Figura 2.2 Diferentes esquemas para utilização da Tecnologia PRE**

Fonte: Figura adaptada de Iliceto, et al. (1989)

O esquema A está associado à LT com apenas um cabo para-raios, e constitui um sistema monofásico com retorno pela terra. À direita, no topo da figura, é mostrada uma típica torre de LT onde esse esquema é empregado.

Os esquemas A, C e D utilizam o retorno de corrente pela terra, sendo estes sistemas os mais econômicos quando aplicados em locais de baixa ou média resistividade, com repercussão no baixo custo do sistema de aterramento. O esquema B, embora utilize os dois

25

cabos para-raios da LT, é um sistema monofásico com retorno metálico, ou seja, o retorno da corrente pela terra é evitado.

O esquema C requer a energização dos dois cabos para-raios da LT. A partir de um transformador com neutro aterrado, os cabos para-raios isolados são energizados em Média Tensão. Na subestação distribuidora, um sistema trifásico é obtido instalando-se dois transformadores monofásicos, um em cada fase do PRE, sendo os enrolamentos secundários ligados em delta aberto (conexão V). Dessa forma, é possível suprir uma pequena quantidade de carga trifásica ( em torno de 10% do total), além de cargas monofásicas. Um transformador de aterramento conectado ao secundário dos terminais em V, torna possível a obtenção de um sistema trifásico de baixa tensão a 4 fios, disponível para atender cargas entre fase e neutro.

O esquema D é referido como esquema trifásico, composto por dois cabos para-raios de uma LT e o caminho pela terra. Esse sistema trifásico, que consiste no PRE no esquema trifásico, é naturalmente desbalanceado, de forma que, na concepção proposta em Iliceto et al. (1989), para torná-lo um sistema trifásico simétrico é necessário fazer uma simples compensação, introduzindo um resistor e um reator em série com o caminho pelo solo (circuito R-L) e capacitores conectados entre os dois cabos para-raios (Cww) e entre cada um deles e o solo (Cw10, Cw20), como mostrado na Figura 2.2D. Esses capacitores desempenham três funções: correção do fator de potência, prevenção de ferroressonância e balanceamento do circuito.

As questões relacionadas ao desbalanceamento das impedâncias das fases do PRE, têm sido amplamente estudadas por Iliceto, Gatta e Cinieri (1994). Segundo eles, o acoplamento eletrostático entre os cabos para-raios e os condutores fase da LT pode ser desconsiderado em uma primeira aproximação, porque as correntes induzidas nos cabos para-raios com extensão até 100 km, são muito pequenas para linhas na faixa de 161-230 kV, operando na frequência de 50-60 Hz. Da mesma forma, o acoplamento eletromagnético pode ser desconsiderado se uma completa transposição dos condutores da LT for feita entre a subestação supridora e o transformador da subestação distribuidora.

Essa linha não convencional é energizada por tensão trifásica simétrica através de um transformador de isolação, que é interposto entre o transformador principal de uma subestação fonte e a referida linha, sendo uma das fases do transformador direcionada para a conexão ao

26

solo. Dependendo das características da carga, transformadores monofásicos ou trifásicos, com um terminal primário conectado ao solo podem ser instalados ao longo da linha.

Uma análise detalhada envolvendo os conceitos básicos relacionados ao comportamento do PRE frente a descargas atmosféricas, cadeia de isoladores rígida com dispositivo centelhador, ferroressonância, sobretensão induzida por curto circuito na LT, sobretensão por contato entre os cabos para-raios e as fases da LT, sobretensões transitórias e sistema de aterramento tem sido feita por Iliceto et al. (1989), Iliceto , Gatta e Cinieri (1994), Iliceto, Gatta e Dokyi (2000), cujo resumo é apresentado a seguir.

**2.2.2 Comportamento do PRE Frente a Descargas Atmosféricas**

No que diz respeito ao isolamento dos cabos para-raios, a premissa fundamental é garantir que os cabos continuem cumprindo com sua finalidade principal, que é a de proteger a LT contra descargas atmosféricas sem causar um aumento na taxa de “back-flashover” no circuito de Alta Tensão – AT, formado pelos condutores da LT.

Iliceto et al. (1989) argumentam ser de pleno conhecimento que a isolação dos cabos para-raios de LT em Extra Alta Tensão (EAT), não compromete sua capacidade de proteção quando centelhadores com pequeno espaçamento, variando de 10 a 50 mm são montados em conjunto com a cadeia de isoladores de suspensão e de encabeçamento dos cabos para-raios. Nessa aplicação os cabos são aterrados trecho a trecho, ou então várias transposições dos dois cabos são feitas, visando limitar as sobretensões induzidas. Entretanto, algumas diferenças são introduzidas para compor a tecnologia PRE, quais sejam:

os cabos para-raios são energizados em Média Tensão em uma extensão de até 100 km;

os isoladores têm que ser adequados para suportarem as sobretensões de manobra e o espaçamento do centelhador deve ter um ajuste entre 100 e 300mm, a depender da tensão de operação.

Enfim, o potencial a que fica submetido os cabos para-raios energizados é bem menor em comparação com o potencial de uma descarga atmosférica. Assim, é esperado que a eficiência de proteção dos cabos para-raios não seja reduzida. Com efeito, a premissa é de

27

que, quando a descarga atmosférica atinge os cabos para-raios, ou uma torre, ocorre a disrupção no centelhador mais próximo, de forma que os cabos para-raios são aterrados através do arco, cumprindo a função de proteção da LT como se fossem aterrados. Como os cabos para-raios são energizados, a disrupção do centelhador inicia um curto-circuito para terra na linha PRE, que por sua vez, é detectado pelos relés de proteção na subestação supridora, a menos que o arco seja extinto rapidamente, o que pode acontecer se a corrente de falta for pequena. Esse é um comportamento semelhante àquele usualmente verificado em todas as linhas de Média Tensão.

Após abertura do disjuntor na subestação supridora, desenergizando a linha PRE, um arco secundário pode continuar fluindo no canal já aquecido entre os eletrodos do centelhador. Essa corrente é mantida pela indução capacitiva e eletromagnética do circuito de AT e deve ser interrompida o mais rapidamente possível para evitar danos nos equipamentos e permitir o rápido retorno da linha PRE à operação. Segundo Iliceto et al. (1989), experiências feitas em laboratório e confirmadas por observações de campo têm mostrado que o arco secundário se auto-extingue em linhas PRE com extensão aproximada de 100 km. Entretanto, nos raros eventos de persistência do arco secundário, sua interrupção deve ser feita através de chaves de aterramento rápido, instaladas na subestação supridora.

Também foi analisado por Iliceto et al. (1989) a altura dos cabos para-raios isolados em relação a uma linha convencional de Média Tensão. Para um determinado nível de isolação da linha, a altura dos cabos pode provocar substancial aumento na taxa de disrupções (“flashover”) por descargas atmosféricas, sendo tais eventos relacionadas a:

1. descargas diretas, devido à maior área de exposição dos cabos do PRE; 2. sobretensões induzidas por descargas atmosféricas nas proximidades da linha, sendo essas sobretensões aproximadamente proporcionais à altura do condutor em relação ao solo.

Tomando-se como referência as configurações típicas da LT 161kV e linha de 34,5 kV em Gana, os referidos autores verificaram que um aumento na altura dos cabos de 10 m para 20 m, causa uma elevação na taxa de disrupções na ordem de 20% a 40% devido a descargas diretas com intensidades de corrente na faixa de 10 kA a 100 kA.

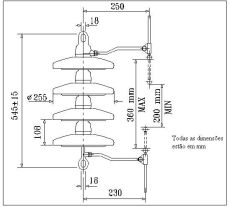
28

Apesar dos cabos para-raios isolados estarem sujeitos à maior incidência de descargas atmosféricas, deve-se levar em conta a redução de falhas de isolação devido a outras causas a que estão sujeitas uma linha de MT convencional, como contatos com árvores ou outros objetos, e curtos nos isoladores causados por acesso de animais. Essas falhas podem aumentar consideravelmente a taxa de falhas de uma linha de MT, com o agravante de que elas são normalmente de longa duração. De fato, esse pressuposto tem sido confirmado no escopo dos relatos das experiências operacionais com o PRE, já em operação em vários países.

**2.2.3 Cadeia de Isoladores Rígida**

De acordo como os dados contidos em Iliceto, Gatta e Dokyi (2000), a cadeia de isoladores rígida é formada por quatro isoladores de disco (de vidro ou porcelana) com diâmetro de 255 mm. O espaçamento ajustado entre os eletrodos do centelhador é de 33 cm sob tensão nominal de 34,5 kV e altitude ≤ 1000m acima do nível do mar.

As cadeias de isoladores utilizadas nos pontos de encabeçamento e tensionamento dos cabos têm as mesmas características daquelas utilizadas na suspensão simples, exceto que, devido sua posição horizontal, entre as extremidades dos eletrodos do centelhador é instalado uma haste pontiaguda, que serve de proteção contra ninho de pássaros. O projeto de uma cadeia de isoladores rígida, instalação vertical, é mostrada na Figura 2.3.



**Figura 2.3 Cadeia de isoladores rígida**

Fonte: Figura adaptada de Iliceto, Gatta e Dokyi (2000)

29

Ainda de acordo com os autores citados acima, as razões pelas quais foi dada preferência à especificação de cadeia de isoladores rígida para isolação dos cabos para-raios, são as seguintes:

o espaçamento entre os eletrodos é mantido constante para aquele valor previamente ajustado, garantindo assim a eficiência esperada frente às sobretensões de manobra e temporárias;

o comprimento total da cadeia, incluindo os acessórios para conexão à torre e ao cabo para-raios não ultrapassa a 635 mm, sendo portanto menor que o comprimento de uma cadeia de isoladores convencional e com as mesmas características elétricas. Isso minimiza a altura do cabo para-raios na torre e o tamanho dos suportes de sustentação da cadeia;

o custo da cadeia de isoladores rígida e respectivos acessórios não excede ao custo da cadeia de isoladores convencional.

**2.2.4 Ferroressonância**

O fenômeno de ferroressonância foi analisado por Iliceto et al. (1989), tomando-se por base o esquema A apresentado na Figura 2.2. Quando o disjuntor da subestação supridora é aberto o fenômeno de ferroressonância pode ocorrer no circuito formado pelas capacitâncias entre o cabo para-raios e os condutores da LT (CR, CS, CT), combinado com a impedância de magnetização saturável dos transformadores conectados ao cabo para-raios, uma vez que tais impedâncias estão em paralelo com a capacitância do cabo para-raios em relação ao solo (C0). O fenômeno pode elevar a tensão quando os transformadores estiverem em vazio ou com baixa carga. Uma medida para conter as sobretensões advindas do fenômeno de ferroressonância tem sido estudada pelos autores, consistindo na conexão de um capacitor entre o cabo para-raios e o solo.

Ferroressonância pode ocorrer de forma similar nos outros esquemas de PRE e, igualmente, pode ser prevenido através da instalação de capacitores antiferroressonante. Adicionalmente os capacitores também corrigem o fator de potência das instalações e, no caso específico do PRE no esquema trifásico, eles promovem o balanceamento da capacitância paralela da linha.

30

**2.2.5 Sobretensões Induzidas por Curto-Circuito na LT**

Segundo Iliceto et al. (1989), as sobretensões induzidas nos cabos para-raios devido a curto-circuito na LT são aproximadamente proporcionais à corrente de curto-circuito fluindo nos condutores da LT e à extensão do trecho de influência entre os dois circuitos (condutores da LT e cabos para-raios). O maior valor ocorre durante um curto-circuito na fase da LT que está mais próxima do cabo para-raios, com a falta localizada no final do trecho do PRE. Nesse caso a tensão induzida é somada vetorialmente à tensão de operação do PRE.

**2.2.6 Sobretensão por Contato e Sobretensões Transitórias**

A possibilidade de sobretensão advinda do contato entre os condutores da LT e o PRE também tem sido analisada, embora esse risco seja pequeno. Essa situação é a que pode vir a provocar a maior sobretensão temporária no sistema PRE. Da mesma forma, tem sido estudadas as situações de manobras que provocam sobretensões transitórias tanto no PRE quanto na LT. Em consequência disso, tem sido recomendado para o projeto implantado em Gana, que a energização da LT 161kV somente é permitida com o PRE desenergizado.

**2.2.7 Sistema de Aterramento**

Visto que o sistema de aterramento é submetido à circulação permanente de corrente, cuidados especiais devem ser tomados quanto ao aquecimento do solo, tensões de toque e de passo, bem como as possibilidades de interferências com linhas telefônicas. Adicionalmente, é necessário prevenir quanto ao ressecamento do solo perto dos eletrodos de aterramento. Para garantir que esse fenômeno não venha a ocorrer, Iliceto et al. (1989) recomendam a aplicação da equação de Ollendorff, que é a seguinte:

Ue = 2. . . ( 2.1 )

Onde:

Ue = potencial do eletrodo em relação ao terra remoto (V);

= elevação da temperatura do eletrodo e do solo ao redor em relação à temperatura ambiente (ºC);

31

= resistividade do solo (ohm.m);

= condutividade térmica do solo (W/mºC)

A equação (2.1) é aplicável a eletrodos de qualquer formato em solos uniformes, ou seja, solo com resistividade e condutividade térmica constantes. Para dada corrente nominal considerada em projeto, o cálculo do valor máximo da resistência de terra do sistema de aterramento, a partir do qual pode ocorrer o fenômeno de ressecamento, é determinada pela Equação:

Ue

Rmáx

máx = (2.2)

In

Onde:

Uemáx = máxima elevação do potencial do sistema de aterramento, dado em volts, a partir do qual é criada as condições para ocorrência de ressecamento do solo;

In = corrente nominal da carga, dada em ampéres, que circula pelo sistema de aterramento.

A isolação dos cabos para-raios provoca ligeiro aumento na reatância de sequência zero da linha e também aumento na tensão induzida em linhas telefônicas paralelas. Ainda de acordo com os autores, a isolação dos cabos para-raios causa também o aumento na resistência de aterramento das torres, porque a contribuição dos aterramentos das torres próximas através dos cabos para-raios é eliminada.

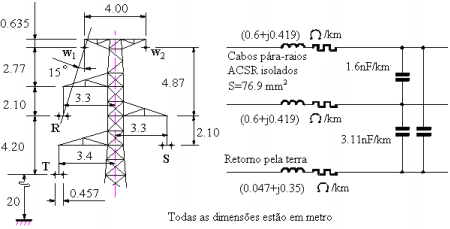
**2.3 Características Técnicas da Tecnologia PRE no Esquema Trifásico**

Como foi comentado anteriormente, os dois cabos para-raios isolados e o retorno pelo solo formam um circuito trifásico desbalanceado. Isso porque a resistência do condutor representada pelo solo é muito menor que a resistência de qualquer cabo condutor usualmente utilizado em linhas de Média Tensão – MT. Ela pode ser calculada pela expressão: 10-4 2f (ohm/km)5. Assim, considerando a frequência de 60 Hz, a resistência do caminho de retorno pelo solo a ser percorrida pela corrente possui aproximadamente 0,06 ohm/km, o que equivale a um cabo com 480mm2de seção (ROSE, 1997). A reatância também é menor, assim como a

5 Essa expressão está desenvolvida em: RÜDENBERG, Reinhold. ***Transient performance of electric power systems:*** phenomena in lumped networks. New York: McGraw-Hill, 1950.

32

capacitância entre os cabos, cujo valor é aproximadamente metade da capacitância entre cada cabo e o solo. Essas características estão mostradas na Figura 2.4.

**Figura 2.4 Torre típica de uma LT e o circuito equivalente do PRE trifásico**

Fonte: Figura adaptada de Iliceto et al. (1989, p. 2133)

Para tornar a compensação da linha PRE mais precisa, Iliceto et al. (1989) recomendam:

em linhas PRE usadas como circuito de distribuição, com extensão máxima entre 100 e 125 km, uma compensação precisa pode ser obtida concentrando-se os equipamentos de compensação num único local;

se a carga é conectada em não mais que dois pontos ao longo da linha PRE, uma compensação exata é obtida instalando um circuito R-L na subestação supridora para compensar o primeiro trecho e outro circuito R-L no extremo da linha, próximo à carga, para compensar o segundo trecho;

se as cargas estão conectadas em vários pontos ao longo da linha PRE, uma compensação precisa somente é possível se todas as cargas variarem proporcionalmente, mantendo o mesmo fator de potência. Isso requer a instalação de um apropriado circuito R-L na fase aterrada de todos os transformadores de distribuição em cada subestação;

cálculos desenvolvidos para aplicações práticas mostram que mesmo com as condições da carga diferentes daquelas consideradas no item anterior, é possível limitar a tensão de sequência negativa para menos que 2%, por meio de uma

33

compensação aproximada. A mais simples consiste de um único circuito R-L instalado na subestação supridora, dimensionado a partir da consideração de que toda carga esta concentrada no centro de carga.

O PRE no esquema trifásico pode suprir 100% de carga trifásica, por meio de transformadores de Média Tensão AT/BT convencional, com enrolamento primário em delta e secundário em estrela aterrado, ou primário em estrela e secundário com enrolamento em zig-zag aterrado. O transformador deve atender ao regime de funcionamento contínuo, com um terminal no primário aterrado e os outros terminais com uma tensão para terra igual a tensão fase-fase. No atendimento a cargas monofásicas, os respectivos transformadores devem ser distribuídos entre as fases de maneira a obter o balanceamento das cargas. Contudo, como o PRE trifásico não tem neutro, os transformadores monofásicos devem ter duas buchas de Alta Tensão.

Em alguns casos as pequenas comunidades a serem atendidas estão localizadas distantes do eixo da LT. Apesar disso, afirmam Iliceto, Gatta e Dokyi (2000), o suprimento de energia pode ser levado até elas por meio de linhas laterais de Média Tensão, equipadas com um condutor, no caso do emprego do PRE no esquema monofásico com retorno pelo solo, ou com dois condutores, como ilustrado na Figura 2.5, no caso do emprego do PRE no esquema V ou trifásico. O máximo comprimento da linha lateral recomendado é de 20 km a partir da descida da torre

**Figura 2.5 Linha lateral do PRE para atendimento a cargas distantes da LT**

Fonte: Figura adaptada de Iliceto, Gatta e Dokyi (2000)

34

O estudo do comportamento do PRE no esquema trifásico em estado permanente, visando determinar sua capacidade de carregamento dentro de determinados parâmetros, tem sido desenvolvido por Iliceto, Gatta e Dokyi (2000) com base em duas configurações de LT; uma de 230 kV no Brasil6e outra em uma LT 161 kV em Gana. No caso brasileiro, foi utilizado para estudo o cabo para-raios de alumínio com alma de aço (ACSR), conforme especificado a seguir:

a) LT 230 kV, 60 Hz, circuito simples, com os condutores dispostos horizontalmente; b) cabos para-raios ACSR, código Penguim; S = 12,5 mm2; Sal = 107,2 mm2; Sst = 17,9 mm2; D = 14,31 mm (6 fios de alumínio, d = 4,77 mm + 1 fio de aço, d = 4,77 mm);

c) resistência a 40ºC: r = 0,287 Ω/km ;

Nos estudos foram adotadas as seguintes premissas:

• comprimento da linha PRE: até 150 km;

• carga a ser suprida: trifásica, uniformemente distribuída ou concentrada no final da linha PRE;

• na subestação supridora, o transformador de interposição, que alimenta a linha PRE, foi simulado com 1,2 a 1,35 vezes a carga total e com uma impedância de 6%. As cargas no terminal secundário do transformador de 34,5 kV, foram simuladas com dois valores de fator de potência: 0,90 e 0,97. A potência nominal dos transformadores de distribuição foi considerada como sendo 1,5 vezes a potencia ativa da carga e a impedância do trafo igual a 4,5%;

• os capacitores de balanceamento foram considerados conectados entre os cabos para-raios e entre cada um deles e o solo, num valor total em torno de 25% da potência ativa da carga;7

• o balanceamento longitudinal é considerado como sendo feito por uma impedância otimizada, composta por resistor-reator de aterramento, instalada somente na subestação supridora;

6 Trata-se dos primeiros estudos visando a implantação da Tecnologia PRE na LT 230 kV, que em meados de 1993, estava sendo construída no Norte do Estado de Mato Grosso. Na Seção 2.5, referente à experiência com a Tecnologia PRE no Brasil, esse assunto é abordado mais detalhadamente.

7Segundo os autores, uma parte dos capacitores pode ser desconectada quando a carga for muito pequena.

35

• A tensão foi considerada como sendo regulada para a linha PRE (no secundário do transformador de interposição), com valor em torno de 1,05 pu para a máxima carga e 1 pu a vazio, sendo 1pu = 34,5 kV;

• A variação de carga considerada na LT 230 kV é admitida de zero ao carregamento igual ao SIL.

Na Figura 2.6, são apresentadas as curvas resultantes da simulação, onde o carregamento do PRE foi traçado em função da distância, para quedas de tensão máximas fixadas em 7,5 % e 10 %. Nesse sentido, pode-se observar, por exemplo, que o PRE pode atender a cargas de até 4 MW e 3 MW, considerando-a concentrada no final da linha, a uma distância de 75 km , com fator de potência igual a 0,90 e quedas de tensão de 10% e 7,5 % respectivamente.

16 14 12 10 8

6

4

P [MW] cos Φ

=0.9

**a.1)**

+)

**60 Hz - ACSR - 125.1 sqmm** ∆ **V=10%**

2 0

cosΦ

=0.97

+)

0 25 50 75 100 125 d [km] 150 P [MW]

16

14

12

10

~~+)~~

8

6

4

~~+)~~

cos Φ = 0.9

2

0

**60 Hz - ACSR- 125.1 sqmm** ∆ **V=7.5%**

cos Φ = 0.97

**a.2)**

0 25 50 75 100 125 150

d [km]

Carga distribuída: Carga concentrada:

**Figura 2.6 Capacidade de carregamento do PRE em relação à distância**

Fonte: Figura adaptada de Iliceto, Gatta e Dokyi (2000)

É certo que a inserção de um, ou vários resistores e reatores para equalizar a impedância das fases do PRE no esquema trifásico, provoca indesejável perda de energia, igualando esse sistema a um sistema convencional equivalente, como por exemplo, uma LT 34,5 kV convencional. Para superar esse inconveniente, uma alternativa técnica inovadora é

36

proposta por Iliceto, Gatta e Cinieri (1994), por meio da utilização de dois pequenos transformadores (na ordem de 25 a 100 kVA), com enrolamentos em derivação (“tapped winding”) conectados e ajustados de forma a proporcionar uma compensação completa da tensão de sequência negativa.

**2.4 Experiências com a Tecnologia PRE em outros Países**

Segundo Iliceto et al. (1989), a primeira experiência com a Tecnologia PRE aconteceu em Gana, onde um projeto experimental foi colocado em serviço no ano de 1985, pela empresa Volta River Authority – VRA. O projeto foi implementado inicialmente num trecho de 31 km de uma LT 161 kV, entre Cape Coast e Takoradi, cujo comprimento era de 64 km e estava operando desde 1965. Foram colocadas em operação 04 instalações PRE no esquema monofásico e uma no esquema V. Os resultados operacionais desse sistema, após 33 meses em serviço, são relatados por Iliceto et al. (1989), e resumidos a seguir.

1. ***Desempenho da LT 161 kV frente a descargas atmosféricas***: A taxa de saída da LT Cape Coast/Takoradi em 33 meses não foi maior que aquela verificada durante 5 anos antes da isolação dos cabos para-raios. Comparações com a taxa de saída de LT’s 161 kV na mesma região também confirmam que o desempenho da LT não tem mudado com a isolação dos cabos para-raios;

2. ***Desempenho da isolação dos cabos para-raios:*** A cadeia de isoladores com o dispositivo centelhador não sofreu nenhum dano, tendo assegurado um bom desempenho operacional nos 31 km de PRE. Durante os 33 meses de operação houve somente uma saída forçada do PRE, que os autores atribuem a provável descarga atmosférica, mas que não afetou a operação da LT 16I kV. Da mesma forma, não foram registradas persistência do arco secundário, nem saídas simultâneas do PRE e da LT. Manobras de chaveamento no PRE e na LT 161 kV nunca causaram “flashover” na isolação dos cabos para-raios;

3. ***Sistema de aterramento:*** Em nenhuma das estações com transformadores AT/BT conectados ao PRE foi verificado valor de resistência de aterramento acima do máximo aceitável conforme a fórmula de Ollendorff;

37

4. ***Sobretensões temporárias:*** Os capacitores antiferroressonância desempenharam suas funções conforme previsto. Um ensaio de campo foi feito abrindo a linha PRE por meio do disjuntor na subestação supridora e com baixa carga. A tensão induzida medida foi em torno de 1 kV rms. Tensão induzida em 50 Hz causada pelo fluxo de corrente de curto circuito na LT 161 kV não causou “flashover” no PRE e da mesma forma não danificou os para-raios instalados próximos aos transformadores AT/BT;

5. ***Desempenho de equipamentos:*** Durante os 33 meses de operação nenhum equipamento falhou;

6. ***Qualidade do serviço ao consumidor:*** Da mesma forma, a qualidade no fornecimento de energia tem sido equivalente ao fornecimento por meio de linha 34,5 kV. Com relação ao suprimento a carga trifásica, através do esquema V foi verificada que a componente de sequência negativa da tensão nunca ultrapassou a 1,5% .

Após os bons resultados verificados nessa fase experimental a empresa VRA, decidiu utilizar a Tecnologia PRE comercialmente através de sua expansão para o norte de Gana, utilizando uma LT 161 kV com o traçado próximo à rodovia e pequenas vilas. Esse sistema está ilustrado na Figura 2.7, a seguir.



**Figura 2.7 Diagrama unifilar mostrando a expansão da Tecnologia PRE em Gana** Fonte: Figura adaptada de Iliceto, Gatta e Dokyi (2000, p.8)

O relato de 12 anos de operação de 5 esquemas de PRE mostrados na Figura 2.7 é feito por Iliceto, Gatta e Dokyi (2000). Segundo eles, três Sistemas PRE são no esquema trifásico (cf. Fig. 2.2, esquema D), supridos por um transformador de interposição (Ti) e

38

operado em 30 kV. Esses sistemas suprem várias cargas com motores de 50 e 100 kW. Os outros dois sistemas observados são no esquema V, operando à tensão 34,5/ 3 . Esses sistemas geralmente atendem cargas monofásicas para uso doméstico, comercial e de 5 % a 10 % de cargas trifásicas. Os resultados operacionais estão descritos a seguir:

a) ***Desempenho da LT 161 kV com PRE:*** A LT 161 kV está equipada com dois cabos para raios e circuito simples, com condutores na configuração triangular e ângulo de proteção igual a 15º, conforme Figura 2.4. Seu traçado passa parcialmente por regiões montanhosas, por regiões com florestas e de savanas. No período de 3 anos, entre 1996- 98, as três linhas mostradas na Figura 2.7, em uma extensão total de 527 km, dos quais 450 km com PRE, apresentaram uma média de 2,1 saídas/100km/ano, geralmente causadas por descargas atmosféricas. Segundo os autores, a taxa de saída foi mais alta nas áreas de floresta. Comparativamente, na região de Kumasi, LT’s 161 kV com as mesmas características, porém com os cabos para-raios aterrados, apresentaram uma média de 4,6 saídas/100km/ano devido a faltas transitórias. Por fim, os autores afirmam que em 12 anos de operação os cabos para-raios isolados de modo algum tornou pior o desempenho das LT’s frente a descargas atmosféricas;

b) ***Desempenho da isolação e taxa de saída da linha PRE:*** Segundo os autores, a linha PRE no período de 12 anos nunca teve uma saída permanente. No período de 1996-98, a linha PRE teve uma média de 29 saídas/100km/ano, devido a faltas transitórias geralmente causadas por tempestades. Na mesma região existem linhas de 34,5 kV, com vãos médios de 235 m e protegidas por um cabo para-raios. No mesmo período de observação (1996- 98), a mais longa dessas linhas, com 119 km, apresentou em média 52 saídas/100km/ano, um resultado quase duas vezes maior que aquele apresentado pela linha PRE. Com respeito ao desempenho da isolação, as descargas através do centelhador da cadeia de isoladores rígida tem se extinguido imediatamente após a saída da linha PRE. Manobras de chaveamento, tanto na linha PRE quanto na LT nunca causaram “flashover” na cadeia de isoladores rígida;

c) ***Retorno de corrente pelo solo:*** Múltiplos aterramentos através de hastes, colocadas em paralelo por um cabo, conforme ilustrado na Figura 2.5, são instalados nas vilas e nas linhas de derivação do PRE. O potencial do eletrodo de terra para um potencial remoto

39

(Ue), não tem sido maior que 25 V nas piores condições, ou seja, solo seco e carga máxima. Em consequência, as tensões de passo e toque não têm ultrapassado a 7 V. Com o valor de Ue não excedendo a 25 V, a sobretemperatura do solo em torno do eletrodo de aterramento, como calculado pela fórmula de Ollendorff, é menor que 5º C, não havendo portanto risco de evaporação da umidade e instabilidade térmica;

d) ***Desempenho do sistema Power Line Carrier (PLC):*** O PLC é usado na LT com cabos para-raios isolados tendo a mesma função com que é usado em todas as outras linhas em Gana, ou seja, como canal de voz para comunicação, transferência de sinais de “tripping” (comando de aberturas de disjuntor) e sistema SCADA. A experiência operacional do sistema PLC usando condutores da LT 161 kV com PRE é muito boa, de acordo com o que foi previsto na fase do projeto de engenharia do Sistema PRE;

e) ***Qualidade do serviço para os consumidores:*** Relatam os autores que a qualidade da energia fornecida aos consumidores tem sido boa, melhor inclusive que o de uma linha de MT convencional. A componente de sequência negativa da tensão para todos os consumidores tem sido menor que 1,0 % no esquema trifásico do PRE. Esse desequilíbrio tem sido maior, de 0,7 % a 2,0 % no esquema PRE com transformadores ligados em V;

f) ***Desempenho de equipamentos:*** Nenhum equipamento tem sido avariado durante 12 anos de operação, exceto um pequeno problema de falha de conexão num pequeno transformador de aterramento utilizado na instalação PRE em V.

Por fim, Iliceto, Gatta e Dokyi, (2000) concluem, que a extensiva experiência operacional do Sistema PRE em Gana, durante 12 anos, confirma a sua viabilidade técnica, especialmente na comparação com linhas de MT energizada na mesma tensão e com comprimentos semelhantes.

Iliceto et al. (2004) e Iliceto et al (2005), informam que a Tecnologia PRE também foi aplicada, ou está em fase de aplicação, ou em fase de planejamento, nos seguintes países:

**Serra Leoa:** A Tecnologia PRE no esquema trifásico, tensão 34,5 kV, foi implantada em 150 km sobre a primeira LT 161 kV, 50 Hz do País. Uma linha PRE suprirá a cidade de Makeni com carga prevista de 4,5 MW. Essa linha PRE também será usada

40

para comunicação via carrier. A LT associada ao PRE ainda não entrou em operação por conta da situação de tumultos internos em que vive o País;

**Laos:** Três Sistemas PRE monofásico com retorno pelo solo, tensão 25 kV, estão em operação desde 1996, numa extensão de 185 km sobre uma LT 115 kV, 50 Hz. Outros cinco Sistemas PRE no esquema trifásico, tensão 34,5 kV, estão em operação desde meados de 2002-2003, em 310 km de uma LT 115 kV, 50 Hz. Estes Sistemas PRE suprem aproximadamente 150 vilas e cidades;

**Etiópia:** O primeiro Sistema PRE implantado na Etiópia e em operação desde 2003, foi no esquema monofásico com retorno pelo solo, tensão 34,5 kV, em uma extensão de 200 km, compondo três Sistemas PRE monofásicos, sobre uma LT 132 kV, 50 Hz.. O segundo Sistema PRE, no esquema trifásico, 34,5 kV, está previsto utilizando os cabos para-raios de duas LT de 132 kV e outra LT de 230 kV, em uma extensão total de linha PRE acima de 250 km;

**Togo:** A Tecnologia PRE no esquema trifásico, 34,5 kV, está sendo construída em 265 km de uma nova LT 161 kV, 50 Hz. Um dos PRE’s deverá utilizar o cabo OPGW;

**Benin:** Está sendo planejado para construção nesse país, um Sistema PRE trifásico, 34,5 kV sobre 300 km de uma LT 161 kV, 50 Hz. Assim como em Togo, um dos PRE’s deverá utilizar o cabo OPGW;

**Burkina Fasso:** Da mesma forma, nesse país está sendo planejada a construção de um Sistema PRE no esquema trifásico, 34,5 kV, sobre uma nova LT 225 kV, 50 Hz, com 330 km de extensão;

**Moçambique:** Um estudo de viabilidade está sendo desenvolvido com o objetivo de aplicar a Tecnologia PRE no esquema trifásico, 34,5 kV, em 550 km de LT 220 kV, já existente no Norte do país;

**Camboja e Malauí:** Esses países têm expressado interesse no uso da Tecnologia PRE.

41

**2.5 Experiências com a Tecnologia PRE no Brasil**

A primeira experiência brasileira com a Tecnologia PRE, começou em meados de 1993, com os estudos para implantação desse tipo de sistema na LT 230 kV que, à época estava sendo construída no Norte do Estado de Mato Grosso (no Centro-Oeste do Brasil). Segundo D’ajuz et al. (1994), a ELETRONORTE e a concessionária de distribuição de energia elétrica estadual, ou seja, Centrais Elétricas Matogrossenses S.A. (CEMAT), com o apoio técnico do Professor Francesco Iliceto, da Universidade de Roma, iniciaram um estudo detalhado visando atender a cidade de Lucas do Rio Verde e as comunidades rurais próximas ao corredor da linha. Como resultado as torres da LT, em uma extensão de 149 km entre as subestações de Nova Mutum e Sorriso, foram modificadas e os cabos para-raios isolados. Entretanto, o projeto de Mato Grosso não foi concluído devido, principalmente, ao processo de privatização da empresa de distribuição ocorrido na mesma época.

A segunda experiência foi resultante de um convênio entre a ELETRONORTE e a concessionária de distribuição de energia elétrica do Estado de Rondônia, as Centrais Elétricas de Rondônia (CERON). A forma como se deu a introdução da Tecnologia PRE em Rondônia e as premissas adotadas em projeto, são abordadas em seguida.

**2.5.1 Histórico da Tecnologia PRE em Rondônia**

No relatório de gestão da CERON, produzido com a finalidade de demonstrar as principais atividades e o desempenho da Empresa no exercício de 1997, há uma série de informações que ajudam a compreender o momento e a grande expectativa com que foi acolhida a alternativa de atendimento a pequenas comunidades através da Tecnologia PRE. Assim, de acordo com as informações contidas em CERON (1998a), até 1981 a responsabilidade pelo fornecimento de energia elétrica ao Estado era apenas da CERON. Porém, a partir daquele ano, a ELETRONORTE absorveu o parque gerador de Porto Velho, cujo problema de racionamento foi resolvido com a entrada em operação da primeira turbina da Usina Hidrelétrica (UHE) Samuel8.

8 A UHE Samuel está a 45 km de Porto Velho e possui cinco turbinas, tipo Kaplan, totalizando 216 MW de potência instalada. A primeira unidade entrou em operação em julho de 1989 e a quinta unidade em agosto de 1996.

42

À medida que foram sendo colocadas outras turbinas da UHE em operação, aumentava a oferta de energia elétrica em Porto Velho, enquanto o racionamento e a demanda reprimida no interior do Estado era crescente. Para resolver o problema, CERON, ELETRONORTE e Governo do Estado, vinham trabalhando a obtenção de recursos para construção de uma linha de transmissão (LT) em 230 kV, planejada para o trecho UHE Samuel/Ji-Paraná, tendo uma subestação intermediária em Ariquemes (CERON, 1995).

Entretanto, várias cidades ao longo e próximas a LT não seriam contempladas diretamente por essa linha. É nesse contexto que em julho de 1993 o Engº Ary D’Ajuz vem a Porto Velho explicar o atendimento a pequenas cargas através dos cabos para-raios da LT, como uma alternativa tecnológica extremamente barata e perfeitamente aplicável ao caso de Rondônia9.

Portanto, a introdução da Tecnologia PRE em Rondônia teve como objetivo atender as pequenas localidades situadas próximas à linha de transmissão em 230 kV, no trecho entre a Usina Hidrelétrica de Samuel e Ji-Paraná.

Em princípio, a alternativa PRE foi projetada para atender as localidades de Jamari (atual Itapuã do Oeste), Rio Crespo, Alto Paraíso, Cacaulândia, Jaru e Santa Cruz da Serra. Essas localidades eram abastecidas por energia elétrica produzida através de grupos geradores a diesel e, em sua maioria, o atendimento era de apenas algumas horas durante o dia. Assim, o projeto de implantação da Tecnologia PRE em Rondônia também teve como objetivo substituir a geração de energia elétrica local por meio de Usinas Térmicas (UTE), baseadas na queima de óleo diesel, de elevado custo e de baixa qualidade.

Na Tabela 2.2 são apresentados alguns dados relevantes das localidades acima mencionadas, tais como: potência instalada, demanda máxima, energia requerida e consumo de óleo diesel verificado no ano de 1994.

9 A vinda do Engº Ary D’Ajuz a Porto Velho para expor a alternativa de atendimento a pequenas cargas através da Tecnologia PRE, foi amplamente noticiada pelos jornais O Estadão e Alto Madeira, nas edições do dia 22 de julho de 1993.

43

**Tabela 2.2 - Dados das localidades incluídas no projeto PRE**

**Localidades**

**Potência Instalada (MW)**

**Demanda Máxima (MW)**

**Energia**

**Requerida (MWh/ano)**

**Consumo Óleo Diesel (litros/ano**)

Jamari (atual Itapuã do Oeste) 0,528 0,376 1.380 396.061 Rio Crespo 0,264 0,108 316 124.049 Alto Paraíso 0,640 0,230 933 357.961 Cacaulândia 0,320 0,260 656 219.783

Jaru 12,850 5,680 22.857 7.131.391 Santa Cruz da Serra 0,232 0,058 66 40.194 **Total 14,834 6.712 26.208 8.269.439** Fonte: CERON (1995).

Os estudos, levantamentos e projeto para implantação do PRE em Rondônia foram realizados pela ELETRONORTE, CERON, Marte Engenharia e Asea Brown Boveri (ABB), tendo sido concluído em 1995. Na Figura 2.8, é mostrada a área de abrangência do PRE em relação ao Estado de Rondônia.



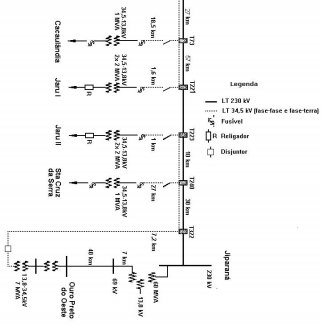
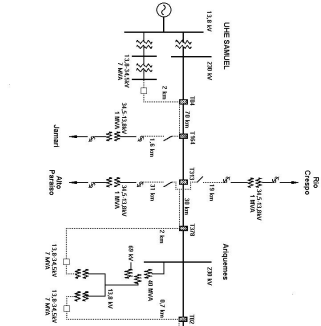
**Figura 2.8 Área de abrangência do PRE Rondônia**

Fonte: Cruz et al. (1996)

Da mesma forma, a Figura 2.9, a seguir, mostra o diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico associado à UHE Samuel, mostrando a LT 230 kV e a extensão do PRE com as respectivas linhas laterais10para atender as localidades.

10 Linhas laterais são as derivações feitas a partir das torres LT 230 kV.

44



**Figura 2.9 Diagrama unifilar com indicação dos trechos e localidades contempladas no projeto do PRE Rondônia**

Fonte: Figura adaptadas de D’Ajuz et al. (1999)

45

Ainda no contexto histórico da implantação da Tecnologia PRE em Rondônia, à mesma época, a ELETRONORTE buscou também fazer convênio com a TELERON, a empresa de telecomunicação estadual, visando criar a integração dos sistemas de transmissão, distribuição e telecomunicação; entretanto, essas tratativas não lograram êxito. Vale ressaltar que os aspectos técnicos relacionados à possibilidade de utilização de cabo OPGW, seja individualmente, ou como uma das fases do PRE, foram abordados por D’Ajuz e Martinez (1993). Segundo eles, existem duas alternativas para adequação dos Sistemas PRE e OPGW, quais sejam: utilização de um terceiro cabo na estrutura e utilização de um cabo para-raios com fibra óptica energizado (OPGW energizado), cuja solução tecnológica para conexões foi desenvolvida por Araujo (2001).

A partir de 2006 a ELETRONORTE adotou a primeira alternativa, ou seja, nos trechos com cabos para-raios isolados e energizados, como é o caso do trecho entre a UHE Samuel e Itapuã do Oeste, cujo Sistema PRE está em operação, foi adicionado o cabo OPGW, aterrado em todas as estruturas, exceto na torre de derivação do PRE. Nos outros trechos com cabos para-raios isolados, porém não energizados, e nas demais torres multiaterradas, um cabo para raios foi substituído pelo cabo OPGW.

**2.5.2 Isolação dos Cabos Para-Raios na Torre 230 kV**

A energização impõe a necessidade de isolar os cabos para-raios das torres. Assim, se na fase de projeto for prevista a utilização da Tecnologia PRE, as torres já devem ser preparadas para essa finalidade. Entretanto, no caso de Rondônia, quando se tomou a decisão de utilizar a referida alternativa tecnológica, as torres metálicas já tinham sido fabricadas. Desse modo, elas tiveram que sofrer modificações para atender aos critérios de isolamento, distâncias mínimas de manutenção e coordenação de isolamento para 34,5 kV fase-terra. Nesse sentido, D’Ajuz et al. (1999) informam que para garantir a funcionalidade dos cabos para-raios na dupla função de proteção da LT e como condutor de energia elétrica, os seguintes aspectos técnicos foram levados em consideração:

distâncias mínimas entre fase e terra;

distâncias mínimas para manutenção em linha viva;

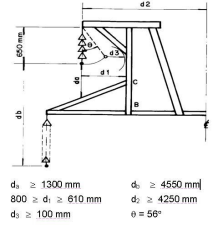
ângulo de blindagem;

balanço assíncrono;

46

desempenho da LT para surtos atmosféricos.

Por fim, os detalhes de projeto para modificação da cabeça da torre são mostrados nas Figuras 2.10 e 2.11 apresentadas a seguir.



**Figura 2.10 Parâmetros para modificação na cabeça das torres**

Fonte: D’Ajuz et al. (1999)















































































































**Figura 2.11 Suportes para instalação dos cabos para-raios em torres sem e com cabos para-raios energizados**

**( a ) Suporte para instalação do cabo para-raios aterrado na torre; ( b ) Suporte para instalação do cabo para-raios isolado da torre**

Fonte: D’Ajuz et al. (1999)

47

A modificação da cabeça das torres teve por consequência a redução no ângulo de blindagem da LT, possibilitando uma ação mais efetiva dos cabos para-raios na função de proteção dos condutores fase da linha. A Figura 2.12 mostra a situação atual da torre de derivação, onde é feita a conexão dos cabos para-raios com a linha lateral que vai até a subestação distribuidora do PRE.

**Figura 2.12 Torre de derivação dos cabos para-raios para a linha lateral**

A cadeia de isoladores utilizada para isolar os cabos para-raios da torre, também atende a outro requisito técnico de particular relevância para a Tecnologia PRE. Conforme mostrado na Figura 2.13, a cadeia de isoladores é rígida, formada por quatro isoladores de disco, cujas características, são as seguintes11:

fabricante: Isoladores Santana;

tipo: Isolador rígido para cabo para-raios, referência DCV - 32352

tensão suportável sob impulso: 260 kV;

tensão suportável em 60 Hz a seco: 190 kV;

tensão suportável em 60 Hz sob chuva: 130 kV;

diâmetro do disco: 254 mm;

carga mecânica de ruptura: 4000 kgf;

distância de escoamento: 1200 mm;

ajuste máximo e mínimo entre os eletrodos do centelhador: 360 mm e 200 mm. peso líquido: 16 kg.

11 Essas informações foram extraídas do relatório de ensaio nºLAT 016/2004, realizado no período de 19 a 26 de abril de 1994, pelo Laboratório de Alta Tensão e Laboratório de Ensaios Mecânicos da Isoladores Santana.

48

**Figura 2.13 Cadeia de isoladores rígida, com dispositivo centelhador**

Como visto na Subseção 2.2.2, quando da ocorrência de descargas atmosféricas sobre os cabos para-raios, a isolação proporcionada pelo ar entre os eletrodos é rompida, havendo a formação de um arco elétrico. Após a extinção do arco, o meio pode permanecer ionizado, permitindo que exista uma corrente denominada de arco secundário. A tensão que gera essa corrente pode ser a tensão induzida pelo circuito de alta tensão da LT, ou a própria tensão a que o PRE está energizado. Para garantir o devido desempenho, a cadeia de isoladores rígida foi ensaiada pelo fabricante, cujos resultados estão mostrados na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3 - Resultados dos ensaios feitos na cadeia de isoladores rígida**

**Espaço entre**

**Tensão de Descarga sob Impulso Atmosférico (U50)**

**Tensão Suportável sob Impulso Atmosférico12**

**EletrodosPolaridade Positiva**

**(Valor Médio**

**Corrigido)**

**Polaridade Negativa (Valor Médio**

**Corrigido)**

**Polaridade Positiva (Valor Médio**

**Corrigido)**

**Polaridade Negativa (Valor Médio**

**Corrigido)**

20 169,9 kV 179,8 kV 163,2 kV 172,7 kV 24 208,2 kV 221,8 kV 200,0 kV 213,1 kV 28 229,8 kV 246,9 kV 220,8 kV 237,2 kV 32 245,3 kV 281,3 kV 235,7 kV 270,3 kV 36 256,9 kV 310,6 kV 246,8 kV 298,4 kV Sem

Centelhado ~~r~~

365,6 kV 398,5 kV 262,0 kV 269,6

Fonte: (ISOLADORES SANTANA, 1994)

Apesar do rigor técnico adotado, as condições atmosféricas, como temperatura, umidade relativa do ar e também a magnitude da descarga atmosférica, entre outros, são

12 De acordo com a nota nº 2 do Relatório de Ensaio feito pelo fabricante, os valores de tensão suportável de impulso com centelhador foram obtidos a partir dos valores de tensão de descarga de impulso, em conformidade com o item 6.4.2 da norma ABNT – NBR 5049 (kVs = 0,961 . kV50% ).

49

variáveis que podem impor situações diferentes daquelas ensaiadas. Dessa feita, nas estações supridoras foram previstos meios para que, uma vez ocorrendo o arco secundário, este venha a ser eliminado antes de danificar equipamentos ou comprometer a LT principal.

**2.5.3 Balanceamento das Fases do PRE Rondônia**

A Tecnologia PRE no esquema trifásico consiste na energização dos dois cabos para raios isolados, que protege a LT contra descargas atmosféricas, de forma que estes cabos compõem as duas fases de um sistema trifásico, onde o solo é tomado como a terceira fase. Este é um sistema naturalmente desbalanceado, ou seja, os parâmetros elétricos determinados pelos condutores e sua disposição geométrica, são diferentes dos parâmetros elétricos apresentados pelo solo.

Quando um sistema está desbalanceado, há o aparecimento de componente de sequência negativa nas tensões de carga e da fonte. Além do desbalanceamento das fases, advinda da diferença dos parâmetros dos cabos em relação ao solo, os acoplamentos eletrostáticos e eletromagnéticos entre os cabos para-raios e os condutores da linha exercem uma pequena influência no sentido de provocar desequilíbrio. O acoplamento eletromagnético pode ser ligeiramente superior, especialmente quando a configuração da linha é não simétrica, como por exemplo, configuração horizontal.

Com efeito, para que o sistema PRE seja balanceado, isto é, se torne um sistema simétrico, a impedância série, bem como as capacitâncias entre os cabos para-raios e entre estes e o solo, devem ser iguais. Esse objetivo é alcançado através de uma compensação longitudinal e transversal dos parâmetros. Portanto, o desbalanço relacionado às impedâncias série é eliminado através de uma compensação longitudinal, composta por um resistor e reator instalado no caminho para a terra. Já o desbalanço relacionado às capacitâncias é solucionado através de uma compensação transversal, que consiste na instalação de capacitores entre os cabos para-raios, e entre cada cabo e o solo.

Para determinar os parâmetros do Sistema PRE de Rondônia, a LT 230 kV foi representada por modelos π em cascata, com comprimentos variando de 5 a 10 km, incluindo