



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GSC - 18
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO X
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC**

MÉTODOS DE CÁLCULO DA ENTRADA DE ENERGIA EM PÁRA-RAIOS - UM ESTUDO COMPARATIVO

George R. S. de Lira*
Marcos L. A. Quirino*

Edson G. da Costa*
Estácio W. Neto*

Damásio F. Jr*
Marcelo Maia**

Universidade Federal de Campina Grande*

Companhia Hidro Elétrica do São Francisco*

RESUMO

O objetivo do trabalho é a demonstração do desenvolvimento e uso de métodos práticos para analisar o desempenho de pára-raios à base de Óxido de Zinco (ZnO) sob algumas condições de surtos e sobretensões na frequência industrial. Medições de absorção de energia em um pára-raios de ZnO foram realizadas em laboratório de alta tensão. Foram feitas avaliações das equações para o cálculo da energia absorvida nas condições analisadas, utilizando equações propostas nas normas internacionais e simulações com programas computacionais do tipo EMTP (Electromagnetic Transients Program). Para tanto, foi realizado um estudo comparativo para analisar os métodos de cálculo de entrada de energia nos pára-raios utilizados nas empresas de transmissão de energia elétrica com os cálculos de energia recomendados pelas normas internacionais e os obtidos através de simulação com o EMTP.

PALAVRAS-CHAVE

Pára-raios, Cálculo de energia, Varistor de ZnO, ATP.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os pára-raios são dispositivos fundamentais em sistemas de potência, atuando na proteção contra surtos de tensão e auxiliando na coordenação de isolamento de subestações elétricas. Sua função é limitar o nível de tensão nos terminais dos equipamentos da subestação, evitando que os mesmos sejam submetidos a tensões acima das suportáveis. Geralmente, os pára-raios estão conectados entre a linha de transmissão e a terra e são caracterizados por uma curva de tensão x corrente ($V - I$) não-linear. Na tensão de operação circula pelo pára-raios uma pequena corrente de fuga, contudo se a tensão ultrapassar um determinado valor (tensão de referência) a corrente pode atingir valores bastante elevados.

Quanto a sua construção, os pára-raios apresentam estrutura simples, constituída basicamente do empilhamento de blocos cilíndricos semicondutores, conhecidos como varistores. Os blocos varistores são envolvidos por um invólucro isolante, geralmente de porcelana ou material polimérico.

Os varistores a base de óxido de zinco (ZnO) são semicondutores eletro-cerâmicos com características $V - I$ altamente não linear, constituindo-se portanto, a essência de um pára-raios (Costa, 1999). Na Fig. 1 é mostrada uma fotografia de varistores típicos. Eles são fabricados pelo processo de sinterização e são compostos de óxido de zinco e outros dopantes. Como um dispositivo semicondutor, os varistores possuem uma forte dependência com a temperatura, a qual está associada a sua capacidade de absorção de energia.

O estudo das técnicas para o cálculo da entrada de energia em pára-raios tem como motivação o aprimoramento das especificações e da seleção adequada dos pára-raios para o sistema elétrico e local mais apropriado para a sua instalação. Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo entre três métodos para o cálculo da entrada de energia em pára-raios. O primeiro deles baseia-se em medições realizadas em laboratório, o segundo em cálculos analíticos e o terceiro em simulações digitais realizadas no programa ATP (Alternative Transients Program) (Leuven EMTP Center, 1987).



FIGURA 1. Fotografias de Pastilhas Típicas de Varistores.

2.0 - CÁLCULOS ANALÍTICOS

Um dos métodos utilizados no trabalho para o cálculo da energia absorvida em pára-raios baseia-se em cálculos analíticos sugeridos por Nigol (1992). As várias formas de cálculo da energia absorvidas adiabaticamente são enumeradas, a seguir.

2.1 - Descarga de linha de transmissão

A Eq. 1 fornece a energia absorvida por um pára-raios de ZnO quando do descarregamento de uma linha de transmissão, Fig. 2.

$$Q = \frac{1}{2} Cl(V_L^2 - V_{res}^2)10^6, \quad (1)$$

em que, Q é a energia absorvida em kJ, C é a capacitância por unidade de comprimento da linha em, F/km, l é o comprimento da linha em km, V_L é a tensão de surto da linha em kV e V_{res} é tensão residual em kV.

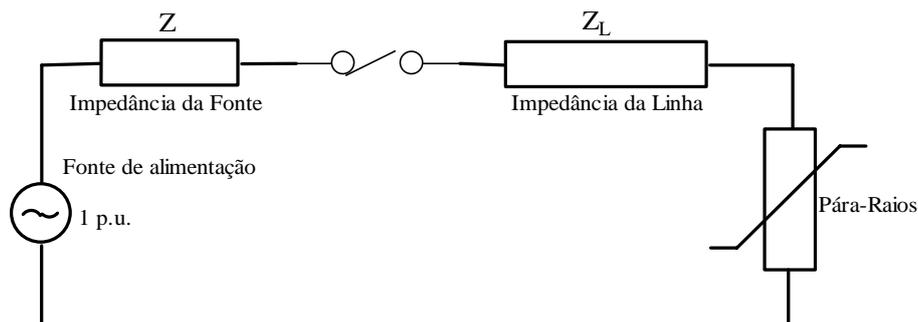


FIGURA 2. Circuito de um carregamento em uma linha de transmissão monofásica (ABB, 1995).

Na Eq. 1 é demonstrado que o pára-raios limita a tensão V_L na linha reduzindo-a para o valor de pico da tensão residual (V_{res}). Na curva característica $V - I$ do pára-raios, V_L se localiza acima da tensão de referência. No seu estudo, Nigol (1992) calculou a energia absorvida por um pára-raios utilizando a tensão de referência, ou melhor, o valor de pico da tensão nominal. Para a maioria dos pára-raios, a tensão nominal se encontra entre 0,90 e 0,98 da tensão de referência. A descarga de linha é especificada nas normas em termos do valor de pico da máxima tensão de operação do sistema em regime contínuo (V_c), isto é, $K_2\sqrt{2}V_c$. Em que K_2 varia de 2 a 2,6 dependendo do nível de tensão e/ou do controle da tensão de carregamento da linha pelos disjuntores, durante o chaveamento. Para realizar o cálculo da energia absorvida pelo varistor durante a descarga na linha transmissão, utilizou-se os dados da Tabela 1.

TABELA 1 – Parâmetros da linha transmissão.

Parâmetros	Capacitância (pF/km)	Tensão de descarga (kV)	Tensão residual (kV)	Comprimento da linha (km)	Z (Ohm)	Z _L (Ohm/km)
	6,90	20,00	12,80	150,00	282,00	0,16

2.2 Descarga de Impulso de Corrente Atmosférico e de Alta Corrente

O impulso de corrente de classificação ou atmosférico e o impulso de alta corrente apresentam formas de onda 8/20µs e 4/10µs, respectivamente. Na Fig. 3 é mostrada uma forma de onda de um impulso de corrente com os tempos de frente e cauda. A onda de impulso pode ser representada aproximadamente por um semi-ciclo do seno. A forma da onda semi-senoidal reúne as formas de onda de 4/10 e 8/20µs dentro do tempo de tolerância permitido pelas normas (Nigol,1992), com:

$$t_0 = 1,2 t_2. \quad (2)$$

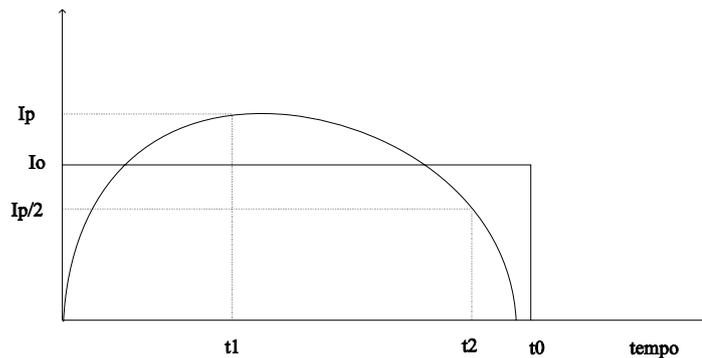


FIGURA 3 - Forma de onda de um impulso de corrente (semi-senoidal).

A energia total absorvida pelo pára-raios é dada por:

$$Q = 0,764 I_p \cdot V_a \cdot t_2 \quad (3)$$

sendo, I_p o pico da corrente e V_a a tensão nos terminais do pára-raios para a corrente I_p .

O cálculo da energia absorvida no varistor, neste caso, foi feito baseado nos dados obtidos experimentalmente através da montagem experimental da Fig. 5, tais dados são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 – Parâmetros da descarga de impulso de corrente atmosférico.

Parâmetros	Corrente de pico (kA)	Tensão terminal (kV)	t ₂ (µs)
	12,14	14,27	20,00

2.3 Sobretensões na Frequência Industrial

Na presença de sobretensões na frequência industrial, a equação para o cálculo da energia absorvida (Nigol, 1992 e Costa,1999) é:

$$Q = \frac{(V_{ref.} + \sqrt{2}V) I_p (\pi - 2\theta)}{4 \pi} t \quad (4)$$

sendo, V é igual a sobretensão na frequência industrial em kV; I_p , é a corrente de pico, em A; $V_{ref.}$ é o valor da tensão de referência dada em kV e o tempo de duração da sobretensão na frequência industrial, t , em s. O tempo

de condução (t_0) é $(\pi - 2\theta)$, onde $\theta = \arcsen \frac{V_{ref.}}{\sqrt{2}V}$,

Baseado nos dados experimentais da Tabela 3 utilizou-se a Eq. 4 para realizar o cálculo da entrada de energia em pára-raios na presença de sobretensões.

TABELA 3 – Parâmetros de sobretensões na frequência industrial.

	Temperatura					
	Ambiente (27°C)	40°C	60°C	80°C	100°C	120°C
I_P (mA)	5,12	5,20	6,80	18,80	20,80	19,40
V_P (kV)	11,926	11,926	12,123	11,789	11,739	11,555
V_{ref} (kV)	10,063	9,504	9,689	9,689	9,689	9,689
t (s)	1,00					

2.4 Cálculo da Entrada de Energia na Tensão de Operação

A energia absorvida por um para-raios a ZnO devido à tensão normal de operação ou sobretensões de regulação obtida a partir da expressão abaixo:

$$Q = V \cdot I_r \cdot t_0, \quad (5)$$

sendo, I_r e V são valores eficazes da corrente de fuga resistiva e da tensão aplicada, respectivamente, e t_0 , o tempo de duração da tensão aplicada.

O cálculo da entrada de energia na tensão de operação foi realizado baseado nas informações contidas na Tabela 4.

TABELA 4 – Parâmetros na tensão de operação.

	Temperatura					
	Ambiente (27°C)	40°C	60°C	80°C	100°C	120°C
I_P (mA)	0,728	0,820	0,840	1,240	1,320	1,360
V_P (kV)	10,063	9,504	9,689	9,689	9,689	9,689
I_{RMS} (mA)	0,421	0,436	0,474	0,659	0,746	0,842
V_{RMS} (kV)	7,386	6,955	6,975	7,236	7,275	7,210
t₀ (s)	1,00					

3.0 - MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO

Um varistor de ZnO com 3,83 cm de diâmetro e 4,58 cm de altura foi selecionado para obtenção da sua curva característica $V - I$. O ensaio necessário à obtenção da primeira região linear (região de baixa corrente) da curva $V - I$ do varistor foi realizado à temperatura ambiente, a 40°C, a 60°C, a 80°C, a 100°C e a 120°C. As temperaturas no varistor foram obtidas através da utilização de estufa com temperatura controlada. A estufa foi adaptada e uma bucha de passagem foi construída e instalada. A bucha de passagem permite a aplicação de tensões de até 15 kV nos terminais do varistor. Na Fig. 4 pode-se ver um diagrama esquemático do ensaio. A resistência de 282 kΩ foi utilizada como proteção. Ela limita a corrente em caso de um curto-circuito.

Foi usado um divisor capacitivo que possibilita a medição e a aquisição das tensões aplicadas ao varistor. O sinal de corrente é adquirido através da resistência shunt. A corrente é obtida dividindo-se a tensão sobre o shunt pela sua resistência. Para aperfeiçoar as medições da tensão e corrente, conectou-se à mesa de controle um osciloscópio digital de quatro canais que permitia visualizar e medir valores de pico e RMS das tensões e correntes. O osciloscópio possui uma interface serial que permite a conexão com um microcomputador. Um sistema de aquisição de dados mais elaborado foi implementado. Uma rotina foi desenvolvida no MATLAB [The Mathworks Inc., 1992] para coletar todas as informações de corrente e tensão fornecidas pelo osciloscópio, armazenando-as no disco rígido para tratamento posterior.

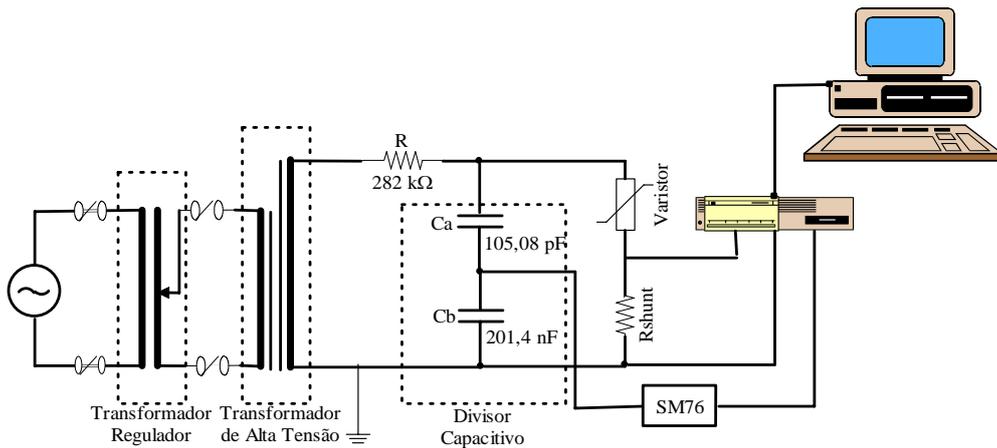


FIGURA 4 - Montagem experimental para obtenção da primeira região linear da curva característica do varistor.

A obtenção das correntes e tensões que servirão para a construção da região não-linear da curva característica do varistor foi realizada utilizando-se a montagem experimental ilustrada na Fig. 5. O gerador de impulso de corrente é formado por uma mesa de controle, um banco de capacitores com uma determinada tensão e através de um sistema de gatilhamento descarrega-se o banco de capacitor. Com isso, o varistor é submetido a uma forma de onda do tipo $4/10 \mu\text{s}$ ou $8/20 \mu\text{s}$ (impulso de corrente), dependendo dos valores do resistor e do indutor. A forma de onda da tensão é obtida a partir do divisor misto e a forma de onda da corrente é obtida sobre a resistência shunt ($R_{\text{shunt}} = 10,54 \text{ m}\Omega$). A aquisição dos valores de tensão e corrente é realizada pelo sistema de aquisição de dados constituído de: um osciloscópio digital, um microcomputador e uma rotina desenvolvida no MATLAB.

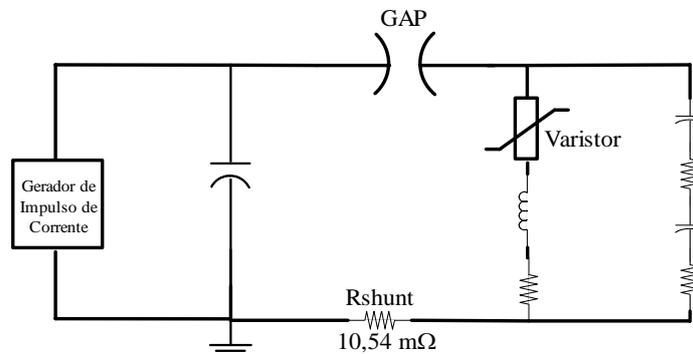


FIGURA 5 - Montagem experimental para obtenção da região não-linear da curva característica do varistor.

Uma rotina em MATLAB foi implementada para tratar os dados obtidos dos ensaios descritos anteriormente. Ao término da execução da rotina de tratamento de dados, obtiveram-se as curvas características do varistor nas temperaturas preestabelecidas, conforme mostrado na Fig. 6.

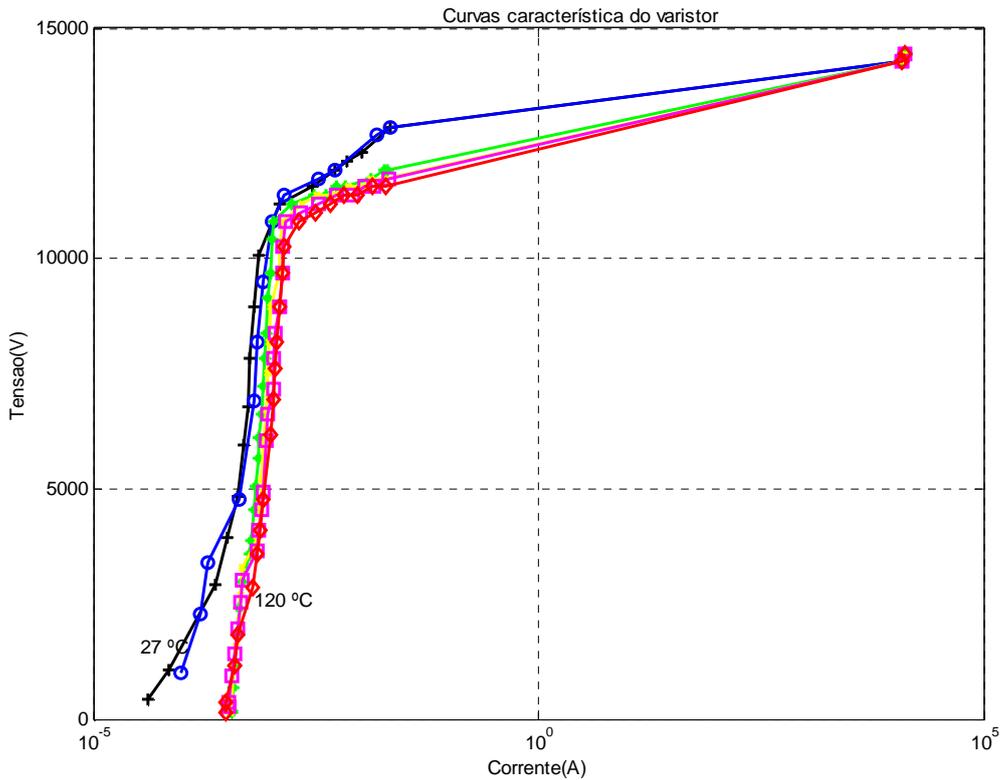


FIGURA 6 – Família de curvas característica do varistor em diversas temperaturas.

4.0 - SIMULAÇÕES DIGITAIS

O ATP é um programa que permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz de admitância de barras. A formulação matemática é baseada no método das características (método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados. Durante a solução do problema são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes.

O programa permite a representação de não-linearidades (por exemplo, um varistor), elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, entre outros.

Neste trabalho o ATP será utilizado basicamente para, simular fontes, chaves, elementos não-lineares e alguns elementos concentrados, de tal forma que seja possível realizar um estudo da entrada de energia em pára-raios (varistor). Modelou-se o varistor a partir das informações (tensões e correntes de pico) fornecidas pelas famílias de curvas característica obtidas nos ensaios e mostradas na Fig. 6.

O modelo utilizado no estudo dos diversos casos de entrada de energia em pára-raios (exceto o caso de descarga em linha de transmissão) está esquematizado na Fig. 7:

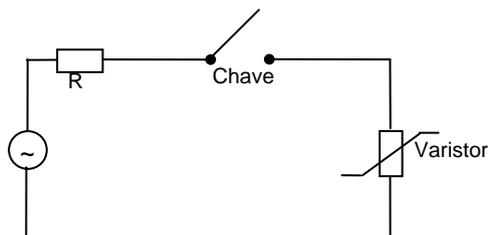


FIGURA 7 – Modelo adotado nas simulações realizadas pelo ATP.

Os resultados de cada simulação foram tratados por uma rotina desenvolvida no MATLAB, que possibilitou o cálculo da energia absorvida, nos quatro casos analisados, a partir dos sinais de tensão e corrente produzidos pelo ATP.

4.1 Descarga em linha de transmissão

No caso da simulação de descarga em linha de transmissão utilizou-se o modelo baseado no circuito de carregamento de uma linha de transmissão monofásica (ABB, 1995) semelhante ao esquematizado na Fig. 2. Os dados necessários à realização dessa simulação encontram-se na Tabela 1.

4.2 Descarga de Impulso de Corrente Atmosférico e de Alta Corrente

A simulação de descarga de impulso de corrente atmosférico e de alta corrente foi feita baseado no circuito da Fig. 7, os dados necessários à realização dessa simulação são apresentados na Tabela 2.

4.3 Sobretensões na Freqüência Industrial

Novamente utilizou-se o circuito da Fig. 7 na modelagem de sobretensões na freqüência industrial, os parâmetros necessários à simulação são apresentados na Tabela 3.

4.4 Cálculo da Entrada de Energia na Tensão de Operação

Para realizar o cálculo da entrada de energia na tensão de operação utilizou-se o modelo da Fig. 7 e os dados contidos na Tabela 4.

5.0 - ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Descarga em linha de transmissão

A comparação dos métodos de cálculo da absorção de energia, para a descarga em linha de transmissão, foi feita com os valores fornecidos pela simulação utilizando o ATP e através de cálculos analíticos. A realização de ensaios simulando descargas em linhas de transmissão não pôde ser realizada devida às dificuldades técnicas, limitando assim, a análise proposta. O resultado da simulação e do cálculo é apresentado na Tabela 5. Os resultados obtidos apresentam-se bem próximos, com um erro percentual inferior a 5%.

TABELA 5 – Resultados da simulação e do cálculo analítico.

Energia/Temperatura	Ambiente (27°C)
E_{ATP} (kJ)	126,36
E_{Calculada} (kJ)	122,21
Erro_{ATP - Calc.} (%)	3,40

5.2 Descarga de Impulso de Corrente Atmosférico

A comparação dos métodos de cálculo da absorção de energia, para a descarga de impulso de corrente atmosférico, foi feita com os valores fornecidos pela simulação utilizando o ATP, através de cálculos analíticos e por dados obtidos na medição. Os resultados das medições, da simulação e do cálculo são apresentados na Tabela 6. Os resultados obtidos apresentam-se bem próximos. Com era esperado o ATP mostrou-se mais eficiente na análise de transitório.

TABELA 6 – Resultados da medição, simulação e cálculo analítico.

Energia/Temperatura	Ambiente (27°C)
E_{Medicao} (kJ)	2,91
E_{ATP} (kJ)	2,83
E_{Calculada} (kJ)	2,65
Erro_{Med. - ATP} (%)	2,75
Erro_{Med. - Calc.} (%)	8,95

5.3 Sobretensões na Freqüência Industrial

A comparação dos métodos de cálculo da absorção de energia, utilizando sobretensões na freqüência industrial, foi feita com os valores fornecidos pela simulação utilizando o ATP, através de cálculos analíticos e medições da corrente e da tensão, em diversas temperaturas. Os resultados da simulação, do cálculo e das medições são apresentados na Tabela 7. Os resultados foram comparados. Os erros entre os valores obtidos através da medição e da simulação com o APT apresentaram valores elevados. Os valores obtidos da energia através da medição e do cálculo analítico apresentaram-se mais próximos, contudo os valores obtidos para 60°C divergiram, mesmo assim, o valor medido se encontra entre o ATP e o calculado. O modelo da Fig. 7, que se está utilizando, é simples e que um modelo mais aprimorado poderia resultar em erros menores.

TABELA 7 – Resultados da medição, simulação e cálculo analítico.

Energia/Temperatura	Ambiente (27°C)	40°C	60°C	80°C	100°C	120°C
$E_{Medicao}$ (J)	21,64	22,33	31,53	81,32	90,34	78,68
E_{ATP} (J)	26,34	25,27	36,43	60,44	75,65	54,96
$E_{Calculada}$ (J)	20,44	21,22	25,25	74,99	82,48	75,24
$Erro_{Med. - ATP}$ (%)	21,72	13,17	15,54	25,67	16,26	30,15
$Erro_{Med. - Calc.}$ (%)	5,54	4,97	19,92	7,78	8,70	4,37

5.4 Cálculo da Entrada de Energia na Tensão de Operação

Para realizar as simulações digitais e cálculos analíticos propostos neste trabalho, utilizaram-se os dados, da Tabela 4, obtidos a partir da curva característica do varistor, nas diversas temperaturas analisadas. A comparação dos métodos de cálculo da absorção de energia, na tensão de operação, foi feita com os valores fornecidos pela simulação utilizando o ATP, através de cálculos analíticos e medições da corrente e da tensão, em diversas temperaturas. Os resultados da simulação, do cálculo e das medições são apresentados na Tabela 8. Os resultados foram comparados. Os erros entre os valores obtidos através da medição e da simulação com o APT apresentaram valores elevados. Os valores obtidos da energia através da medição e do cálculo analítico apresentaram-se mais próximos, contudo os valores obtidos para 40°C divergiram. Medições mais aprimoradas serão feitas a fim de confirmar as divergências.

TABELA 8 – Resultados da medição, simulação e cálculo analítico.

Energia/Temperatura	Ambiente (27°C)	40°C	60°C	80°C	100°C	120°C
$E_{Medicao}$ (J)	2,99	2,71	3,04	4,83	5,43	6,33
E_{ATP} (J)	3,57	3,71	3,97	5,33	6,07	6,35
$E_{Calculada}$ (J)	3,11	3,04	3,08	4,77	5,43	6,07
$Erro_{Med. - ATP}$ (%)	19,39	36,90	30,60	10,35	11,79	0,32
$Erro_{Med. - Calc.}$ (%)	4,01	12,18	1,32	1,24	0,00	4,12

6.0 - CONCLUSÕES

O trabalho relatou o desenvolvimento e uso de métodos práticos para analisar o comportamento de pára-raios à base de Óxido de Zinco (ZnO) sob várias condições de surtos e sobretensões na freqüência industrial. Também foram feitas avaliações das equações para o cálculo da energia absorvida, utilizando equações propostas nas normas internacionais e simulações com programas computacionais do tipo EMTP (Electromagnetic Transients Program). Os resultados quando comparados com o cálculo da energia obtida nas medições mostrou que o cálculo efetuado com o ATP foi mais satisfatório com impulsos de corrente e descarga de linha de transmissão, contudo, o cálculo analítico forneceu resultados mais precisos na freqüência industrial.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Costa, E. G., 1999, "Análise do Desempenho de Pára-Raios de Óxido de Zinco". Tese de Doutorado, COPELE/UFPB, Campina Grande, Brasil.
- (2) Leuven EMTP Center, 1987, "Alternative Transients Program Rule Book". Heverlee, Bélgica.
- (3) NIGOL, O. Methods for analyzing the performance of gapless metal oxide surge arresters. IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 7, n. 3, p. 1656-1665, July, 1992.
- (4) ABB SWITCHGEAR. Selection guide for ABB HV surge arresters-technical information. Publ. SESWG/A 2300 E, Edition 3, 1995-02.