



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GDS/17
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO -X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (GDS)

ANÁLISE DO DESEMPENHO DA LINHA DE TRANSMISSÃO 230 kV DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE RONDÔNIA OPERANDO COM CABOS PARA-RAIOS ISOLADOS E ENERGIZADOS EM MÉDIA TENSÃO

J. E. Ramos(*)
UNIR/EDRO

A. Piantini
IEE-USP

A. D'Ajuz
UNIFEI/ONS

V. A. Pires
EDRO

P. R. de Oliveira Borges
UNIR

RESUMO

Os cabos para-raios da linha de transmissão (LT) em 230 kV do sistema de transmissão de Rondônia, no trecho entre a usina hidrelétrica (UHE) Samuel e Ji-Paraná, foram isolados e energizados em média tensão (MT). Esse procedimento foi realizado no âmbito da tecnologia cabos para-raios energizados, denominada de tecnologia PRE, aqui utilizada no esquema trifásico. Tal tecnologia consiste na energização dos dois cabos para-raios da LT, sendo a terceira fase desempenhada pelo solo. Entretanto, uma importante questão a ser respondida é se a implantação dessa tecnologia em um sistema de transmissão na Amazônia pode comprometer o desempenho da LT. Essa análise é feita neste trabalho a partir de medições feitas em campo, ensaios em laboratório e levantamento das interrupções no sistema PRE, verificadas no período de 1996 a 2007. Os resultados obtidos comprovam que a isolamento e energização dos cabos para-raios não deteriorou o desempenho da LT 230 kV frente a descargas atmosféricas.

PALAVRAS-CHAVE

Tecnologia PRE, cabos para-raios isolados e energizados, descargas atmosféricas, corrente crítica de disrupção

(*) Av. Farquar, 1036, bairro centro – CEP 76.801-020 Porto Velho, RO – Brasil
Tel: (+55 69) 9229-8264 – Email: j.ezequielramos@unir.br;

1.0 - INTRODUÇÃO

Em 1994 a energia produzida pela usina hidrelétrica (UHE) de Samuel, além de abastecer a cidade de Porto Velho, é também utilizada para atender o interior de Rondônia, notadamente as localidades de Ariquemes e Ji-Paraná, cuja geração de energia elétrica era, em sua totalidade, através de grupos geradores diesel. A interligação entre a UHE Samuel e as referidas localidades foi realizada através de linha de transmissão (LT) em 230 kV, cujo primeiro trecho, entre a UHE Samuel e Ariquemes, foi inaugurado em 30/08/1994, e o segundo trecho, entre Ariquemes e Ji-Paraná, em 29/09/1994 [1].

Ao longo do trecho entre a UHE Samuel e Ji-Paraná, outras cidades localizadas próximas do corredor da LT também reivindicaram atendimento através do mesmo sistema de transmissão. Contudo, a construção de novas subestações rebaixadoras demandaria um montante de recurso não disponível naquele momento, além do fato de que, para as pequenas localidades, tal investimento seria injustificável economicamente. Para superar essas dificuldades, a alternativa técnica encontrada pelas empresas de transmissão, no caso a ELETRONORTE (atual Eletrobras Eletronorte) e de distribuição, a CERON (atual Eletrobras Distribuição Rondônia - EDRO), foi a utilização da tecnologia cabos para-raios energizados (PRE), desenvolvida pelo Prof. Francesco Iliceto, da Universidade de Roma e implantada com sucesso em Gana, na África [2]. Entre os diferentes esquemas possíveis de instalação do PRE, foi adotada no projeto do PRE de Rondônia o esquema trifásico, que consiste na utilização dos dois cabos para-raios da LT e o solo como a terceira fase [3].

A decisão das empresas ELETRONORTE e CERON pela implantação da tecnologia PRE no estado de Rondônia foi baseada nos resultados obtidos nas instalações do PRE em Gana, na África. Entretanto, uma importante questão a ser comprovada diz respeito ao desempenho de tal tecnologia implantada em um sistema de transmissão na Amazônia, com características ambientais totalmente diferentes de Gana. Em outras palavras, a implantação da tecnologia PRE em Rondônia teria comprometido o desempenho da LT 230 kV, no trecho entre a UHE Samuel e Ji-Paraná? Visando responder essa questão levantamentos de campo envolvendo medições de resistência de terra dos contrapesos das torres, medição de resistividade do solo, ensaios em laboratório foram realizados. Adicionalmente, um minucioso levantamento das causas das interrupções de todo o sistema foi realizado, compreendendo o período de 1996 a 2007. A análise das causas das interrupções são realizadas através de simulações para determinar as correntes críticas de disrupção entre os eletrodos do dispositivo centelhador da cadeia de isoladores dos cabos para-raios.

O trabalho segue um roteiro metodológico iniciando pela caracterização da LT 230 kV que opera com os cabos para-raios isolados e energizados. Uma seção é reservada para apresentar as características da tecnologia PRE no esquema trifásico e, devido ao importante papel desempenhado pela cadeia de isoladores com o dispositivo centelhador, também é reservada uma seção especial para sua abordagem. Na sequência, na Seção 5, é feita a análise do comportamento da LT 230 kV frente às descargas atmosféricas, envolvendo a determinação das correntes críticas de descarga na cadeia de isoladores dos cabos para-raios, cálculo da estimativa do número de desligamentos por descargas atmosféricas diretas na LT. Ainda na mesma seção é feita a análise do número de interrupções verificadas no período estudado, sendo comparado tais resultados com o desempenho de LT 230 kV operando na Região Norte. Por fim são apresentadas as conclusões do trabalho.

2.0 - CARACTERIZAÇÃO DA LT 230 KV COM CABOS PARA-RAIOS ISOLADOS E ENERGIZADOS

A LT 230 kV entre a UHE Samuel e Ji-Paraná tem uma extensão aproximada de 316 km e um total de 816 torres. Possui uma configuração de circuito simples, trifásico, sendo constituída por um condutor por fase, dispostos horizontalmente e, dois cabos para-raios para blindagem da linha contra descargas atmosféricas. O tipo de torre predominante é a autoportante, tipo delta e, devido às características planas do terreno em grande parte do trecho, a maioria das torres são de suspensão simples tipo S21 com uma grande concentração de torres com alturas de 30m e 33 m. O nível básico de isolamento (NBI) da LT é igual a 1350 kV.

Inicialmente a LT foi subdividida em dois trechos: o primeiro, entre a UHE Samuel/Ariquemes, identificado como SMAQ. LT6.01.IGL.00, possui uma extensão aproximada de 151 km e um total de 384 torres; o segundo trecho, entre Ariquemes e Ji-Paraná, identificado como AQJP. LT6.01.IGL.00, possui uma extensão aproximada de 165 km e um total de 432 torres [4]. Posteriormente, com a construção da Subestação na cidade de Jaru, localidade situada entre Ariquemes e Ji-Paraná, a LT 230 kV foi subdivida em duas linhas, ou seja: LT Ariquemes/Jaru (AQJR), que vai da torre 001 à torre 220 e LT Jaru/Ji-Paraná (JRJP), que vai da torre 001 (antiga torre 221) à torre 212 (antiga torre 432). Portanto, o trecho de LT entre a UHE Samuel e Ji-Paraná atualmente compreende três linhas, quais sejam: a) trecho entre a UHE Samuel e Ariquemes (LT SMAQ); b) trecho entre Ariquemes e Jaru (LTAQJR); c) trecho entre Jaru e Ji-Paraná (LT JRJP) [5]. Na Figura 1 é feita uma representação simplificada dessas linhas e respectivas subestações associadas.

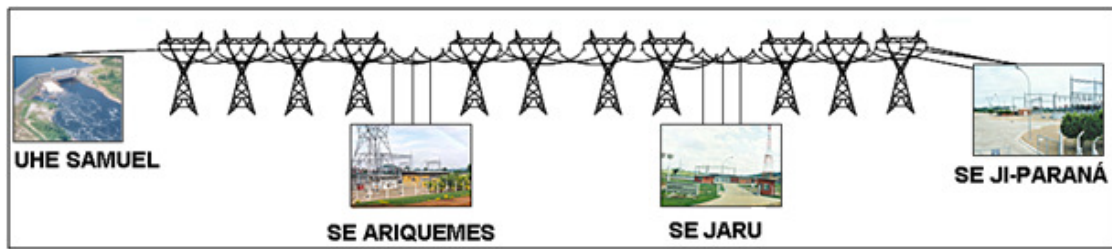


FIGURA 1 – Representação do sistema de transmissão Rondônia, entre a UHE Samuel e Ji-Paraná

Os contrapesos da LT 230 kV são do tipo radial de 4 pernas, com extensão de 100 m cada. O condutor utilizado é o fio de aço cobreado, bitola 4 AWG, instalado a uma profundidade de 0,80 m [6].

3.0 - CARACTERÍSTICAS DA TECNOLOGIA PRE

O sistema PRE no esquema trifásico instalado para atender as localidades de Jaru e Itapuã do Oeste, no Estado de Rondônia, utiliza os dois cabos para-raios da LT 230kV UHE Samuel-Ji-Paraná, como duas fases de um sistema trifásico onde o solo é tomado como a terceira fase. A partir de uma subestação supridora de 13,8kV para 34,5kV, energizam-se os dois cabos pára-raios, conecta-se a terceira fase à terra através de uma impedância para o balanceamento das três fases e, no ponto de atendimento à carga, através de uma ligação adequada dos transformadores, energizam-se as subestações de distribuição, 34,5kV/13,8kV, para a alimentação da rede elétrica da respectiva localidade. Além disso, são instalados capacitores na derivação da torre para a subestação distribuidora, cuja finalidade é igualar as capacitâncias parasitas entre os cabos pára-raios com as capacitâncias entre estes cabos e a terra. A Figura 2 ilustra a tecnologia PRE implantada em Rondônia.

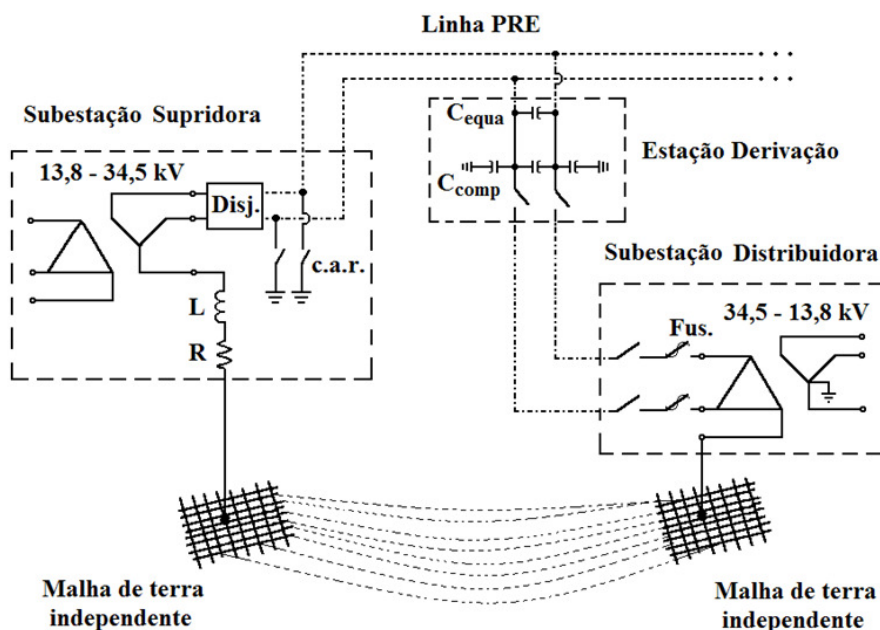


FIGURA 2 - Desenho ilustrativo sobre a tecnologia PRE no esquema trifásico

Portanto, o emprego da tecnologia PRE impõe a necessidade de isolar os cabos para-raios das torres; 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, pois esse foi o nível de tensão utilizado. Nesse sentido, 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 [7]: a) distâncias mínimas entre fase e terra; b) distâncias mínimas para manutenção em linha viva; c) ângulo de blindagem; d) balanço assíncrono; e) desempenho da LT para surtos atmosféricos. O projeto de implantação da tecnologia PRE em Rondônia foi desenvolvido para atendimento a seis localidades próximas à LT

230 kV, entre a UHE Samuel e Ji-Paraná. Entretanto, o mesmo só foi realizado em duas localidades: Jarú, que esteve em operação no período de 1996 a 14/11/2000 (PRE Jarú) e Itapuã do Oeste (PRE Itapuã), que está em operação desde o dia 22/09/1997. Mesmo não tendo sido realizado o projeto integralmente, todas as torres previstas no escopo do mesmo foram modificadas, resultando em 533 torres em relação ao total de 816 torres.

No final de 2006 a ELETRONORTE concluiu a instalação de mais um cabo nas torres da LT 230 kV. Trata-se do cabo com fibra óptica (OPGW) utilizado para comunicação de voz e dados. No trecho entre a UHE Samuel e Itapuã do Oeste o cabo foi adicionado aos cabos já existentes. Nos demais trechos, um dos cabos para-raios foi substituído pelo OPGW. Cumpre salientar que as modificações na cabeça das torres contribuíram com a redução no ângulo de blindagem da LT. A forma final da cabeça da torre contendo os cabos para-raios isolados e o cabo OPGW é mostrada na Figura 3, a seguir apresentada.

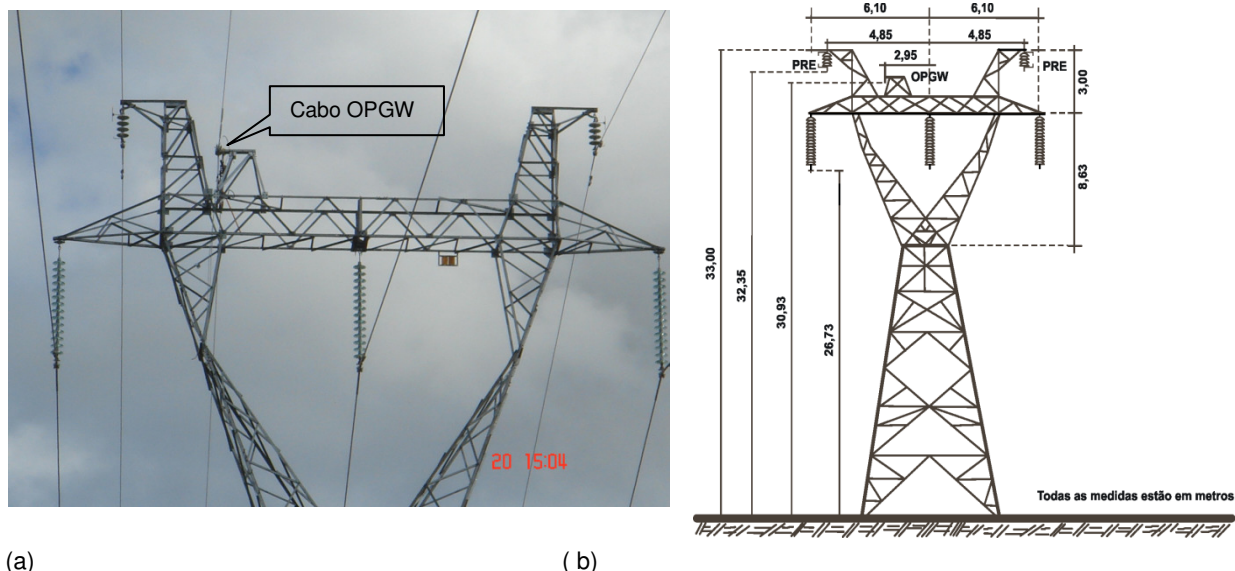


FIGURA 3 – Características das torres da LT 230 kV do sistema de transmissão Rondônia: a) detalhe da cabeça da torre; b) geometria de uma torre de suspensão simples, adotada como torre típica

4.0 - CADEIA DE ISOLADORES

A isolação dos dois cabos para-raios das torres é feita através de cadeia de isoladores rígido, formada por quatro isoladores de disco, com diâmetro de 254 mm, com as seguintes características: a) tensão suportável sob impulso: 260 kV; b) tensão suportável em 60 HZ a seco: 190 kV; c) tensão suportável em 60 Hz sob chuva: 130 kV; d) distância de escoamento: 1.200 mm; e) carga mecânica de ruptura: 4.000 kgf; f) ajuste máximo e mínimo entre os eletrodos do centelhador: 360 mm e 200 mm; g) peso líquido: 16 kg. Vale ressaltar que os eletrodos foram ajustados para um espaçamento de 330 mm.

A tensão disruptiva crítica (*critical impulse flashover overvoltage*, CFO) dos isoladores utilizados no sistema PRE de Rondônia foi determinada através de ensaios em laboratório, tendo sido obtidos os valores de 278 kV e 281 kV para as polaridades negativa e positiva, respectivamente. Os testes foram realizados considerando o espaçamento de 33 cm entre os eletrodos do centelhador, sendo os valores das tensões referidos às condições atmosféricas de referência (pressão = 101,3 kPa, temperatura = 20 °C e umidade absoluta = 11 g/m³) [8].

Na eventualidade de algum dos condutores do PRE ser atingido por uma descarga atmosférica, as tensões entre os terminais dos isoladores próximos ao ponto de incidência excederão a CFO da linha. Como consequência, descargas disruptivas ocorrerão na grande maioria das vezes, com consequente interrupção de fornecimento. O mesmo geralmente acontecerá se a descarga incidir na torre, pois a menos que a intensidade da corrente de descarga e a resistência de terra da torre atingida (R_t) apresentem valores muito baixos, haverá “backflashover”.

5.0 - COMPORTAMENTO DA LT 230 kV FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A análise do comportamento da LT 230 kV frente a descargas atmosféricas tem por objetivo verificar se a isolação e energização dos cabos para raios não compromete o seu desempenho. De início, vale ressaltar que a aplicação de cabos para-raios isolados é bastante conhecida em linhas de extra alta tensão (EHV), porém, no caso do PRE, em que os cabos para-raios são energizados, surge a dúvida sobre como se daria o processo de ruptura entre

os eletrodos do dispositivo centelhador da cadeia de isoladores. Ou seja, valores elevados de tensão para provocar a disrupção entre os eletrodos pode resultar em disrupção entre os cabos para-raios e os condutores da LT.

5.1 Determinação da corrente crítica de disrupção

Nesta seção tem-se como objetivo determinar, o menor valor de corrente que faz surgir uma tensão que provoca disrupção entre os eletrodos do centelhador da cadeia de isoladores das linhas que compõe o Sistema PRE de Rondônia. Esse valor limite de corrente, é aqui denominada de corrente crítica de disrupção, cujos valores para cada situação considerada nas simulações, foi determinado utilizando-se o conceito de índice disruptivo crítico [9] aplicado sobre os valores obtidos nos ensaios de tensão disruptiva crítica.

De início, a linha analisada é aquela entre a UHE Samuel e Ariquemes (LT SMAQ). Essa LT possui dois trechos com cabos para-raios isolados, porém somente o primeiro foi energizado e entrou em operação, resultando na linha PRE Itapuã. Esse trecho possui uma extensão aproximada de 70 km e um total de 174 torres, conforme apresentado na Figura 2 (a) e (b). A torre típica considerada é a de suspensão simples, com 33 m de altura.

Nas simulações, realizadas com o ATPDraw, a descarga atmosférica foi representada por uma onda de corrente triangular com tempo de frente igual a 2 μ s e tempo até zero igual a 160 μ s. A impedância de surto da torre foi considerada igual a 150 Ω e a velocidade de propagação da onda de corrente de descarga na torre foi considerada igual à velocidade da luz no vácuo [10], [11], [12]. Os valores de resistência de terra das torres foram distribuídos em faixas, sendo empregada nas simulações os valores médios de cada faixa, correspondentes a 12 Ω , 19 Ω , 28 Ω , 41 Ω , 60 Ω e 96 Ω . No que diz respeito à resistividade do solo, várias medições foram realizadas ao longo da LT SMAQ no trecho até Itapuã do Oeste, sendo adotado nas simulações um valor próximo da média, igual a 5.700 Ω .m. Vale ressaltar, que nas simulações não foi considerado o efeito corona. Com efeito, isso conduz a uma análise conservativa, visto que o efeito corona provoca atenuação e distorção das sobretensões à medida que estas se propagam ao longo da LT. Por fim, as seguintes situações foram consideradas nas simulações:

1 - descargas diretas na torre; 1.1) sem cabo OPGW (com e sem ionização do solo); 1.2) com cabo OPGW (com e sem ionização do solo);

2 - descargas diretas em cada um dos cabos PRE; 2.1) sem cabo OPGW; 2.2) com cabo OPGW; 2.2.1) sem ionização: a) PRE1; b) PRE2; 2.2.2) com ionização do solo: a) PRE1; b) PRE2.

Os valores de correntes críticas resultantes das simulações estão agrupados na Tabela 1. Observando-se esses resultados, verifica-se que a influência da ionização do solo é praticamente nula. Como era de se esperar, a presença do cabo OPGW está associada a correntes críticas mais elevadas, indicando que sua presença pode reduzir a possibilidade de disrupção na cadeia de isoladores e, conseqüentemente, a possibilidade de ocorrência de interrupção no PRE devido a descargas atmosféricas. De maneira oposta, altos valores de resistência de terra dos contrapesos das torres estão associados a menores valores de corrente crítica. Embora não indicados na Tabela 1, ao se considerar as descargas diretas nos cabos PRE todos os valores das correntes críticas são menores que 1,2 kA, independentemente de se considerar ou não o efeito da ionização do solo.

Também foram feitas simulações de descargas diretas nos cabos para-raios energizados da linha PRE desconsiderando a presença do cabo OPGW. A corrente crítica nesse caso é igual a 0,9 kA, independentemente do valor da resistência de terra e da consideração do efeito de ionização do solo.

TABELA 1 - Correntes críticas de disrupção na cadeia de isoladores dos cabos PRE da LT SMAQ

Local	Condição	Correntes Críticas (kA)							
		12 \square	19 \square	28 \square	41 \square	60 \square	96 \square		
Descarga Direta na Torre	Sem OPGW	Ionização	Sem	16,50	12,60	9,40	6,40	4,40	2,80
			Com	16,50	12,60	9,50	6,50	4,50	2,90
	Com OPGW	Ionização	Sem	23,50	18,10	14,10	10,10	7,60	5,60
			Com	23,50	18,20	14,20	10,50	7,80	5,60

Adotando-se procedimento semelhante ao anteriormente descrito, também foram analisadas as correntes críticas de disrupção no trecho entre Ariquemes e Jarú, correspondente à LT AQJR, com extensão aproximada de 84 km e um total de 220 torres com alturas predominantes de 30 m e 33 m, sendo essas duas alturas consideradas nas simulações. Em toda a extensão dessa LT os dois cabos para-raios foram isolados e energizados, compondo a linha PRE Jarú. Nessa LT a maioria dos valores de resistência de terra são menores que aqueles registrados na LT SMAQ. A resistividade do solo também é menor nesse trecho, sendo considerado nas simulações o valor médio igual a 1.700 $\Omega \cdot m$.

TABELA 2 - Correntes críticas de disrupção na cadeia de isoladores dos cabos PRE da LT AQJR

Resistência de terra (Ω)	Corrente crítica (kA) Sem ionização Torre 30 m	Corrente crítica (kA) Sem ionização Torre 33 m	Corrente crítica (kA) Com ionização Torre 30 m	Corrente crítica (kA) com ionização Torre 33 m
10	19,30	18,2	23,75	22,1
19	12,90	12,6	13,10	12,7
30	8,80	8,8	9,10	9,1
36	7,30	7,2	7,60	7,6
61	4,30	4,3	4,70	4,7

Diferentemente do que foi verificado nas simulações da linha PRE associada à LT SMAQ, os resultados apresentados na Tabela 2 mostram claramente a influência da ionização do solo sobre os valores das correntes críticas. Nas simulações de descargas atmosféricas nos condutores da linha PRE, o valor da corrente crítica para as torres com 33 m de altura é de 910 A para qualquer valor de resistência de terra, independentemente de se considerar a ionização do solo. Quando a torre considerada é a de 30 m de altura, a amplitude da corrente crítica é de 920 A.

5.2 Estimativa do número de interrupções por descargas diretas

Na estimativa do número de interrupções por descargas diretas, o primeiro passo foi determinar o número médio estimado de descargas direta por ano incidentes sobre a LT. Para tanto, foi utilizado o método proposto em [12]. No que diz respeito à densidade média de descargas atmosféricas na região, adotou-se $N_g = 10$ descargas/km²/ano. Também foram consideradas duas alturas típicas de torre: 33 m para as torres da LT SMAQ e 30 m para as torres da LT AQJR. A largura da faixa de servidão dessas linhas é igual a 40 m. No segundo passo, a LT SMAQ e LT AQJR foram subdivididas em 6 e 5 trechos, respectivamente, de acordo com as faixas de resistência de terra medidas. À cada valor da corrente crítica de disrupção na cadeia de isoladores do PRE foi associada uma probabilidade de tal corrente ser excedida, através da seguinte equação [14], [15]:

$$P(I_c) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_c}{45}\right)^{4,7}} \quad (1)$$

onde I_c é a corrente crítica expressa em kA.

O número de descargas diretas com possibilidade de causar disrupção na cadeia de isoladores é estimada através da seguinte equação:

$$NIDD = N_L \cdot P(I_c) \quad (2)$$

onde:

$NIDD$ = número estimado de interrupções por descargas diretas;

N_L = número total de descargas diretas estimada para o trecho de linha em análise;

I_c = valor de crista da corrente crítica (corrente que causa disrupção na cadeia de isoladores);

$P(I_c)$ = probabilidade de a corrente crítica I_c ser excedida.

Como resultado da aplicação dos procedimentos acima descritos, para a LT SMAQ, no trecho da linha PRE Itapuã foram obtidos: $N_L = 167$ descargas diretas/ ano e $NIDD = 164$ interrupções/ano. Da mesma forma, para a LT AQJR, obteve-se os seguintes resultados: $N_L = 193$ descargas diretas/ano e $NIDD = 190$ interrupções/ano. Adicionalmente, também foram analisados no escopo desta pesquisa o impacto das descargas atmosféricas incidindo próximas à LT, caracterizando as interrupções por descargas indiretas. Cerca de 25% das interrupções no sistema PRE são provocadas por tensões induzidas advindas das descargas indiretas. Enfim, Todos esses

resultados mostram que praticamente toda descarga atmosférica que atinge a LT, direta ou indiretamente, resulta em uma interrupção no sistema PRE, independentemente do valor da corrente crítica.

5.3 Número de interrupções verificadas

O levantamento das interrupções do sistema PRE ao tempo em que possibilita o conhecimento sobre o desempenho operacional da tecnologia, também é um importante instrumento para análise do comportamento dos cabos para-raios na sua função básica de blindar a LT 230 kV contra as descargas atmosféricas. O levantamento compreendeu o período de 1996 a 14/11/2000 para o PRE Jaru e de 22/09/1997 a 2007 para o PRE Itapuã. O seguinte roteiro metodológico foi adotado:

- a) Coleta de dados: realizada a partir de consultas às documentações produzidas pelas equipes de operação, tanto da CERON, quanto da ELETRONORTE;
- b) Análise das causas das interrupções: visando discriminar as interrupções por descargas atmosféricas foram realizadas análises da coerência entre os registros operacionais e a filosofia da proteção atuada, cruzamento de registros operacionais realizados pelas equipes de operação da ELETRONORTE e CERON; verificação do horário das ocorrências e informações sobre as condições do tempo;
- c) Classificação das interrupções: segundo a origem e segundo a causa;
- d) Codificação das interrupções.

No período considerado na pesquisa, foram registradas 2.321 interrupções no sistema PRE, sendo 690 interrupções atribuídas às descargas atmosféricas. No mesmo período, a LT 230 kV com uma extensão aproximada de 316 km entre a UHE Samuel e Ji-Paraná foi desligada 87 vezes, sendo 61 vezes por descargas atmosféricas. Estratificando esses valores por 100 km de linha por ano, a taxa de desligamentos da LT em relação ao número total de desligamentos é equivalente a 2,3 desligamentos/100 km/ ano. Se forem considerados apenas os desligamentos provocados por descargas atmosféricas, resulta em uma taxa de desligamentos equivalente a 1,6 desligamento/100 km/ ano.

Levantamento feito sobre o desempenho das LT's compostas por estruturas de aço, tipo autoportante convencionais, operando em 230 kV na Região Norte, cobrindo o período de 1988 a 1998, ou seja, durante 11 anos, apresentaram um desempenho equivalente a 5,91 desligamentos/100km/ano. Em relação às descargas atmosféricas, o desempenho apresentado foi de aproximadamente 1,3 desligamentos/100km/ano [15]. Cumpre salientar, que a LT 230 kV entre a UHE Samuel e Ji-Paraná foram projetadas admitindo-se desempenho frente a descargas atmosféricas equivalente a 2 desligamentos/ 100 km/ ano.

6.0 - CONCLUSÃO

Apesar da isolamento e energização dos cabos para-raios, as simulações realizadas, considerando os diversos valores de resistência de terra medidos, mostraram que praticamente todas as descargas atmosféricas diretas e parte daquelas que incidirem nas proximidades da LT resultarão em sobretensões com amplitudes superiores à tensão crítica de descarga disruptiva da linha PRE, isto é, do centelhador da cadeia de isoladores. Essa constatação está coerente com os resultados obtidos através do levantamento das interrupções no sistema PRE, realizados a partir de seus registros operacionais. Adicionalmente, vale ressaltar que as alterações na cabeça das torres para adequá-las à implantação da tecnologia PRE teve como consequência a redução no ângulo de blindagem, o que certamente contribuiu para melhorar o desempenho dos cabos para-raios na sua função principal de blindar a LT contra as descargas atmosféricas.

Comparativamente, o desempenho da LT 230 kV frente a descargas atmosféricas, equivalente a 1,6 desligamentos/100 km/ ano é relativamente próximo daquele resultante do levantamento feito nas linhas em operação na Região Norte, cujo valor é de aproximadamente 1,3 desligamentos/ 100 km/ ano. Outro fato importante é que a LT 230 kV aqui estudada foi concebida em projeto para um nível de desligamento por descargas atmosféricas igual a 2,0 desligamentos/100 km/ano.

A análise realizada no âmbito desta pesquisa permite concluir que a isolamento e energização dos cabos para-raios da LT 230 kV do sistema de transmissão de Rondônia, de modo a permitir a operação do sistema PRE, não deteriorou o desempenho da LT frente a descargas atmosféricas. Esse resultado, ao tempo em que endossa o acerto das Empresas de Transmissão e Distribuição (atuais Eletrobras Eletronorte e Eletrobras Distribuição Rondônia) na aplicação da tecnologia PRE em Rondônia, apesar das incertezas sobre como seria seu desempenho na região, torna possível sua aplicação em outros projetos de LT.

Enfim, a tecnologia PRE oferece uma importante contribuição para o atendimento a pequenas comunidades próximas a LTs. É uma opção de compartilhamento entre a Transmissão e a Distribuição de energia elétrica, contribuindo para otimização das faixas de passagem das estruturas, bem como com o custo de implantação desses dois segmentos. Esse assunto deverá ser levado em consideração pelo planejamento elétrico (EPE) e pelos órgãos de governo (MME e ANEEL), pois, como os modelos atuais da Transmissão e da Distribuição são totalmente distintos, têm impossibilitado novos empreendimentos desse e de outros tipos com a mesma filosofia de compartilhamento. Essa dificuldade tem contribuído com a falta de produtividade do setor elétrico brasileiro, hoje tão reclamada pela sociedade.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CERON. Relatório de gestão 1997. Porto Velho: CERON, 1998.
- [2] ILICETO, F.; CINIERI, E.; CASELY-HAYFORD, L.; DOKYI, G. New concepts on MV distribution from insulated shield wires of HV lines: operation results or an experimental system and applications in Ghana. IEEE Transactions on Power Delivery, v.4, n.4, p.2130-44, Oct. 1989.
- [3] D'AJUZ, Ary; BLANCO, A. F. Pazo; LAGE, Marcos M.; MARTINEZ, Manoel L. B.; RAMOS, José Ezequiel; PIRES, Valdemir Aparecido; CRUZ, Antônio Marcelo Tavares. Implantação de cabos para-raios energizados: projeto, comissionamento e experiência operativa. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 14, 1997, Belém. Anais. SNTPEE. Belém, 1997. Grupo VIII: Subestações (GSU). 1 CD-ROM
- [4] ELETRONORTE/ORON. Sistema computadorizado de gestão de equipamentos: subsistema controle de equipamentos. Porto Velho, 1995.
- [5] GUEDES, Vitor Tadeu. Redução de sobretensões em cadeias de isoladores da linha de transmissão 230 kV Samuel / Ji-Paraná. In: PAINEL INTEGRADO DA QUALIDADE (PIQ) 9, 2003, Porto Velho. Anais. Porto Velho, 2003. 1 CD-ROM
- [6] ELETRONORTE. Instalação de sistema de aterramento em estrutura de linha de transmissão. Instrução Técnica de Manutenção. Brasília, jan.1997. ITML LT0.22 – Rev. 03.
- [7] D'AJUZ, Ary; ROSE, Eber Hávila; MARTINEZ, Manuel L. B.; PINTO, Wanderley S.; ARAÚJO, Marcos C.; TAKAI, Mário N.; OLIVEIRA JÚNIOR, Hélio Pessoa de; PIRES, Valdemir A.; TAVARES, Antônio Marcelo. Estudos elétricos necessários para a implantação da tecnologia de cabos pára-raios energizados. In: ENCONTRO REGIONAL IBERO-AMERICANO DA CIGRÉ, 8, 1999, Ciudad del Este, Paraguay. Proceedings. ERLAC. Ciudad Del Este, Paraguay, 1999.
- [8] RAMOS, J. E.; PIANTINI A.; PIRES, V. A. ; D'AJUZ, A. The Brazilian experience with the use of the shield wire line technology (SWL) for energy distribution. IEEE Latin America Transaction, v.7, n.6, p.650-656, Dec. 2009.
- [9] DARVENIZA, M.; VLASTOS, A. E. The generalized integration method for predicting for non-standard wave shapes – a theoretical basis. IEEE Transactions on Electrical Insulation. v. 23, n. 3, p.373-381. Jun. 1988.
- [10] ANDERSON, J. G. Lightning performance of transmission lines. In: Transmission Line Reference Book:345 kV and Above. 2.ed. Palo Alto, California, USA, Electric Power Research (EPRI), 1987. Cap. 12, p.545-597.
- [11] GATTA F.M; ILICETO F.; LAURIA, S. Lightning performance of HV transmission lines with insulated shield wire(s) energized at MV: analysis and field experience. In: SYMPOSIUM ON BEHAVIOUR OF ELECTRICAL EQUIPMENT AND COMPONENTS IN TROPICAL ENVIRONMENT, 2001, Cairns, Proceedings.CIGRÉ.Cairns, 2001. Paper n. 100-07, Sep. 2001.
- [12] MARTINEZ, Juan. A.; CASTRO-ARANDA, Ferley. Lightning performance analysis of overhead transmission lines using EMTF. IEEE Transactions on Power Delivery.v.20, n. 3, p. 2200-2210, Jul. 2005.
- [13] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 1243: IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines. New York, 1997.
- [14] SCHROEDER, M. A. O. Modelo eletromagnético para descontaminação de ondas de corrente de descargas atmosféricas: aplicação às medidas da Estação do Morro do Cachimbo. Belo Horizonte, 2001, 232f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2001.

[15] SILVA, Sandro Pohl da; PIANTINI, Alexandre; DE FRANCO, Jorge Luiz; GONÇALVES, Jonas. Lightning performance studies for a 13.8 kV distribution network. In: VII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION – VII SIPDA. Curitiba, Nov. 2003. Proceedings. SIPDA. São Paulo, IEE/USP, 2003. p. 137-143.

[16] FERNANDES, José Henrique Machado; MACHADO, Vanderlei Guimarães. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE INOVAÇÕES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO. 1999, Rio de Janeiro: abr. 1999. CIGRÉ – SC 22.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



José Ezequiel Ramos, nasceu em Minas Gerais, Brasil, em 10 de abril de 1956. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso, no ano de 1981. Em 2000 concluiu o mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina. Em 2010 concluiu o doutorado em ciências no Programa de Pós-Graduação em Energia da USP. Na CERON (atual Eletrobras Distribuição Rondônia - EDRO) desde 1982, trabalhou nas áreas de projeto e construção de subestações, linhas e redes de distribuição e também nas áreas de Operação, Manutenção e Estudos Elétricos. Desde 2011 também é professor da Universidade Federal de Rondônia, lotado no Departamento de Engenharia Elétrica. O Eng. Prof. Ramos é autor e coautor de diversos trabalhos técnicos e científicos publicados em periódicos ou apresentados em congressos nacionais e internacionais.



Alexandre Piantini (Londrina, 1963) graduou-se em Eng^a Elétrica pela UFPR em 1985 e obteve os títulos de Mestre e Doutor em Engenharia pela Escola Politécnica da USP (EPUSP) em 1991 e em 1997, respectivamente. Ingressou na USP em 1986, onde atualmente atua como professor nos programas de pós-graduação do Inst. de Energia e Ambiente (IEE/USP) e da EPUSP. Suas principais áreas de interesse se referem a transitórios eletromagnéticos, qualidade de energia e modelagem de fenômenos associados a descargas atmosféricas. É *Senior Member* do IEEE e líder do Centro de Estudos em Descargas Atmosféricas e Alta Tensão (CENDAT/USP). O Prof. Piantini coordenou o *CIGRE Working Group C4.408*, é Editor Associado dos periódicos *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, *Electric Power Systems Research* e autor ou coautor de mais de 150 artigos completos publicados em revistas ou em anais de congressos nacionais e internacionais.



Ary D'Ajuz, nasceu no Rio de Janeiro, Brasil, no ano de 1953. Graduiu-se em Engenharia Elétrica em 1977 pela Universidade Gama Filho e no ano de 1988 concluiu o mestrado em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ. Trabalhou na empresa FURNAS no período de 1978 a 1986, na ELETRONORTE no período de 1986 a 2000 e atualmente no ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. Está finalizando sua tese de doutorado na UNIFEI. Trabalhou por mais de 24 anos com equipamentos e estudos transitórios eletromagnéticos. O Eng. Ary é autor de diversos trabalhos científicos publicados em periódicos e apresentados em congressos nacionais e internacionais. É coautor de 3 livros técnicos sobre equipamentos e transitórios eletromagnéticos.



Valdemir Aparecido Pires, natural de Agudos, São Paulo, Brasil, nascido em 1955. Formou-se em Tecnologia de Sistemas Elétricos pela Faculdade de Tecnologia de Bauru e em Administração de Empresas pela Universidade Federal de Rondônia. Na CERON (atual Eletrobras Distribuição Rondônia - EDRO) desde 1981, desenvolveu trabalhos nas áreas de Planejamento, projeto e construção de linhas e redes de distribuição, especificação de equipamentos e elaboração de normas técnicas. Atualmente vem trabalhando no Planejamento da Manutenção de Subestações e Linhas de Subtransmissão, que compõem o Sistema Elétrico da Eletrobras Distribuição Rondônia.

Paulo Roberto de Oliveira Borges, Possui graduação em Engenharia pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (1983), e mestrado em Ciências da Computação pela Universidade Federal de Santa Catarina (2001). Atualmente é assistente, nível 1 da Universidade Federal de Rondônia e está cursando seu doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Ciência da Computação.