UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA
EP-FEA-IEE-IF

MARCOS EDUARDO GUERRA ALVES

**METODOLOGIA PARA O DIAGNÓSTICO EM TEMPO REAL
DE PARA-RAIOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

SÃO PAULO
2013

MARCOS EDUARDO GUERRA ALVES

**METODOLOGIA PARA O DIAGNÓSTICO EM TEMPO REAL DE PARA-
RAIOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO E TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Energia e Ambiente / Instituto de Física) para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Hedio Tatizawa

Versão Corrigida

(versão original disponível na Biblioteca da Unidade que aloja o Programa e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP)

SÃO PAULO
2013

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

FICHA CATALOGRÁFICA

Alves, Marcos Eduardo Guerra.

Metodologia para o diagnóstico em tempo real de para-raios em sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica./ Marcos Eduardo Guerra; orientador : Hedio Tatizawa. – São Paulo, 2013.

129f.: il.; 30 cm.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Energia) EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo

1. Para-raios. 2. Sistemas elétricos de potência.
3. Monitoração on-line I. Título

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

MARCOS EDUARDO GUERRA ALVES

*“Metodologia para o Diagnóstico em Tempo Real de Para-Raios em Sistemas
de Distribuição e Transmissão de Energia Elétrica”*

Tese defendida e aprovada pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Hedio Tatizawa – PPGE/USP
Orientador e Presidente da Comissão Julgadora

Prof. Dr. Geraldo Francisco Burani – PPGE/USP

Prof. Dr. Arnaldo Gakiya Kanashiro – PPGE/USP

Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim – EESC/USP

Prof. Dr. Josemir Coelho Santos – EP/USP

“Se fizéssemos todas aquelas coisas de que somos capazes, nós nos surpreenderíamos a nós mesmos”.

Thomas Alva Edison

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Hedio Tatizawa pela orientação, suporte e sugestões na elaboração e revisão do trabalho.

Ao Prof. Dr. Arnaldo G. Kanashiro pelos dados de ensaios que contribuíram para o refinamento deste trabalho e pelas sugestões no exame de qualificação.

Ao Prof. Dr. Geraldo F. Burani pelas sugestões no exame de qualificação.

Ao Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo por fornecer a estrutura e condições para a realização desse trabalho.

Ao meu tio Eduardo Pedrosa pelo incentivo, orientação e condições proporcionadas ao longo de muitos anos.

À Treetech Sistemas Digitais por propiciar as condições e o tempo para cursar as disciplinas, realizar as pesquisas e elaborar esse trabalho.

RESUMO

ALVES, M. E G. **Metodologia para o Diagnóstico em Tempo Real de Para-raios em Sistemas de Distribuição e Transmissão de Energia Elétrica**. 2013. 129f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

Dada a importância dos para-raios para a proteção dos diversos equipamentos e instalações nos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica contra danos provocados por sobretensões transitórias, quer sejam originadas por descargas atmosféricas, quer por estabelecimento e interrupção de cargas reativas (sobretensões de manobra), é apresentada uma nova metodologia de diagnóstico de seu estado. São apresentadas também as formas construtivas dos para-raios com tecnologias de carboneto de silício (SiC) e óxido de zinco (ZnO), as quais são associadas a modelos elétricos de representação completos e simplificados, de forma a facilitar a análise dos métodos de diagnóstico. Os métodos atualmente empregados para o diagnóstico dos para-raios, tanto fora de serviço quanto durante a operação, bem como suas potencialidades e pontos falhos são explanados, para os equipamentos de SiC e de ZnO. O novo método de diagnóstico proposto nesse trabalho é introduzido a seguir, baseado na monitoração da capacitância equivalente e resistência equivalente do para-raio, juntamente com simulações dos diversos tipos de defeitos passíveis de ocorrência em equipamentos de SiC e ZnO, verificando-se os parâmetros de medição afetados por cada um deles, de forma a estabelecer a efetividade do novo método de monitoração para a detecção dos defeitos. Também é apresentado um método para viabilização da monitoração em tempo real de capacitância e de resistência equivalentes, através da técnica de soma vetorial das correntes de fuga, atualmente já empregada para monitoração de buchas capacitivas de transformadores e outros equipamentos. Por fim, são apresentados os resultados esperados com o novo método de monitoração e as sugestões de novas etapas para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Para-raios, Diagnóstico em tempo real, Monitoração contínua, Soma vetorial de correntes.

ABSTRACT

ALVES, M. E G. **Methodology for Real Time Diagnostic of Surge Arresters in Electric Energy Distribution and Transmission Systems**. 2013. 129f. Doctorate Thesis – Graduate Program in Energy of Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

Given the importance of surge arresters for the protection of several devices and installations in electric energy distribution and transmission systems from damages caused by transitory overvoltages, either originated from atmospheric discharges or by closing or opening of reactive loads (switching overvoltages), a new methodology for diagnosing their condition is presented. The constructive forms of surge arresters with silicon carbide (SiC) and zinc oxide (ZnO) technologies are presented, as well as their associated electric representation models, complete and simplified, so as to facilitate the analysis of diagnostic methods. Surge arrester diagnostic methods are presented, both off-line and on-line, together with their potentialities and weak points, for SiC and ZnO arresters. The new diagnostic method proposed in this work is introduced next, based on monitoring of the arrester equivalent capacitance and equivalent resistance, followed by simulations of the several possible defect types in SiC and ZnO devices. The measured parameters affected by each defect type are checked in order to establish the effectiveness of the new monitoring method for the detection of arrester problems. A method for making the monitoring of equivalent capacitance and resistance is also presented, by using the vector sum of leakage currents technique, largely used for monitoring of capacitive bushings in power transformers and other equipment. Finally, the results expected with the new monitoring method and suggestions for future work are presented.

Keywords: Surge arresters, Real time diagnostic, On-line monitoring, Vector sum of currents.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da construção de um para-raio de SiC. Fonte: (6).....	25
Figura 2 – Representação esquemática da construção de um para-raio de ZnO. Fonte: (8), adaptada.....	28
Figura 3 – Curva tensão-corrente resistiva típica de um para-raio de ZnO de 420 kV. Fonte: (8), adaptada.....	28
Figura 4 – Modelo elétrico representando um para-raio de SiC em regime permanente	31
Figura 5 – Modelo elétrico simplificado de um para-raio de SiC em regime permanente	32
Figura 6 – Modelo elétrico reduzido de um para-raio de SiC em regime permanente	32
Figura 7 – Modelo elétrico representando um para-raio de ZnO em regime permanente	35
Figura 8 – Modelo elétrico reduzido de um para-raio de ZnO em regime permanente	36
Figura 9 – Princípio de operação do sensor de temperatura passivo. Fonte: (35), adaptada	41
Figura 10 – Corrente de fuga resistiva em relação à tensão nos terminais de um para-raio. Fonte: (13), adaptada.	43
Figura 11 – Erro na avaliação da corrente de fuga resistiva devido a harmônicos na tensão do sistema. Fonte: (13), adaptada.	46
Figura 12 – Modelos elétricos de um para-raio de SiC em regime permanente. (a) Modelo simplificado; (b) Modelo reduzido.	56
Figura 13 – Configuração interna dos para-raios do fabricante B. (a) Conjuntos de centelhadores e blocos de SiC em série; (b) Detalhe de um conjunto de centelhadores. Fonte: (6).....	58
Figura 14 – Modelo elétrico dos para-raios de SiC do fabricante B ensaiados na referência (6).	59

Figura 15 – Suporte do resistor de equalização quebrado encontrado durante inspeção interna do para-raio B3. Fonte: (6).....	60
Figura 16 – Conjuntos de centelhadores quebrados encontrado durante inspeção interna do para-raio B5. Fonte: (6).....	60
Figura 17 – Para-raio de SiC do fabricante B (6) com um resistor de equalização desconectado	61
Figura 18 – Curva V-I dos resistores de equalização 1, 5 e 6 do para-raio B5. Fonte: (6).....	63
Figura 19 – Modelos elétricos de um para-raio de ZnO em regime permanente. (a) Modelo completo; (b) Modelo reduzido.	70
Figura 20 – Alteração da curva V-I de para-raios de ZnO. Fonte: (27).....	71
Figura 21 – Tangente Delta dos blocos de ZnO.....	74
Figura 22 – Alteração na região linear da curva V-I de para-raios de ZnO após estresse. Fonte: (37)	79
Figura 23 – Correntes de fuga capacitiva e resistiva em um para-raio energizado....	83
Figura 24 – Correntes de fuga de três para-raios em um sistema trifásico e sua somatória. (a) Para uma dada condição inicial; (b) com alteração na capacitância e resistência equivalentes do para-raio da fase A.....	84
Figura 25 – Correntes de fuga totais e corrente somatória para a condição inicial (vermelho) e após redução da resistência equivalente do para-raio da fase C...	92
Figura 26 – Detalhe ampliado da variação na corrente somatória devido à redução da resistência equivalente do para-raio da fase C	93
Figura 27 – Tensões fase-terra, correntes de fuga totais e somatória para a condição inicial (vermelho) e após desconexão de um, dois ou três resistores de equalização na fase A.....	101
Figura 28 – Detalhes da variação na corrente somatória devido às alterações da resistência equivalente do para-raio da fase A.....	101
Figura 29 – Tensões fase-terra, correntes de fuga totais e corrente somatória para a condição inicial (vermelho) e após alteração de 40 % e 80 % em um resistor de equalização no para-raio da fase C	106

Figura 30 – Detalhes da variação na corrente somatória devido às alterações no resistor de equalização do para-raio da fase C	107
Figura 31 – Tensões fase-terra, correntes de fuga totais e corrente somatória para a condição inicial (vermelho) e após curto-circuito de um e dois centelhadores e alteração nos resistores de equalização no para-raio da fase B.....	113
Figura 32 – Detalhes da variação na corrente somatória devido às alterações da capacitância e resistência equivalentes do para-raio da fase B	114
Figura 33 – Tensões fase-terra, correntes de fuga totais e corrente somatória para a condição inicial (vermelho) e após redução de 20% na resistência equivalente do para-raio da fase C	118
Figura 34 – Detalhes da variação na corrente somatória devido à redução de 20% na resistência equivalente do para-raio da fase C	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros elétricos equivalentes para os para-raios de SiC ensaiados na referência (6)	34
Tabela 2 – Parâmetros elétricos equivalentes para o para-raio de ZnO ensaiado na referência (12)	37
Tabela 3 – Resultados de ensaios realizados nos para-raios de SiC de tensão nominal 85 kV, amostras A1 a A6. Fonte: (6)	50
Tabela 4 – Técnicas atuais de diagnóstico de para-raios de SiC e suas desvantagens	52
Tabela 5 – Técnicas atuais de diagnóstico de para-raios de ZnO e suas desvantagens	53
Tabela 6 – Parâmetros elétricos do modelo reduzido para os para-raios de SiC do fabricante B, amostras B1 a B6, ensaiados na referência (6).....	57
Tabela 7 – Parâmetros elétricos de para-raio de SiC do fabricante B (6) com simulação de desconexão de um, dois ou três resistores de equalização	62
Tabela 8 – Constantes para ajuste da equação (10) aos resistores não-lineares do para-raio B5 (6)	64
Tabela 9 – Parâmetros elétricos de para-raio de SiC do fabricante B (6) com simulação de alterações em um dos resistores de equalização	65
Tabela 10 – Parâmetros elétricos de para-raio de SiC do fabricante B (6) com simulação de curto-circuito de um ou dois conjuntos de centelhadores	66
Tabela 11 – Parâmetros elétricos de para-raio de SiC do fabricante B (6) com simulação de curto-circuito de dois conjuntos de centelhadores e três resistores de equalização alterados.....	66
Tabela 12 – Parâmetros elétricos de para-raio de SiC do fabricante B (6) com simulação de entrada de umidade	67
Tabela 13 – Parâmetros elétricos equivalentes para o para-raio de ZnO ensaiado na referência (12)	70
Tabela 14 – Parâmetros elétricos de para-raio de ZnO com simulações de alterações nos blocos não-lineares	72

Tabela 15 – Características dos blocos de ZnO usados nos ensaios da referência (37)	72
Tabela 16 – Estresses de degradação aplicados aos blocos de ZnO da referência (37)	73
Tabela 17 – Variação de capacitância e tangente delta do bloco 5 antes e após descarga na sua lateral (37).	74
Tabela 18 – Variação de capacitância e tangente delta do bloco 16 antes e após descarga na sua lateral (37).	75
Tabela 19 – Variação de capacitância e tangente delta do bloco 10 antes e após descarga na sua lateral (37).	76
Tabela 20 – Variação de capacitância e tangente delta do bloco 12 antes e após descarga na sua lateral (37).	76
Tabela 21 – Variações de capacitância dos blocos 6, 11, 13, 20, 29 e 30 após estresses (37).	77
Tabela 22 – Variações de tangente delta dos blocos 6, 11, 13, 20, 29 e 30 após estresses (37).	78
Tabela 23 – Variações na tensão residual dos blocos antes e após estresses (37).	80
Tabela 24 – Parâmetros elétricos de para-raio de ZnO com simulação de entrada de umidade	81
Tabela 25 – Parâmetros elétricos iniciais de para-raio de ZnO em bom estado utilizados para simulação	87
Tabela 26 – Características do sistema elétrico ao qual estão conectados os para-raios de ZnO para simulação	87
Tabela 27 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes das condições iniciais de simulação	89
Tabela 28 – Parâmetros elétricos dos para-raios considerando redução de 20% na resistência equivalente do para-raio da fase C	90
Tabela 29 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de redução de 20% na resistência do para-raio da fase C	91

Tabela 30 – Parâmetros elétricos iniciais de para-raio de SiC em bom estado utilizados para simulação	95
Tabela 31 – Características do sistema elétrico ao qual estão conectados os para-raios de SiC para simulação	96
Tabela 32 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes das condições iniciais de simulação	96
Tabela 33 – Parâmetros elétricos dos para-raios considerando desconexão de um, dois ou três resistores de equalização no para-raio da fase A	98
Tabela 34 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de desconexão de um resistor de equalização no para-raio da fase A	98
Tabela 35 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de desconexão de dois resistores de equalização no para-raio da fase A	99
Tabela 36 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de desconexão de três resistores de equalização no para-raio da fase A	99
Tabela 37 – Resultados das simulações de monitoração pela somatória de correntes para desconexão de um, dois ou três resistores de equalização no para-raio da fase A	102
Tabela 38 – Parâmetros elétricos dos para-raios considerando alterações de 40% e 80% em um resistor de equalização no para-raio da fase C.....	103
Tabela 39 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de alteração de 40% em um resistor de equalização no para-raio da fase C	104
Tabela 40 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de alteração de 80% em um resistor de equalização no para-raio da fase C	104
Tabela 41 – Resultados das simulações de monitoração de capacitância e resistência equivalentes pela somatória de correntes para alterações de 40% e 80% em um resistor de equalização no para-raio da fase C	108
Tabela 42 – Parâmetros elétricos dos para-raios considerando curto-circuito de um e dois centelhadores e alteração de três resistores de equalização no para-raio da fase B.....	110
Tabela 43 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de curto-circuito de um centelhador no para-raio da fase B	111

Tabela 44 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de curto-circuito de dois centelhadores no para-raio da fase B	111
Tabela 45 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de curto-circuito de dois centelhadores e alteração de três resistores de equalização no para-raio da fase B	112
Tabela 46 – Resultados das simulações de monitoração pela somatória de correntes para curto-circuito de um e dois centelhadores e alteração nos resistores de equalização no para-raio da fase B	115
Tabela 47 – Parâmetros elétricos dos para-raios considerando redução de 20% na resistência equivalente do para-raio da fase C devido à entrada de umidade ..	116
Tabela 48 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de redução de 20% na resistência equivalente do para-raio da fase C	117
Tabela 49 – Resultados das simulações de monitoração de capacitância e resistência equivalentes pela somatória de correntes para redução de 20% na resistência equivalente do para-raio da fase C	119
Tabela 50 – Tipos de defeitos em para-raios de SiC detectáveis pela técnica de monitoração proposta	121
Tabela 51 – Tipos de defeitos em para-raios de ZnO detectáveis pela técnica de monitoração proposta	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEP	- Sistema Elétrico de Potência
SiC	- Carboneto de Silício
ZnO	- Óxido de Zinco
FRP	- Fiber Glass Reinforced Fiber
MCOV	- Maximum Continuous Operating Voltage
IEC	- International Electrotechnical Commission
IEEE	- The Institute of Electrical and Electronic Engineers
V-I	- Tensão-corrente
SAW	- Surface Acoustic Wave
NCO	- Numerically Controlled Oscillator
DSP	- Digital Signal Processor
PC	- Personal Computer
RIV	- Radio Interference Voltage
EM	- Eletromagnético (a)
TP	- Transformador de Potencial
RMS	- Root Mean Square

LISTA DE SÍMBOLOS

U_r	- Tensão nominal de pico de um para-raio, conforme a IEC 60099-4, suportada pelo mesmo por tempo limitado, geralmente 10 segundos
U_c	- Máxima tensão de operação contínua de um para-raio, conforme a IEC 60099-4
U_{pico}	- Tensão de pico
C_{SGi}	- Capacitância do conjunto de centelhadores “i”, com i de 1 a n;
R_{EQi}	- Resistor de equalização do conjunto de centelhadores “i”, i de 1 a n;
L_{AUX}	- Bobina auxiliar de interrupção de arco;
C_{SGaux}	- Capacitância do centelhador auxiliar em paralelo com a bobina auxiliar de interrupção de arco;
R_{Bj}	- Resistência do bloco de SiC ou ZnO “j”
C_{Bj}	- Capacitância do bloco de SiC ou ZnO “j”
C_{SG}	- Capacitância equivalente do para-raio de SiC
R_{EQ}	- Resistência equivalente do para-raio de SiC
C_B	- Capacitância equivalente do para-raio de ZnO
R_B	- Resistência equivalente do para-raio de ZnO
I_F	- Corrente de fuga do para-raio
θ	- Ângulo de defasagem medido da corrente de fuga I_F em relação à tensão V
ω	- Frequência angular
k	- constante, determinada pela geometria (comprimento e área) do resistor de equalização
n	- constante que expressa o grau de não linearidade do resistor de equalização, determinada pelas características do seu material
I_R	- Componente resistiva da corrente de fuga I_F
I_C	- Componente capacitiva da corrente de fuga I_F
I_a	- Corrente de fuga do para-raio da fase A
I_b	- Corrente de fuga do para-raio da fase B
I_c	- Corrente de fuga do para-raio da fase C
I_{soma}	- Somatória das correntes de fuga dos para-raios das fases A, B e C

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
LISTA DE SÍMBOLOS	16
SUMÁRIO	17
1. INTRODUÇÃO	20
1.1. O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA (SEP)	20
1.2. OS PARA-RAIOS NO SEP	21
1.3. DIAGNÓSTICO DE ESTADO DOS PARA-RAIOS	21
1.4. OBJETIVO E ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2. FORMA CONSTRUTIVA DOS PARA-RAIOS	24
2.1. PARA-RAIOS DE CARBONETO DE SILÍCIO	24
2.2. PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO	26
3. MODELOS ELÉTRICOS DOS PARA-RAIOS	30
3.1. PARA-RAIOS DE CARBONETO DE SILÍCIO	30
3.2. PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO	34
4. MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO ATUAIS	37
4.1. PARA-RAIOS DE CARBONETO DE SILÍCIO	37
4.2. PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO	38
4.3. CARACTERÍSTICAS DOS MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO ATUAIS	38
4.3.1. TÉCNICAS NÃO APLICÁVEIS DURANTE A OPERAÇÃO NORMAL	38
4.3.2. TENSÃO DE RÁDIO-INTERFERÊNCIA E DESCARGAS PARCIAIS	39
4.3.3. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR TERMOVISÃO	39
4.3.4. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA INTERNA POR SENSORES PASSIVOS	40
4.3.5. CORRENTE DE FUGA TOTAL	41
4.3.6. CORRENTE DE FUGA RESISTIVA	42
4.3.6.1. MÉTODO DE MEDIÇÃO A1	42

4.3.6.2.	MÉTODO DE MEDIÇÃO A2.....	43
4.3.6.3.	MÉTODO DE MEDIÇÃO A3.....	43
4.3.6.4.	MÉTODO DE MEDIÇÃO B3.....	44
4.3.6.5.	MÉTODO DE MEDIÇÃO C.....	44
4.3.7.	TERCEIRA HARMÔNICA DA CORRENTE DE FUGA.....	44
4.3.7.1.	MÉTODO DE MEDIÇÃO B1.....	45
4.3.7.2.	MÉTODO DE MEDIÇÃO B2.....	46
4.3.7.3.	MÉTODO DE MEDIÇÃO A4.....	46
4.3.7.4.	LIMITAÇÕES DA MONITORAÇÃO POR MEDIÇÃO DE 3º HARMÔNICO	47
5.	NOVO MÉTODO DE DIAGNÓSTICO PROPOSTO	51
5.1.	LIMITAÇÕES DOS MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO ATUAIS	51
5.2.	CARACTERÍSTICAS DESEJÁVEIS DO NOVO MÉTODO.....	54
5.3.	MONITORAÇÃO DE CAPACITÂNCIA E RESISTÊNCIA EQUIVALENTES.....	54
5.3.1.	CAPACITÂNCIA E RESISTÊNCIA EQUIVALENTES DE PARA- RAIOS DE SIC	55
5.3.1.1.	DESCONEXÃO DE RESISTORES DE EQUALIZAÇÃO.....	60
5.3.1.2.	RESISTORES DE EQUALIZAÇÃO ALTERADOS	62
5.3.1.3.	MÓDULO CENTELHADOR EM CURTO-CIRCUITO.....	65
5.3.1.4.	ENTRADA DE UMIDADE	67
5.3.1.5.	BLOCOS DE SIC OU OUTROS COMPONENTES DESCONECTADOS	68
5.3.1.6.	ALTERAÇÕES NOS BLOCOS DE SIC	68
5.3.2.	CAPACITÂNCIA E RESISTÊNCIA EQUIVALENTES DE PARA- RAIOS DE ZNO	69
5.3.2.1.	BLOCOS DE ZNO ALTERADOS.....	71
5.3.2.2.	ENTRADA DE UMIDADE	80
5.3.2.3.	BLOCOS DE ZNO OU OUTROS COMPONENTES DESCONECTADOS	81
6.	MÉTODO DE MONITORAÇÃO EM TEMPO REAL	82
6.1.	LIMITAÇÕES PARA MEDIÇÃO DE TENSÃO	82

6.2.	SOMA VETORIAL DAS CORRENTES DE FUGA.....	83
6.3.	SIMULAÇÕES DE MEDIÇÕES POR SOMA VETORIAL EM PARA- RAIOS ZNO.....	86
6.3.1.	CONDIÇÕES INICIAIS DA SIMULAÇÃO	86
6.3.2.	SIMULAÇÃO 1 – BLOCOS DE ZNO ALTERADOS OU ENTRADA DE UMIDADE	90
6.4.	SIMULAÇÕES DE MEDIÇÕES POR SOMA VETORIAL EM PARA- RAIOS SIC.....	94
6.4.1.	CONDIÇÕES INICIAIS DA SIMULAÇÃO	94
6.4.2.	SIMULAÇÃO 1 – DESCONEXÃO DE RESISTORES DE EQUALIZAÇÃO	97
6.4.3.	SIMULAÇÃO 2 – RESISTORES DE EQUALIZAÇÃO ALTERADOS	102
6.4.4.	SIMULAÇÃO 3 – MÓDULO CENTELHADOR EM CURTO- CIRCUITO	109
6.4.5.	SIMULAÇÃO 4 – ENTRADA DE UMIDADE.....	116
7.	RESULTADOS ESPERADOS COM O NOVO MÉTODO.....	121
8.	CONCLUSÕES	123
9.	TRABALHOS FUTUROS.....	124
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125

1. INTRODUÇÃO

1.1. O Sistema Elétrico de Potência (SEP)

Na sociedade atual, o uso da energia elétrica tornou-se universal para o desempenho das mais variadas tarefas, muitas de grande importância e responsabilidade, como hospitais, sinalização de trânsito e outras, incorporando-se e moldando o estilo de vida de praticamente todas as pessoas. Com isso, o fornecimento de energia elétrica tornou-se um serviço essencial, para o qual é exigida cada vez maior confiabilidade e continuidade.

A importância desse papel desempenhado pelo fornecimento de energia elétrica tende a aumentar ainda mais com a evolução da tecnologia, com a ampla tendência de incorporação de equipamentos eletrônicos ao dia a dia de todas as atividades humanas e, talvez o fator mais preponderante, a chegada ao mercado dos veículos elétricos, considerada por muitos inevitável devido à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa para mitigação do aquecimento global, em grande parte de responsabilidade dos motores de combustão interna.

Dessa forma, é antevista a migração de uma porção substancial da energia utilizada nos transportes da fonte primária (petróleo) para a secundária (eletricidade), causando aumento substancial no consumo de energia elétrica, acompanhado de importantes benefícios para a sociedade.

Para possibilitar o fornecimento de energia elétrica, toda uma cadeia de instalações e equipamentos é necessária, denominada Sistema Elétrico de Potência (SEP), que pode ser subdividida nas etapas de Geração, Transmissão e Distribuição de energia. Em cada uma dessas etapas, diversos equipamentos elétricos de alta tensão são necessários, tais como geradores, transformadores de potência, disjuntores, seccionadores, transformadores de medição e para-raios, cuja confiabilidade impacta diretamente na confiabilidade do SEP e na continuidade do fornecimento de energia elétrica.

No contexto apresentado acima, a confiabilidade e continuidade do Sistema Elétrico de Potência, que já é extremamente necessária atualmente, deverá aumentar ainda mais, demandando com isso a maior confiabilidade dos equipamentos de alta tensão que o compõe.

Assim, os benefícios esperados do aumento no uso da energia elétrica trazem consigo, como é natural, novos desafios, dentre os quais está o aumento da confiabilidade dos equipamentos.

1.2. Os Para-raios no SEP

Os Para-raios figuram dentre os principais equipamentos de alta tensão empregados no Sistema Elétrico de Potência, com a função de proteger os demais equipamentos das sobretensões do sistema (1), que podem ser ocasionadas por descargas atmosféricas ou pelas próprias manobras realizadas no sistema – por exemplo, energização e desenergização de transformadores e reatores.

Sem os para-raios, as sobretensões que ultrapassassem os limites de suportabilidade dos equipamentos causariam o rompimento de seus dielétricos, levando à perda de equipamentos de alto custo e essenciais para o fornecimento de energia (1), além de trazer os riscos de ferimentos e morte, de contaminação ambiental e de danos às instalações quando da falha da isolação dos equipamentos, freqüentemente seguida de explosão e incêndio.

Portanto, apesar de desempenhar uma função que poderia ser considerada auxiliar para o SEP, a correta operação dos para-raios mostra-se essencial para a segurança e confiabilidade deste (2).

Por outro lado, justamente por absorverem e dissiparem o excesso de energia das sobretensões, os para-raios estão sujeitos a degradação ao longo dos anos, além da ação de fatores ambientais como sol, chuva e poluição, que podem levar a contaminações internas (3).

Com isso, seu desempenho pode reduzir-se gradualmente ao longo do tempo, até o ponto em que não seja mais capaz de absorver a energia de uma sobretensão, chegando a explodir, ou ainda pior, deixando de proteger os demais equipamentos e a instalação.

1.3. Diagnóstico de estado dos Para-raios

O diagnóstico do estado atual dos para-raios é essencial para evitar os riscos expostos, de forma a detectar quando se aproxima o seu fim de vida útil, devido aos estresses normais durante a operação, assim como a deterioração precoce causada por contaminações.

Além de evitar as falhas inesperadas de para-raios e dos equipamentos por eles protegidos, o diagnóstico dos para-raios é útil também do ponto de vista de gerenciamento dos ativos das concessionárias de energia elétrica, dado o grande número de para-raios instalados nessas empresas com muitos anos de operação. É esperado que muitos deles necessitem substituição, porém a substituição de todos é inviável dos pontos de vista logístico e econômico. Nesse

contexto, o diagnóstico preciso do estado desses equipamentos permite priorizar as substituições mais urgentes e evitar o desperdício de tempo e recursos em para-raios que ainda estejam em condições de operação.

Outro fator a ser levado em consideração são as mudanças de regulamentação e ambiente competitivo em que operam as concessionárias de energia elétrica. O uso de técnicas de diagnóstico que requeiram o desligamento dos para-raios para realização de ensaios torna-se cada vez mais difícil, devido às pesadas penalidades por indisponibilidade dos equipamentos no sistema elétrico. Ademais, a redução da mão-de-obra nas empresas pode inviabilizar até mesmo a aplicação de técnicas de diagnóstico que ocupe a mão-de-obra disponível, ainda que não exijam o desligamento dos para-raios.

Com isso, novas técnicas de diagnóstico em serviço e em tempo real do estado dos para-raios, que dispensem desligamento do equipamento e o uso de mão-de-obra, se mostram necessárias, de forma a reduzir o risco de falhas, elevar a confiabilidade do sistema, reduzir o risco de interrupções no fornecimento de energia, ao mesmo tempo em que se reduzam os custos de operação e manutenção das empresas, além de permitir o melhor gerenciamento dos ativos até seu fim de vida útil e a migração da manutenção preventiva (baseada no tempo) para a preditiva (baseada no estado).

1.4. Objetivo e estrutura do trabalho

Dadas as necessidades expostas para o diagnóstico contínuo do estado dos para-raios no Sistema Elétrico de Potência, este trabalho tem por objetivo propor uma nova técnica de diagnóstico, baseada na monitoração em tempo real da capacitância e resistência elétrica do para-raios. Para tal, os seguintes tópicos serão apresentados:

- Detalhamento da forma construtiva dos para-raios com tecnologias Carboneto de Silício (SiC) e Óxido de Zinco (ZnO), no capítulo 2;
- Modelamento elétrico dos para-raios com tecnologias SiC e ZnO, no capítulo 3;
- Resumo dos métodos atuais de diagnóstico, apontando suas potencialidades e limitações, no capítulo 4;
- Proposição de um novo método de diagnóstico e simulação de seu desempenho em condições hipotéticas de defeitos, com base nos modelos elétricos dos para-raios, bem como comparação de resultados do método com dados reais de medições obtidos na literatura, no capítulo 5;

- Apresentação de uma técnica para permitir a utilização do novo método de diagnóstico em tempo real e simulação de seu funcionamento usando as mesmas simulações de defeitos do item anterior, no capítulo 6;
- Apresentação dos resultados esperados com o novo método e conclusões, nos capítulos 7 e 8;
- Propostas de trabalhos futuros, no capítulo 9.

2. FORMA CONSTRUTIVA DOS PARA-RAIOS

No parque de para-raios instalados atualmente no Sistema Elétrico de Potência, duas tecnologias são encontradas: Carboneto de Silício (SiC), que deixou de ser fabricada há várias décadas, e Óxido de Zinco (ZnO), que responde pela totalidade dos para-raios fabricados atualmente.

Apesar disso, uma grande quantidade de para-raios de SiC encontra-se ainda em operação, pois sua substituição tem sido gradativa. Dessa forma, é desejável que o método de diagnóstico de para-raios seja aplicável a ambas as tecnologias, facilitando até mesmo a definição dos para-raios de SiC que devem ter prioridade na substituição.

A seguir são descritos a forma construtiva e o princípio de operação de cada uma dessas tecnologias.

2.1. Para-raios de Carboneto de Silício

Os para-raios de carboneto de silício foram criados na década de 1930 para substituir os centelhadores (*spark gaps*) simples e centelhadores associados a elementos não lineares eletroquímicos que vinham sendo utilizados desde os primórdios da distribuição de energia elétrica, nos anos 1900 (4).

A construção básica de um para-raio de carboneto de silício (5) consiste em diversos centelhadores conectados em série com os blocos de carboneto de silício (SiC), como mostra esquematicamente a Figura 1 a seguir, obtida da referência (6).

Figura 1 – Representação esquemática da construção de um para-raio de SiC. Fonte: (6)

Nessa construção, os blocos de carboneto de silício atuam como resistores não lineares, que reduzem sua resistência à medida que aumenta a tensão. Apesar dessa característica, quando submetidos à tensão nominal do sistema os blocos de SiC não tem resistência alta o suficiente (da ordem de milhares de ohms, segundo (6)) para suportar essa tensão continuamente, o que causaria corrente de fuga demasiadamente elevada, destruindo os blocos pelo aquecimento. Assim, são os centelhadores que isolam a tensão normal de operação do sistema, atuando como um circuito aberto.

Quando da ocorrência de uma sobretensão, a isolamento dos centelhadores é rompida e estes se comportam quase como um curto-circuito (6). Com isso, os blocos de SiC são submetidos à sobretensão, o que leva à redução de sua resistência, permitindo que corrente flua para a terra e que se dissipe assim a energia do surto, limitando dessa forma o valor da sobretensão.

Ao cessar a sobretensão, a resistência dos blocos de SiC tende a aumentar, reduzindo a corrente de descarga que passa pelo para-raio, o que auxilia na extinção do arco nos

centelhadores. Essa pode ser considerada a principal função dos blocos de SiC nesse tipo de para-raio (6).

Também contribui para o aumento da resistência dos blocos de SiC, depois de cessada a sobretensão, a introdução de um indutor em série com os centelhadores, na vizinhança desses. A passagem da corrente de descarga pelo indutor gera um campo magnético que interage com o campo magnético gerado pela corrente no arco, causando o deslocamento do arco para regiões mais exteriores dos centelhadores, mais frias, e aumentando seu comprimento. Isso aumenta a queda de tensão no arco, reduzindo a corrente de descarga, o que causa um aumento adicional na resistência dos blocos de SiC, reduzindo ainda mais a corrente de descarga. Esse conjunto de fenômenos contribui para a extinção do arco (6). Para evitar que o indutor provoque um atraso na operação do para-raio, é instalado em paralelo com este um centelhador auxiliar, que opera durante a variação rápida da corrente na frente de onda da sobretensão; a seguir, quando a taxa de variação da corrente diminui, essa é conduzida pelo indutor.

Em geral são utilizados diversos centelhadores em série, com a tensão fase-terra dividindo-se entre eles conforme determinado no projeto do para-raio. O desequilíbrio dessa divisão de tensão poderia levar à disrupção de alguns dos módulos com tensão fase-terra menor que a esperada, causando operações indevidas do para-raios. Esses desequilíbrios poderiam ser causados, por exemplo, por imprecisões dimensionais nos módulos de centelhadores e pelas capacitâncias parasitas de cada módulo centelhador para a linha e para terra. Para garantir a divisão de tensão esperada, resistores de equalização são conectados em paralelo com os centelhadores, principalmente nos para-raios de tensão mais elevada. Esses resistores, cada um com resistência da ordem de mega-ohms, formam um divisor de tensão que, corretamente dimensionado, permite melhor controle na distribuição do campo elétrico entre os centelhadores.

2.2. Para-raios de Óxido de Zinco

Os para-raios de óxido de zinco (ZnO) foram introduzidos no mercado em meados da década de 1970, trazendo significativas melhorias em relação à geração anterior, de carboneto de silício.

Por um lado, os para-raios de ZnO têm construção bem mais simples comparados aos de SiC, como ilustra esquematicamente a Figura 2 a seguir, pelo fato de não possuírem centelhadores, sendo os blocos de ZnO conectados diretamente à tensão fase-terra do sistema.

Os diversos blocos de ZnO são empilhados no interior do invólucro, sendo a quantidade determinada pelas características elétricas individuais dos blocos e pelas características desejadas para o para-raio. Espaçadores metálicos podem ser inseridos entre os blocos para completar a altura do invólucro, visto que em geral este é mais alto que os blocos devido à distância de escoamento elétrica necessária no exterior do equipamento. Os espaçadores também desempenham a função auxiliar de dissipação rápida do calor gerado nos blocos após uma operação do para-raio.

O conjunto formado pelos blocos e espaçadores é mantido sob pressão axial pela mola na extremidade do conjunto. Hastes de FRP (*Fiberglass Reinforced Plastic*), suportadas por placas horizontais também de FRP, evitam o deslocamento radial dos blocos, mantendo-os centralizados no invólucro.

O interior do invólucro é mantido livre de umidade e contaminantes por um diafragma metálico aplicado sobre um anel de vedação, sendo a fixação do conjunto obtida com uma junta de cimento. O diafragma possui espessura muito pequena, da ordem de décimos de milímetro, de forma a romper-se intencionalmente em caso de falha do para-raio, devido a uma descarga de energia superior à suportada pelos blocos de ZnO, evitando assim que se produza uma sobrepressão interna capaz de romper a porcelana e lançar cacos que podem causar ferimentos e danificar outros equipamentos.

O invólucro pode ser de porcelana, como mostrado na Figura 2 a seguir, ou de material polimérico, geralmente silicone, aplicado sobre uma estrutura isolante oca de FRP que garante sua rigidez mecânica.

Figura 2 – Representação esquemática da construção de um para-raio de ZnO. Fonte: (8), adaptada

A conexão direta dos blocos à tensão do sistema, sem o uso de centelhadores, é possível devido à curva tensão-corrente dos blocos de ZnO ser extremamente não linear, como pode ser visto na figura 3, que mostra apenas a parcela resistiva da corrente de fuga, responsável pelo aquecimento do para-raio – a parcela capacitiva, bem maior que a resistiva (13), não é mostrada na figura.

Figura 3 – Curva tensão-corrente resistiva típica de um para-raio de ZnO de 420 kV. Fonte: (8), adaptada

A grande não linearidade dessa curva pode ser verificada inspecionando-se alguns de seus pontos chave, como descrito a seguir.

À tensão nominal do sistema, o pico da tensão é dado por:

$$U_{pico} = \sqrt{2} . 420 \text{ kV} / \sqrt{3} \approx 343 \text{ kV}$$

Quando submetido a essa tensão, a corrente de fuga resistiva do para-raio é de apenas 100 μA .

A máxima tensão de operação contínua do para-raio, denominada U_c pela norma IEC 60099-4 (9) e MCOV (*Maximum Continuous Operating Voltage*) pela norma IEEE Std C62.11-2005 (10), é a máxima tensão em frequência industrial na qual o para-raio pode operar continuamente sem qualquer restrição. No exemplo da Figura 3, U_c é igual a 268 kV rms ou 379 kV de pico; nesse ponto de operação, a corrente de fuga resistiva é ainda inferior a 200 μA .

Quando submetido à sua tensão nominal U_r , no exemplo 475 kV de pico (cerca de 25% acima da tensão de operação contínua), a corrente atinge 1mA. Por norma, o para-raio deve suportar essa tensão por pelo menos 10 segundos, embora alguns fabricantes garantam tempos maiores, de forma a garantir que o mesmo não se danifique por sobretensões de relativamente longa duração à frequência industrial – para as quais o para-raio não efetua função de proteção.

A partir desse ponto, pequenos aumentos da tensão aplicada ao para-raio causam grandes aumentos da corrente. Na curva da Figura 3 podemos observar o Nível de Proteção a Impulso atmosférico, que é a máxima queda de tensão sobre o para-raio quando a corrente atinge seu valor nominal de descarga – no exemplo, um máximo de 823 kV de pico com o pico de corrente de descarga de 10 kA.

Podemos observar que um aumento de aproximadamente 140% da tensão (de 343 kV para 823 kV) aumenta a corrente de fuga em 8 ordens de grandeza (de 100 μA para 10 kA), demonstrando claramente a não linearidade dos blocos de ZnO, que foi o que viabilizou o desenvolvimento de para-raios sem centelhadores.

3. MODELOS ELÉTRICOS DOS PARA-RAIOS

As construções mecânicas dos para-raios de carboneto de silício e óxido de zinco, mostradas no Capítulo 2, podem ser representadas por modelos elétricos com o objetivo de facilitar o desenvolvimento e testes de métodos de diagnóstico.

Com esse objetivo em mente, os modelos aqui propostos se limitam à condição de operação em regime permanente, à frequência industrial, que é a condição em que os para-raios operam praticamente todo o tempo e durante a qual se deseja monitorá-los para diagnosticar seu estado. Portanto, os modelos elétricos aqui propostos não levam em consideração as condições transitórias e fenômenos de alta frequência que ocorrem durante a operação dos para-raios.

3.1. Para-raios de Carboneto de Silício

A construção dos para-raios de SiC, descrita no Capítulo 2.1, pode ser representada eletricamente da forma mostrada na Figura 4 a seguir, que busca contemplar inicialmente todos os elementos constituintes do equipamento, como descrito a seguir.

Os elementos representados na Figura 4 são os seguintes, onde “n” é o número total de conjuntos de centelhadores e “m” é o número total de blocos de carboneto de silício:

- C_{SGi} - Capacitância do conjunto de centelhadores “i”, com i de 1 a n;
- R_{EQi} - Resistor de equalização do conjunto de centelhadores “i”, i de 1 a n;
- L_{AUX} - Bobina auxiliar de interrupção de arco;
- C_{SGaux} - Capacitância do centelhador auxiliar em paralelo com a bobina auxiliar de interrupção de arco;
- R_{Bj} - Resistência do bloco de carboneto de silício “j”, com j de 1 a m;
- C_{Bj} - Capacitância do bloco de carboneto de silício “j”, com j de 1 a m.

Figura 4 – Modelo elétrico representando um para-raio de SiC em regime permanente

Algumas simplificações podem ser adotadas para o modelo elétrico da Figura 4, considerando os seguintes fatores:

- A indutância de L_{AUX} é relativamente baixa, de forma que em baixa frequência, como é o caso da frequência industrial, sua reatância indutiva é praticamente nula. Portanto, a bobina L_{AUX} pode ser considerada um curto-circuito, eliminando também a capacitância do centelhador auxiliar C_{SGaux} ;
- A resistência dos blocos de carboneto de silício, R_{Bj} , é da ordem de alguns kilohms, muito menor, portanto, que a reatância capacitiva desses mesmos blocos, correspondente a C_{Bj} . Portanto, as capacitâncias C_{Bj} podem ser desprezadas;

- A resistência dos blocos de carboneto de silício, R_{Bj} , é da ordem de alguns kilohms, muito menor, portanto, que os resistores de equalização dos centelhadores R_{EQi} . Portanto, as resistências dos blocos de carboneto de silício R_{Bj} podem ser desprezadas.

Com esses pressupostos, o modelo elétrico simplificado mostrado na Figura 5 abaixo pode ser adotado para os para-raios de SiC à frequência industrial em regime permanente.

Figura 5 – Modelo elétrico simplificado de um para-raio de SiC em regime permanente

Simplificando ainda mais, o para-raio de SiC pode ser representado por apenas uma capacitância equivalente, C_{SG} , em paralelo com uma resistência equivalente, R_{EQ} , como mostra o modelo reduzido da Figura 6 abaixo.

Figura 6 – Modelo elétrico reduzido de um para-raio de SiC em regime permanente

Esta representação, simplificada ao máximo, é particularmente útil quando se deseja obter os parâmetros do modelo a partir de medições realizadas, sem conhecimento prévio de detalhes da construção do para-raio (número de módulos centelhadores e resistores de equalização), como é o caso do exemplo a seguir. A capacitância equivalente é calculada pela equação (4), e a resistência equivalente pela equação (6).

$$C_{sg} = \frac{I_f \cdot \sin(\theta)}{U \cdot \omega} \quad (4)$$

Onde: C_{sg} é a capacitância equivalente do para-raio de SiC;
 I_f é a corrente de fuga medida;
 θ é o ângulo de defasagem medido da corrente de fuga I_f em relação à tensão U ;
 U é a tensão aplicada entre os terminais do para-raio;
 ω é a frequência angular da tensão U .

e,

$$R_{eq} = \frac{U}{I_f \cdot \cos(\theta)} \quad (6)$$

Onde: R_{eq} é a resistência equivalente do para-raio de SiC;
 U é a tensão aplicada entre os terminais do para-raio;
 I_f é a corrente de fuga medida;
 θ é o ângulo de defasagem medido da corrente de fuga I_f em relação à tensão U .

Dados de ensaios em para-raios de SiC de classes de tensão 88 kV e 138 kV, disponíveis em (6) e (7), nos permitem obter uma ordem de grandeza dos parâmetros do modelo simplificado.

Nos para-raios de 88 kV foi aplicada tensão fase-terra de 51 kV e medida a corrente de fuga, assim como seu ângulo de defasagem em relação à tensão aplicada. Tomando como exemplo o para-raio denominado pelo autor como amostra A2, foi medida corrente de fuga de 0,147 mA adiantada 65 graus em relação à tensão (6).

Já nos para-raios de 138 kV foi aplicada tensão fase-terra de 80 kV e foram medidos, tomando a amostra denominada B1, corrente de fuga de 0,293 mA adiantada 73 graus em relação à tensão (6).

Dessa forma, os valores calculados para os parâmetros elétricos equivalentes desses dois para-raios são os indicados na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 – Parâmetros elétricos equivalentes para os para-raios de SiC ensaiados na referência (6)

	Para-raio de 88 kV	Para-raio de 138 kV
C_{SG}	6,9 pF	9,3 pF
R_{EQ}	821 MΩ	934 MΩ

3.2. Para-raios de Óxido de Zinco

A construção dos para-raios de óxido de zinco, descrita no Capítulo 2.2, pode ser representada eletricamente, em regime permanente, da forma mostrada na Figura 7 abaixo, como descrito a seguir (11).

Figura 7 – Modelo elétrico representando um para-raio de ZnO em regime permanente

Os elementos representados na Figura 7 são os seguintes, onde “m” é o número total de blocos de óxido de zinco:

- R_{Bj} – Resistência do bloco de óxido de zinco “j”, com j variando de 1 a m;
- C_{Bj} – Capacitância do bloco de óxido de zinco “j”, com j variando de 1 a m.

Dada a simplicidade construtiva dos para-raios de óxido de zinco, não há pressupostos que possam ser aplicados para eliminar elementos do modelo da Figura 7. Observa-se grande similaridade com o modelo elétrico simplificado dos para-raios de SiC (Figura 5), com a importante diferença de que naquele caso os elementos elétricos do circuito referem-se aos centelhadores e seus resistores de equalização, enquanto que no modelo dos para-raios de ZnO os elementos elétricos estão associados aos blocos de resistores não-lineares.

O modelo da Figura 7 pode ser ainda reduzido, com o para-raio de ZnO representado por apenas uma capacitância equivalente, C_B , em paralelo com uma resistência equivalente, R_B , como mostra o modelo reduzido da Figura 8 abaixo.

Figura 8 – Modelo elétrico reduzido de um para-raio de ZnO em regime permanente

Assim como nos para-raios de SiC, esta representação reduzida é particularmente útil quando se deseja obter os parâmetros do modelo a partir de medições realizadas, sem conhecimento prévio de detalhes da construção do para-raio (número de blocos de ZnO em série), como é o caso do exemplo a seguir. A capacitância equivalente pode ser calculada pela equação (8), e a resistência equivalente pela equação (9), ambas a seguir.

$$C_B = \frac{I_f \cdot \sin(\theta)}{U \cdot \omega} \quad (8)$$

Onde: C_B é a capacitância equivalente do para-raio de ZnO;
 I_f é a corrente de fuga medida;
 θ é o ângulo de defasagem da corrente de fuga I_f em relação à tensão U ;
 U é a tensão aplicada entre os terminais do para-raio;
 ω é a frequência angular da tensão U .

e,

$$R_B = \frac{U}{I_f \cdot \cos(\theta)} \quad (9)$$

Onde: R_B é a resistência equivalente do para-raio de ZnO;
 U é a tensão aplicada entre os terminais do para-raio;
 I_f é a corrente de fuga medida;

θ é o ângulo de defasagem medido da corrente de fuga I_f em relação à tensão U .

Dados aproximados de medições de corrente de fuga em para-raios de ZnO de 266 kV, disponíveis em (12), nos permitem obter uma ordem de grandeza dos parâmetros do modelo simplificado.

A referência (12) não fornece os valores exatos das medições, por isso apenas valores aproximados foram obtidos a partir dos gráficos fornecidos. Além disso, a tensão fase-terra não foi informada, por isso foi considerado nos cálculos a tensão de 266 kV. Como o objetivo é apenas obter uma ordem de grandeza dos parâmetros elétricos, tais aproximações são aceitáveis. A corrente de fuga total foi da ordem de 1,6 mA e a corrente resistiva da ordem de 50 μ A (12).

Dessa forma, os valores calculados para os parâmetros elétricos equivalentes desse para-raio são os indicados na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Parâmetros elétricos equivalentes para o para-raio de ZnO ensaiado na referência (12)

Para-raio de 266 kV	
C_B	$\approx 15,9$ pF
R_B	≈ 5320 M Ω

4. MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO ATUAIS

Diversos métodos de diagnóstico do estado dos para-raios foram desenvolvidos ao longo do tempo, com diferentes graus de sucesso, tanto para os para-raios de carboneto de silício quanto para os de óxido de zinco. Um resumo dos mesmos é apresentado a seguir, para ambas as tecnologias.

4.1. Para-raios de Carboneto de Silício

As principais técnicas de diagnóstico empregadas ou estudadas para os para-raios de SiC, com base na literatura disponível, são:

- Tensão de rádio-interferência (6), (7), (14), (15), (16), (17);
- Descargas parciais (métodos elétricos e acústicos) (14), (17);
- Tensão residual à corrente de descarga nominal (14), (15);
- Tensão disruptiva à frequência industrial (6), (7), (14), (15), (16), (18), (19), (20);
- Tensão disruptiva em impulso (6), (7), (15), (18), (19), (20), (21);
- Perdas dielétricas (15), (16), (21);
- Resistência de isolamento (6), (7), (15), (16), (19);
- Medição de temperatura por termovisão (6), (7), (15), (16);
- Medição de corrente de fuga total (6), (7), (14), (15), (16);
- Medição de terceira harmônica da corrente de fuga (6), (7).

4.2. Para-raios de Óxido de Zinco

As principais técnicas de diagnóstico empregadas ou estudadas para os para-raios de ZnO, com base na literatura disponível, são:

- Descargas parciais (métodos elétricos e acústicos) (14), (21), (23);
- Determinação da tensão de referência (21), (27), (23);
- Levantamento da curva V-I (27), (23);
- Perdas dielétricas (13), (21);
- Medição de temperatura por termovisão (13), (21), (25);
- Medição de temperatura por sensores passivos (13), (26), (27);
- Medição de corrente de fuga resistiva (13), (27), (28), (29), (30);
- Medição de terceira harmônica da corrente de fuga (13), (22), (24), (25), (27), (31).

4.3. Características dos métodos de diagnóstico atuais

4.3.1. Técnicas não aplicáveis durante a operação normal

Diversas das técnicas acima citadas somente podem ser empregadas com o para-raio fora de serviço, desconectado da rede. Com isso, embora algumas delas tenham relativa eficácia na

detecção de defeitos, as mesmas não são adequadas para o objetivo desse trabalho, que é o diagnóstico em tempo real de estado do equipamento. São elas:

- Tensão residual à corrente de descarga nominal;
- Tensão disruptiva à frequência industrial;
- Tensão disruptiva em impulso;
- Perdas dielétricas;
- Resistência de isolamento.
- Determinação da tensão de referência;
- Levantamento da curva V-I;

4.3.2. Tensão de rádio-interferência e Descargas parciais

Por outro lado, algumas das técnicas restantes apresentam dificuldades práticas de utilização, apesar de, a princípio, serem aplicáveis durante a operação normal do para-raio, devido aos ruídos eletromagnéticos presentes em subestações de alta tensão. É o caso das medições de Tensão de rádio-interferência e Descargas parciais. Embora tais dificuldades não sejam exatamente insuperáveis – de fato, encontram-se em andamento diversas pesquisas nesse campo (32), (33) – esses obstáculos contribuem também para o aumento do custo de aplicação das técnicas citadas, o que pode ser um problema, considerando o baixo custo dos para-raios a serem monitorados.

4.3.3. Medição de temperatura por termovisão

A técnica de medição de temperatura por termovisão tem sido empregada de forma consistente para o diagnóstico de diversos equipamentos de alta tensão em subestações com a finalidade de localizar pontos com temperatura anormalmente elevada, com resultados em geral satisfatórios (34). A aplicação dessa técnica é realizada normalmente de forma relativa, comparando a temperatura do ponto mais quente com a temperatura de pontos adjacentes ou com a temperatura de outros equipamentos semelhantes nas proximidades. Dessa forma, uma anormalidade é detectada se um determinado ponto apresenta-se muito mais quente que os demais. A referência (41) estabelece uma diferença máxima de 5 °C, acima da qual o para-raios deve ser investigado por medição da corrente de fuga ou retirado de operação.

Embora essa técnica seja eficaz para a detecção de alguns tipos de defeito (6), (34), e deva ser empregada com o para-raio em operação normal, tem o inconveniente de não permitir a monitoração de forma contínua e nem automática, pois depende que um operador inspecione periodicamente os equipamentos com o termovisor, deixando assim de atender a uma das necessidades pressupostas neste trabalho. A título de exemplo, a referência (41) relata a realização de termovisão para diagnóstico de para-raios em operação com periodicidade de 3 a 6 meses.

Isso nos leva também a outra desvantagem dessa técnica, que é a necessidade de se garantir que as medições sejam efetuadas com procedimento uniforme para permitir a comparação de resultados, o acompanhamento da evolução das medições (16) e o correto diagnóstico do equipamento, visto que a queda acentuada de temperatura entre os blocos não-lineares e o exterior do invólucro do para-raio (13) torna muito sutis as diferenças de temperatura observadas entre um equipamento em bom estado e outro deteriorado, exceto em casos de deterioração já muito avançada. Dessa forma, o sucesso do diagnóstico por termovisão tem grande dependência do operador que realiza a leitura e interpreta os resultados.

4.3.4. Medição de temperatura interna por sensores passivos

Os diversos parâmetros que podem ser monitorados em um para-raios, como perdas dielétricas e corrente de fuga resistiva, causam alterações na temperatura interna do para-raio, sendo esse o princípio que suporta a medição de temperatura por termovisão, abordada acima (27).

O uso de sensores de temperatura internos ao para-raio busca vencer as limitações da termovisão, que são a grande queda de temperatura entre os pontos de aquecimento e a superfície externa do equipamento e o fato de não ser um método contínuo e automático.

Para tal são utilizados sensores de temperatura passivos, baseados em ondas acústicas de superfície (SAW, *Surface Acoustic Wave*), que tem dimensões reduzidas, não requerem alimentação para sua operação e transmitem a medição por ondas de rádio.

O princípio de operação desses sensores é ilustrado na Figura 9 a seguir. Um interrogador externo ao para-raio transmite ondas de rádio que são recebidas na antena do sensor e excitam um transdutor piezelétrico, que gera uma onda acústica que se propaga pela superfície do sensor. A frequência de ressonância dessa onda é determinada pelas características mecânicas

dessa superfície, que se alteram com a temperatura, devido à expansão e contração do material. Desse modo, a frequência da onda acústica de superfície é ditada pela temperatura a que a mesma está submetida. Durante sua propagação pelo sensor, a onda é refletida e retorna ao transdutor piezelétrico, que gera tensão consonante com a onda mecânica que o atingiu. Esse sinal é acoplado de volta à antena, que então retransmite ao interrogador externo um sinal de rádio que contém a informação da temperatura (27), (35).

Quando vários sensores desse tipo são utilizados simultaneamente, a informação dos vários sensores pode ser identificada por meio de reflexões intencionais na onda acústica, causadas por refletores posicionados ao longo da superfície, criando uma espécie de código que identifica o sensor que está enviando a informação.

Figura 9 – Princípio de operação do sensor de temperatura passivo. Fonte: (35), adaptada

A medição de temperatura por sensores passivos no interior do para-raio, apesar de ter sido reportada como eficaz, somente é aplicável a para-raios novos, pois a instalação dos sensores só pode ser efetuada durante a fabricação do equipamento. Portanto, não é aplicável ao grande número de para-raios já em operação em campo, tanto de SiC quanto de ZnO.

4.3.5. Corrente de fuga total

Não se observam alterações apreciáveis na componente capacitiva da corrente de fuga em alguns dos principais modos de falha dos para-raios (13), como é o caso de deterioração nos elementos não-lineares, deterioração dos resistores de equalização nos para-raios de SiC ou ingresso de umidade, por exemplo, sendo apenas a corrente resistiva afetada. Por outro lado, como já indicado no capítulo 3, a corrente de fuga dos para-raios é predominantemente

capacitiva, com a componente resistiva contribuindo com apenas 5 % a 20 % da corrente de fuga total (6), (13). Com isso, e considerando que a corrente de fuga total é a soma vetorial das componentes resistiva e capacitiva, defasadas 90° entre si, grandes alterações na corrente resistiva podem refletir-se em alterações muito pequenas na corrente total, impedindo a detecção de um defeito. Por esse motivo, a monitoração da corrente de fuga total dos para-raios é descartada como um meio eficaz de diagnosticar o estado do equipamento (13).

4.3.6. Corrente de fuga resistiva

As técnicas de diagnóstico que envolvem a medição da corrente de fuga resistiva, seja direta ou indiretamente (pela medição da 3ª harmônica da corrente de fuga, tratada no capítulo 4.3.7), são as que se mostram as mais promissoras, por permitirem a monitoração de estado do equipamento de forma contínua e em tempo real (13), (30), possibilitando ainda a utilização sem a dependência de operadores para a execução das medições.

Por esse motivo, são citadas na norma IEC 60099-5 (13) como a principal ferramenta de diagnóstico do estado de para-raios de ZnO. O capítulo 6 dessa norma nomeou os diversos métodos para monitoração da corrente de fuga resistiva como A1...A4, B1...B3 e C. Os métodos A1 a A3, B3 e C constituem formas de monitoração direta da corrente resistiva e são detalhados adiante.

Os demais métodos consistem em monitoração indireta da corrente resistiva, por meio da terceira harmônica da corrente de fuga, e são detalhados no capítulo 4.3.7.

4.3.6.1. Método de medição A1

Como indica a Figura 10 a seguir, no instante em que a taxa de variação da tensão é zero ($dU/dt = 0$), a componente capacitiva da corrente de fuga é também zero. Como nesse mesmo instante a tensão encontra-se no seu valor máximo (positivo ou negativo), a corrente de fuga medida nesse momento corresponde ao valor de pico da corrente resistiva.

Portanto, a componente resistiva da corrente de fuga pode ser conhecida, empregando a técnica acima descrita, desde que se efetuem simultaneamente as medições da tensão aplicada aos terminais do para-raio e da corrente de fuga total. Essa forma de monitoração da corrente de fuga resistiva é denominada na norma IEC 60099-5 (13) como o método de medição A1.

No entanto, a disponibilidade de um sinal correspondente à tensão aplicada aos terminais do para-raio raramente existe na prática, o que limita o amplo emprego do método A1 para a monitoração da corrente de fuga resistiva.

Figura 10 – Corrente de fuga resistiva em relação à tensão nos terminais de um para-raio.
Fonte: (13), adaptada.

4.3.6.2. Método de medição A2

A componente capacitiva da corrente de fuga pode ser eliminada da medição da corrente de fuga total se um sinal de corrente capacitiva, com a mesma fase e magnitude igual à da corrente capacitiva do para-raio, for subtraído da corrente de fuga total. Esse sinal de corrente capacitiva pode ser obtido com um capacitor de referência, com valor de capacitância igual à do para-raio, energizado com a mesma tensão aplicada ao para-raio.

Com isso, o método mostra-se viável para uso em laboratório, não sendo prático para aplicações em campo.

4.3.6.3. Método de medição A3

O método A3 da norma IEC 60099-5 é similar ao método A2 acima, com a diferença de que o sinal de corrente capacitiva a ser subtraído da corrente de fuga total é gerado artificialmente, de forma analógica (em hardware) ou digital (em software).

No entanto, o sinal de corrente capacitiva gerado deve possuir amplitude e ângulo de defasagem corretos para que o resultado da subtração corresponda à componente resistiva real da corrente de fuga. Para isso, esse sinal deve ser calibrado com dados específicos do bloco não-linear, que variam de acordo com o fabricante e método de produção utilizado.

Dessa forma, o método não se mostra prático para as aplicações, considerando a indisponibilidade desses dados para os múltiplos modelos, marcas e épocas de fabricação dos milhares de para-raios em operação nos sistemas elétricos.

4.3.6.4.Método de medição B3

O método B3 da norma IEC 60099-5 é similar ao método A1 acima, com a diferença de que os sinais de corrente de fuga total e tensão aplicada ao para-raios são processados para extração apenas da sua componente fundamental, eliminando-se todos os harmônicos.

Portanto, esse método padece da mesma fragilidade do método A1, que é a indisponibilidade de um sinal correspondente à tensão aplicada aos terminais do para-raio, o que limita o seu amplo emprego para a monitoração da corrente de fuga resistiva.

4.3.6.5.Método de medição C

O método C consiste no cálculo das perdas dielétricas do para-raio, em Watts, que são diretamente proporcionais à corrente de fuga resistiva. Isso é efetuado pela integração no tempo do produto da tensão aplicada ao para-raio e corrente de fuga total.

Portanto, esse método padece da mesma fragilidade do método A1, que é a indisponibilidade de um sinal correspondente à tensão aplicada aos terminais do para-raio, o que limita o seu amplo emprego para a monitoração da corrente de fuga resistiva.

4.3.7. Terceira harmônica da corrente de fuga

Se a tensão aplicada aos terminais do para-raio for livre de frequências harmônicas, a parcela capacitiva da corrente de fuga apresentaria apenas componentes na frequência fundamental. Já a parcela resistiva da corrente de fuga apresentará componentes harmônicos de diversas ordens, apesar de não existirem harmônicos na tensão, devido à não-linearidade da isolação.

Partindo dos pressupostos acima, a totalidade das componentes harmônicas da corrente de fuga é de natureza resistiva. Se for considerado ainda o pressuposto de que existe uma proporcionalidade entre a totalidade da corrente de fuga resistiva e suas componentes harmônicas, a medição das componentes harmônicas da corrente de fuga fornece um bom indicador da corrente resistiva do para-raio.

A componente harmônica predominante na corrente de fuga dos para-raios é a de terceira ordem, de forma que esta, em geral, é a única componente utilizada para monitoração, desprezando-se as demais.

Os métodos A4, B1 e B2 do capítulo 6 da norma IEC 60099-5 (13) empregam a medição de terceira harmônica da corrente de fuga para a monitoração indireta da corrente resistiva, conforme detalhado a seguir.

4.3.7.1.Método de medição B1

O método de medição B1 parte do pressuposto de que todos os componentes harmônicos presentes na corrente de fuga total são resistivos, ou seja, a tensão aplicada ao para-raio é livre de harmônicos, de forma que não há harmônicos na corrente capacitiva.

No entanto, como a reatância capacitiva da isolação é inversamente proporcional à frequência da tensão aplicada, níveis de harmônicos relativamente baixos na tensão podem gerar harmônicos na corrente capacitiva comparáveis à magnitude total da corrente resistiva, já que esta é bem menor que a corrente capacitiva (36).

As variações na medição da terceira harmônica da corrente de fuga em relação à parcela puramente resistiva da terceira harmônica são mostradas na Figura 11, a seguir. A faixa de erro assinalada leva em consideração que a parcela resistiva da corrente de fuga pode corresponder de 5% a 20% da corrente de fuga total, além de variação de 0 a 360 graus na fase da terceira harmônica na tensão (13).

Como indica a Figura 11, para conteúdo harmônico de apenas 1% na tensão, erros de até 100% podem ocorrer. Dessa forma, essa técnica não se mostra adequada como método universal para a monitoração de para-raios.

Figura 11 – Erro na avaliação da corrente de fuga resistiva devido a harmônicos na tensão do sistema. Fonte: (13), adaptada.

4.3.7.2.Método de medição B2

O método de medição B2 é um aperfeiçoamento do método B1, com a inclusão da compensação dos harmônicos da tensão do sistema.

Isso é obtido através de um sensor de campo elétrico próximo à base do para-raio, com o objetivo de amostrar a forma de onda e a fase da tensão aplicada ao equipamento (13), (22).

Dessa forma são ultrapassadas as limitações do método B2 no que diz respeito aos erros provocados pelos harmônicos na tensão do sistema. No entanto, devem ser levadas em consideração outras limitações inerentes à monitoração indireta da corrente resistiva por meio da medição do terceiro harmônico, conforme demonstrado no capítulo 4.3.7.4.

4.3.7.3.Método de medição A4

O método de medição A4 consiste na medição da somatória das correntes de fugas dos para-raios das três fases do sistema. Supondo que as três correntes capacitivas tenham aproximadamente a mesma magnitude, a defasagem de 120 graus entre as fases do sistema faz com que as correntes capacitivas se anulem. A terceira harmônica das correntes resistivas, por outro lado, se somam algebricamente, de forma que o aumento na corrente resistiva de uma

das fases, com o consequente aumento de sua terceira harmônica, se faria sentir e poderia ser detectado pela medição da somatória das correntes.

Entretanto, um dos pontos fracos do método está justamente em seu pressuposto básico: na prática as correntes de fuga capacitivas dos para-raios podem ter magnitudes bastante diferentes, não apenas por diferenças na capacitância dos para-raios, mas também devido a diferentes capacitâncias parasitas de acoplamento nas três fases da instalação (13).

Além disso, assim como o método de medição B1, o método A4 parte do pressuposto de que todos os componentes harmônicos presentes na corrente de fuga total são resistivos, ou seja, a tensão aplicada ao para-raio é livre de harmônicos, de forma que não há harmônicos na corrente capacitiva.

Portanto, pelos motivos acima, essa técnica não se mostra adequada como método universal para a monitoração de para-raios.

4.3.7.4.Limitações da monitoração por medição de 3º harmônico

Como explanado acima, a medição de terceiro harmônico da corrente de fuga é utilizada como uma indicação indireta da magnitude da corrente resistiva, a partir do pressuposto de que existe sempre uma proporcionalidade entre a corrente resistiva total e sua componente de terceiro harmônico.

Dessa forma, uma degradação da isolação que leve a um aumento da corrente de fuga resistiva faria necessariamente aumentar a componente de terceira harmônica dessa mesma corrente.

Embora isso seja verdadeiro para degradações internas nos blocos de resistores não-lineares, tais como aquelas provocadas por correntes de descarga muito elevadas, que alteram a curva V-I do para-raio, existem modos de falha em que isso não ocorre. Segundo (27), a degradação dos blocos de ZnO devido à redução de oxigênio em suas bordas causa o deslocamento da curva V-I, mas não altera sua inclinação, de forma que a componente fundamental da corrente resistiva se altera, mas o mesmo não ocorre com a terceira harmônica. Dessa forma, a monitoração de para-raios pela medição de terceira harmônica seria insensível a esse modo de falha.

De forma similar, o ingresso de umidade nos para-raios causa aumento da corrente resistiva, ao criar caminhos de circulação de corrente resistiva paralelos aos blocos de ZnO.

Também nesse caso, obviamente, a corrente resistiva eleva-se sem que a componente de terceira harmônica se altere (27).

O primeiro modo de falha mencionado acima, não detectável pela medição de terceira harmônica – redução de oxigênio na borda dos blocos de ZnO, poderia ser considerado relativamente raro, não ocasionando prejuízo importante para o diagnóstico de para-raios por esse método.

Já a possibilidade de não detecção de entrada de umidade no para-raio pode prejudicar seriamente a efetividade do método, considerando que praticamente todos os trabalhos publicados a respeito de falhas em para-raios mencionam a perda de estanqueidade como o modo de falha mais comum, tanto em para-raios de SiC quanto de ZnO.

Outra possibilidade que não pode ser desprezada, principalmente em para-raios de SiC, que tem construção mais intrincada, é a ocorrência de problemas mecânicos internos, como a quebra de centelhadores e a quebra ou desconexão de resistores de equalização. Tais modos de falha podem não afetar a terceira harmônica da corrente de fuga, passando despercebidos a esse método de diagnóstico.

Para verificar essa hipótese, foram analisados os relatos dos ensaios realizados em 12 (doze) para-raios de SiC, sendo seis de tensão nominal 85 kV e outros seis de 132 kV, disponíveis na referência (6).

Nessa análise puderam constatar-se 5 (cinco) para-raios em que as medições de terceiro harmônico da corrente de fuga têm valores comparativamente baixos, porém outros ensaios realizados e/ou a inspeção interna dos para-raios constatarem problemas graves. Os resultados dos ensaios, reportados em (6), são mostrados de forma resumida na Tabela 3 a seguir.

As células marcadas em vermelho indicam ensaios ou inspeções em que foram constatados problemas nos para-raios. As células em verde indicam medições de terceira harmônica de corrente de fuga com valores relativamente baixos comparando com o conjunto de para-raios.

Observa-se que as amostras A1, A5, A6, B3 e B5, apesar de apresentarem diversos problemas nos demais ensaios, estão entre as que apresentam os menores conteúdos de terceira harmônica.

Dentre os para-raios do fabricante A, tomando como exemplo a amostra A5, verifica-se uma elevação de temperatura anormal na medição com termovisor, indicando a presença de elevada corrente de fuga resistiva. As amostras A1 e A6, apesar de reprovados no ensaio de

tensão disruptiva à frequência industrial (na amostra foi impossível a realização do ensaio), também tem terceira harmônica baixa.

Nos para-raios do fabricante B, a desmontagem da amostra B3 para inspeção interna revelou a presença de umidade e suporte de centelhador quebrado. A amostra B5, além de ser reprovada nos ensaios de tensão disruptiva à frequência industrial e RIV, foi encontrada com centelhadores quebrados durante a inspeção interna.

Esses resultados vêm confirmar as hipóteses mencionadas acima, de que defeitos que não necessariamente afetem a curva V-I dos resistores não-lineares dos para-raios, como entrada de umidade e alterações mecânicas, podem não ser detectados com a medição da terceira harmônica da corrente de fuga.

Tabela 3 – Resultados de ensaios realizados nos para-raios de SiC de tensão nominal 85 kV, amostras A1 a A6. Fonte: (6)

Amostra	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Tensão fase-terra aplicada (kV)	51						80					
3ª harmônica de fuga (%)	6,7	10,1	24,9	32,9	5,7	5	5,6	5,8	6,8	6,9	7,5	18
Tensão disruptiva 60Hz (kV)	134	105	85	102	*	*	226	219	224	218	188	233
Tensão impulso positivo (kV)	182	171	178	172	173	173	382	374	364	340	349	355
Tensão impulso negativo (kV)	181	168	178	167	172	188	354	363	359	322	344	344
RIV (kV) @ tensão de operação	0		11	29	143	8033	23	80	0	0	4518	6381
Delta temperatura termovisão (°C)	1,6	2,4	**	**	5	**	**	**	3,6	**	2,8	16,5
Desmontagem e inspeção interna	** - Umidade - Descarga nos blocos	** - Umidade - Descarga nos blocos	** - Umidade - Descarga nos blocos - Descarga centelhador	** - Umidade - Descarga nos blocos - Descarga centelhador	** - Descarga nos blocos - Descarga centelhador	- Bom estado	** - Umidade - Oxidação - Suporte do resistor de equalização quebrado	** - Diversos conjuntos de centelha-dores quebrados				

Notas:

* Não foi possível realizar a medição, pois o para-raio causava o desarme da fonte de alimentação

** Ensaios ou inspeções não realizados

5. NOVO MÉTODO DE DIAGNÓSTICO PROPOSTO

5.1. Limitações dos métodos de diagnóstico atuais

Como apresentado resumidamente no Capítulo 4, diversas técnicas foram desenvolvidas e são utilizadas atualmente para o diagnóstico de estado de para-raios de carboneto de silício e óxido de zinco.

Dentre elas, foram apresentadas com maior detalhamento as técnicas que mais se aproximam da necessidade que se busca atender nesse trabalho, apresentada no Capítulo 1.3, que é o desenvolvimento de novas técnicas de diagnóstico contínuo e em tempo real do estado dos para-raios, que dispensem desligamento do equipamento e o uso de mão-de-obra, de forma a reduzir o risco de falhas, elevar a confiabilidade do sistema, reduzir o risco de interrupções no fornecimento de energia, ao mesmo tempo em que se reduzam os custos de operação e manutenção das empresas, além de permitir o melhor gerenciamento dos ativos até seu fim de vida útil e a migração da manutenção preventiva (baseada no tempo) para a preditiva (baseada no estado).

Foi demonstrado que, mesmo as técnicas que mais se aproximam dessa necessidade, possuem fatores limitantes de diferentes naturezas, como resumido na Tabela 4 abaixo para os para-raios de SiC e na Tabela 5 a seguir para os para-raios de ZnO.

Tabela 4 – Técnicas atuais de diagnóstico de para-raios de SiC e suas desvantagens

Técnicas de diagnóstico	Desvantagens
Tensão de rádio-interferência	Elevadas interferências eletromagnéticas em subestações que dificultam as medições e o diagnóstico
Descargas parciais	Elevadas interferências eletromagnéticas em subestações que dificultam as medições e o diagnóstico
Tensão residual à corrente de descarga nominal	Técnica aplicável apenas com o equipamento fora de serviço
Tensão disruptiva à frequência industrial	Técnica aplicável apenas com o equipamento fora de serviço
Tensão disruptiva em impulso	Técnica aplicável apenas com o equipamento fora de serviço
Perdas dielétricas	Técnica aplicável apenas com o equipamento fora de serviço
Resistência de isolamento	Técnica aplicável apenas com o equipamento fora de serviço
Medição de temperatura por termovisão	- Monitoração não contínua - Alta demanda de mão-de-obra - Sujeito a influências do operador na medição - Dificuldade de interpretação dos resultados
Medição de corrente de fuga total	Baixa sensibilidade a defeitos
Medição de 3ª harmônica da I de fuga	Insensível a defeitos que não alterem a curva V-I dos resistores não lineares, tais como ingresso de umidade, redução de O ₂ e alterações mecânicas

Tabela 5 – Técnicas atuais de diagnóstico de para-raios de ZnO e suas desvantagens

Técnicas de diagnóstico	Desvantagens
Descargas parciais	Elevadas interferências eletromagnéticas em subestações que dificultam as medições e o diagnóstico
Determinação da tensão de referência	Técnica aplicável apenas com o equipamento fora de serviço
Levantamento da curva V-I	Técnica aplicável apenas com o equipamento fora de serviço
Perdas dielétricas	Técnica aplicável apenas com o equipamento fora de serviço
Medição de temperatura por termovisão	- Monitoração não contínua - Alta demanda de mão-de-obra - Sujeito a influências do operador na medição - Dificuldade de interpretação dos resultados
Temperatura por sensores passivos	Aplicável apenas a para-raios novos
Corrente de fuga resistiva – método A1 (13)	Necessita sinal da tensão aplicada ao para-raio (TP ou similar)
Corrente de fuga resistiva – método A2 (13)	Necessita capacitor de referência conectado à alta tensão
Corrente de fuga resistiva – método A3 (13)	Necessita dados de cada modelo, fabricante e lote de blocos não-lineares
Corrente de fuga resistiva – método B3 (13)	Necessita sinal da tensão aplicada ao para-raio (TP ou similar)
Corrente de fuga resistiva – método C (13)	Necessita sinal da tensão aplicada ao para-raio (TP ou similar)
3ª harmônica da corrente de fuga – método B1 (13)	- Sujeito a erros devido a harmônicos na tensão. - Insensível a defeitos que não alterem a curva V-I dos resistores não lineares, tais como ingresso de umidade, redução de O₂ e alterações mecânicas
3ª harmônica da corrente de fuga – método B2 (13)	Insensível a defeitos que não alterem a curva V-I dos resistores não lineares, tais como ingresso de umidade, redução de O ₂ e alterações mecânicas

Técnicas de diagnóstico	Desvantagens
3ª harmônica da corrente de fuga – método A4 (13)	- Necessita correntes capacitivas equilibradas nas 3 fases. - Sujeito a erros devido a harmônicos na tensão. - Insensível a defeitos que não alterem a curva V-I dos resistores não lineares, tais como ingresso de umidade, redução de O₂ e alterações mecânicas.

5.2. Características desejáveis do novo método

Buscando atender a necessidade apresentada acima, será proposto a seguir um novo método de diagnóstico de estado de para-raios, com as seguintes características principais:

- Aplicável em tempo real, com o equipamento em operação normal, e contínua, sem necessidade de intervenções manuais periódicas;
- Imune às interferências eletromagnéticas normalmente encontradas em subestações de alta tensão;
- Imune à existência de harmônicos na tensão do sistema;
- Aplicável tanto a para-raios de SiC como de ZnO;
- Aplicável tanto a para-raios novos como já em operação;
- Sensível e capaz de diagnosticar os modos de falha mais comuns encontrados nesses dois tipos de para-raios;
- Monitoração baseada em medição de fácil obtenção, portanto sem necessidade de sinais adicionais que podem ser difíceis de obter nas subestações (medição de tensão por TP, por exemplo).

5.3. Monitoração de capacitância e resistência equivalentes

O método proposto consiste na monitoração da capacitância e da resistência equivalentes do para-raio, conforme definidos no Capítulo 3.1 para os para-raios de SiC e Capítulo 3.2 para os de ZnO.

O cálculo desses parâmetros – capacitância e resistência equivalentes – será baseado apenas na medição da corrente de fuga dos para-raios, sendo a forma de viabilizar esse cálculo sem lançar mão da medição de tensão do sistema explanada mais adiante.

A seguir são detalhadas as influências que diferentes tipos de defeito no para-raio têm nos parâmetros capacitância equivalente e resistência equivalente, para as tecnologias de SiC e ZnO.

5.3.1. Capacitância e resistência equivalentes de para-raios de SiC

Como demonstrado no capítulo 3.1, um para-raio de SiC, em regime permanente, pode ser representado por um modelo elétrico simplificado, que pode ser empregado para obtenção de um modelo reduzido, reproduzidos por conveniência na Figura 12 a seguir, partes (a) e (b) respectivamente, onde:

- C_{SGi} é capacitância do conjunto de centelhadores “i”, com i de 1 a n;
- R_{EQi} é o resistor de equalização do conjunto “i”, com i de 1 a n;
- C_{SG} é a capacitância equivalente do modelo reduzido;
- R_{EQ} é a resistência equivalente do modelo reduzido.

Com base nesses modelos elétricos, é possível simular a ocorrência de diferentes tipos de defeitos no para-raio de SiC e observar seus efeitos na capacitância e resistência equivalentes C_{SG} e R_{EQ} , que são os parâmetros que se pretende monitorar com a nova técnica de diagnóstico proposta.

Figura 12 – Modelos elétricos de um para-raio de SiC em regime permanente. (a) Modelo simplificado; (b) Modelo reduzido.

As simulações dessas condições de falha são demonstradas nos capítulos seguintes, utilizando-se as características elétricas de para-raios reais, obtidas a partir dos diversos ensaios relatados na referência (6), realizados em um total de 12 (doze) para-raios de SiC, sendo 6 (seis) de um fabricante, denominado “A”, com classe de tensão 88 kV, e 6 (seis) de outro fabricante, denominado “B”, com classe de tensão 138 kV, como já mostrado no capítulo 4.3.7.4 e na Tabela 3.

Mais especificamente, serão utilizados os dados dos para-raios da marca B, pelo fato de que algumas das amostras (B1, B2 e B4) foram encontradas em condições aparentemente boas, sendo aprovadas nos ensaios e inspeções realizados. Dentre essas, a amostra B1 foi a que apresentou melhores resultados, além de ter sido submetida a desmontagem para inspeção interna (B2 e B4 não foram desmontadas) e encontrada também em bom estado. Assim, a amostra B1 será utilizada nesse trabalho como referência de para-raio em bom estado, para comparação com as demais.

As capacitâncias equivalentes e resistências equivalentes para os seis para-raios ensaiados são mostrados na Tabela 6 a seguir, juntamente com as medições de correntes de fuga e ângulos de defasagem utilizados para seus cálculos.

Tabela 6 – Parâmetros elétricos do modelo reduzido para os para-raios de SiC do fabricante B, amostras B1 a B6, ensaiados na referência (6)

Amostra	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Tensão fase-terra aplicada (kV)		80				
Corrente de fuga RMS (mA)	0,293	0,352	0,250	0,260	0,300	0,628
Defasagem (graus)	73	75	79	68	83	51
Capacitância equivalente (pF)	9,3	11,3	8,1	8,0	9,9	16,2
Resistência equivalente (Mohms)	934	878	1677	821	2188	202
Tensão disruptiva 60Hz (kV)	226	219	224	218	188	233
Tensão impulso positivo (kV)	382	374	364	340	349	355
Tensão impulso negativo (kV)	354	363	359	322	344	344
RIV (kV) @ tensão de operação	23	80	0	0	4518	6381
Delta temperatura termovisão (°C)	**	**	3,6	**	2,8	16,5
Desmontagem e inspeção interna	-Bom estado	**	- Umidade - Oxidação - Suporte do resistor de equalização quebrado	**	- Diversos conjuntos de centelhadores quebrados	**

Notas:

** Ensaios ou inspeções não realizados

Tabela 6 Na Tabela 6 estão salientados em laranja os casos em que a capacitância e/ou a resistência equivalente apresentaram desvios significativos em relação aos valores da amostra de referência B1.

A partir da fotografia de um desses para-raios desmontado para inspeção interna, mostrada na Figura 13 a seguir, podemos observar que os mesmos são compostos por um total de 6 (seis) conjuntos de centelhadores em série (a), sendo que cada conjunto, por sua vez, é composto por diversos centelhadores em série, com um único resistor de equalização para cada conjunto de centelhadores (b).

Figura 13 – Configuração interna dos para-raios do fabricante B. (a) Conjuntos de centelhadores e blocos de SiC em série; (b) Detalhe de um conjunto de centelhadores. Fonte: (6)

Adaptando o modelo elétrico genérico da Figura 12 para esse arranjo específico obtemos o modelo específico da Figura 14 a seguir, no qual foi considerado que os seis conjuntos de centelhadores são idênticos. Embora a observação da fotografia na Figura 13.(a) permita observar que existem diferenças entre os seis conjuntos de centelhadores, tal simplificação não invalida o modelo elétrico para os objetivos desse trabalho, que é demonstrar os efeitos de diversos tipos de defeitos nos parâmetros elétricos equivalentes.

Partindo dessa premissa e utilizando os parâmetros do modelo reduzido mostrados na Tabela 6, cada um dos seis conjuntos de centelhadores pode ser representado pela capacitância C_{SGi} e pela resistência R_{EQi} , conforme abaixo:

$$C_{SGi} = 9,3 \cdot 6$$

$$C_{SGi} = 55,8 \text{ pF}$$

$$R_{EQi} = 934 / 6$$

$$R_{EQi} = 155,7 \text{ M}\Omega$$

Onde “i” vai de 1 a 6.

Figura 14 – Modelo elétrico dos para-raios de SiC do fabricante B ensaiados na referência (6).

5.3.1.1.Desconexão de resistores de equalização

Na desmontagem de 3 (três) para-raios do fabricante B, amostras B1, B3 e B5, conforme reportado em (6), foi encontrado que a amostra B3 tinha o suporte do resistor de equalização de um dos blocos de centelhadores quebrado, como mostra a Figura 15 abaixo.

Figura 15 – Suporte do resistor de equalização quebrado encontrado durante inspeção interna do para-raio B3. Fonte: (6)

De forma similar, a amostra B5 foi encontrada com diversos conjuntos de centelhadores quebrados, mostrados na Figura 16 abaixo.

Figura 16 – Conjuntos de centelhadores quebrados encontrado durante inspeção interna do para-raio B5. Fonte: (6)

Os achados dessas inspeções evidenciam a possibilidade de ocorrer a desconexão de um ou mais resistores de equalização de potencial dos centelhadores em para-raios de SiC. Como causas hipotéticas para esse tipo de defeito poderiam ser citados esforços mecânicos, devido a

campos magnéticos elevados, causados por correntes de descarga de vários kA, e os esforços térmicos a que os centelhadores são submetidos quando da ocorrência de descargas, além de danos causados por impactos durante o transporte, por exemplo.

Os efeitos da desconexão de um, dois ou três resistores de equalização sobre os parâmetros elétricos do para-raio são mostrados na Tabela 7 a seguir, onde observamos elevações da ordem de 20 %, 50 % e 100% na resistência equivalente, com praticamente nenhuma alteração na capacitância equivalente em relação aos valores iniciais da Tabela 6. A Figura 17, abaixo, ilustra a desconexão de um resistor no segundo conjunto de centelhadores, mas o efeito é o mesmo independente do conjunto afetado.

Figura 17 – Para-raio de SiC do fabricante B (6) com um resistor de equalização desconectado

Tabela 7 – Parâmetros elétricos de para-raio de SiC do fabricante B (6) com simulação de desconexão de um, dois ou três resistores de equalização

Parâmetro	Um resistor desconectado		Dois resistores desconectados		Três resistores desconectados	
	Valor	Alteração	Valor	Alteração	Valor	Alteração
C_{SG} (pF)	9,42	+ 1,3 %	9,49	+ 2,1 %	9,51	+ 2,3 %
R_{EQ} (M Ω)	1123,7	+ 20,3 %	1415,5	+ 51,6 %	1911,6	+ 104,7 %

Os resultados de simulações são compatíveis com os valores calculados a partir das medições efetuadas para as amostras B3 e B5, mostrados na Tabela 6, que apresentavam capacitâncias de 8,1 e 9,9 pF, praticamente inalteradas em relação à amostra de referência B1 (9,3 pF), porém com resistências bem mais elevadas: 1677 M Ω e 2188 Ω contra 934 M Ω da amostra B1.

Esses resultados indicam possível desconexão de dois resistores de equalização na amostra B3 e três na amostra B5.

Conclui-se, portanto, que o parâmetro resistência equivalente é sensível a este tipo de defeito nos para-raios de SiC.

5.3.1.2. Resistores de equalização alterados

Após a desmontagem do para-raio B5, reportada em (6), foi levantada a curva V-I de cada um de seus resistores de equalização, sendo os resultados para três deles mostrados na Figura 18 a seguir.

Figura 18 – Curva V-I dos resistores de equalização 1, 5 e 6 do para-raio B5. Fonte: (6)

Esses resistores têm característica não-linear, que pode ser aproximada ao formato da equação (10).

$$U = k \cdot i^n \quad (10)$$

Onde: U é a tensão aplicada ao resistor de equalização;
 i é a corrente que circula pelo resistor de equalização;
 k é uma constante, determinada pela geometria (comprimento e área) do resistor;
 n é uma constante que expressa o grau de não linearidade do resistor, determinada pelas características do material usado na sua fabricação.

O ajuste das constantes da equação (10) aos dados da Figura 18 resultou nos expoentes mostrados na Tabela 8 a seguir. Foram utilizadas somente as medições nas tensões de 4, 6 e 8 kV, desprezando-se a medição em 2 kV, de forma a obter uma curva mais representativa da operação do resistor com o para-raio na sua tensão nominal, da ordem de 13 kV por resistor (80 kV divididos por seis). As diferenças em relação às constantes obtidas por (6) são devidas principalmente ao uso em (6) de todas as medições para o cálculo das constantes.

Tabela 8 – Constantes para ajuste da equação (10) aos resistores não-lineares do para-raio B5 (6)

Constante	Resistor 1	Resistor 5	Resistor 6
k	3,1682	1,5698	4,3302
n	0,2917	0,3569	0,3034

Observa-se que, para os resistores 1 e 6, foram obtidos valores praticamente idênticos para o expoente n , cerca de 0,3, conforme esperado, já que todos os resistores são feitos do mesmo material. As diferenças na constante k são devidas às diferenças dimensionais entre os resistores. Segundo (6), os ensaios realizados em outros seis resistores equalizadores resultaram também em curvas muito similares às dos resistores 1 e 6.

Já para o resistor 5 observa-se expoente n cerca de 20% maior, da ordem de 0,36, o que não seria esperado. Observa-se também que a constante k tem valor bastante inferior aos outros dois resistores, o que resulta em valores de corrente cerca de 5 vezes maiores para um mesmo valor de tensão aplicada ao resistor 5 (redução de 80% na resistência em relação ao valor original). Isso indica a ocorrência de algum tipo de degradação no resistor 5 ao longo da operação do para-raio B5, não observada nos outros oito resistores ensaiados, possivelmente causada por correntes de descarga muito elevadas, já que não foi constatada presença de umidade nesse para-raio.

As constatações acima exemplificam outro tipo de defeito possível em para-raios de SiC, que é a alteração de valor de um ou mais resistores equalizadores. As simulações dos efeitos de alterações de valor de um dos resistores de equalização sobre os parâmetros elétricos do para-raio são mostrados na Tabela 9 a seguir, supondo cenários de redução de 40% e 80% na resistência. São observadas reduções de 9% e 25% aproximadamente na resistência equivalente, com aumentos moderados na capacitância em relação aos valores iniciais da Tabela 6.

Tabela 9 – Parâmetros elétricos de para-raio de SiC do fabricante B (6) com simulação de alterações em um dos resistores de equalização

Parâmetro	Redução de 40 % em um dos resistores de equalização		Redução de 80 % em um dos resistores de equalização	
	Valor	Alteração	Valor	Alteração
C_{SG}	9,34 pF	+ 0,5 %	10 pF	+ 7,5 %
R_{EQ}	846,2 M Ω	- 9,4 %	696,9 M Ω	- 25,4 %

Conclui-se, portanto, que o parâmetro resistência equivalente é sensível a este tipo de defeito nos para-raios de SiC, assim como o parâmetro de capacitância equivalente, de forma moderada, apenas em caso de grandes reduções no valor do resistor de equalização.

Apesar de ter um de seus resistores de equalização claramente alterado, os resultados das simulações na Tabela 9 não se refletiram com os valores calculados a partir das medições efetuadas na amostra B5 antes de sua desmontagem, mostrados na Tabela 6.

Isso se deve, muito provavelmente, à sobreposição com outro defeito na amostra B5, que é a existência de diversos conjuntos de centelhadores quebrados, com provável ocorrência de resistores de equalização desconectados, como já demonstrado no capítulo 5.3.1.1.

5.3.1.3. Módulo centelhador em curto-circuito

Como exposto no capítulo 5.3.1.1, danos mecânicos aos conjuntos de centelhadores podem levar à desconexão acidental de seus resistores equalizadores. Da mesma forma, é possível supor a possibilidade de que um ou mais centelhadores entrem em curto-circuito. Isso poderia ser causado, por exemplo, pela quebra ou deslocamento dos espaçadores isolantes dos centelhadores.

Os efeitos do curto-circuito de um ou dois dos conjuntos de centelhadores sobre os parâmetros elétricos do para-raio do fabricante B (6) são mostrados na Tabela 10 a seguir, onde observamos elevação de 20% e 50% na capacitância equivalente, respectivamente, simultaneamente a reduções de aproximadamente 17% e 33% na resistência equivalente, tomando sempre como referência os valores iniciais da Tabela 6.

Tabela 10 – Parâmetros elétricos de para-raio de SiC do fabricante B (6) com simulação de curto-circuito de um ou dois conjuntos de centelhadores

Parâmetro	Um centelhador em curto-circuito		Dois centelhadores em curto-circuito	
	Valor	Alteração	Valor	Alteração
C_{SG}	11,2 pF	+ 20%	14 pF	+ 50%
R_{EQ}	778,3 M Ω	- 16,7%	622,7 M Ω	- 33,3%

Na eventualidade de um curto-circuito de dois conjuntos de centelhadores, de um total de seis, como simulado acima, os quatro conjuntos restantes passam a dividir a tensão aplicada aos terminais do para-raio, que antes era dividida por seis conjuntos. Dessa forma, cada conjunto restante é submetido a uma tensão 50% maior, mais que dobrando a potência dissipada por seus resistores de equalização ($1,5^2 = 2,25$).

Com isso, é razoável supor que esses resistores venham a sofrer degradação e alterar seus valores, de forma similar ao observado na inspeção do para-raio B5 (6), relatado no capítulo 5.3.1.2 acima, em que um resistor de equalização foi encontrado com resistência cerca de 80% menor que os demais.

A simulação do resultado final dessa sequência de eventos é mostrada na Tabela 11 abaixo, com dois conjuntos de centelhadores em curto-circuito e, nos demais conjuntos de centelhadores, dois resistores de equalização com redução de 80% na resistência e um com redução de 70%.

Tabela 11 – Parâmetros elétricos de para-raio de SiC do fabricante B (6) com simulação de curto-circuito de dois conjuntos de centelhadores e três resistores de equalização alterados

Parâmetro	Dois centelhadores em curto-circuito e três resistores de equalização alterados	
	Valor	Alteração
C_{SG}	16,2 pF	+ 74,4 %
R_{EQ}	193,4 M Ω	- 79,3 %

Como resultado, a capacitância equivalente elevou-se a cerca de 16 pF (aumento de 74%) e a resistência equivalente reduziu-se a cerca de 193 M Ω (redução de 80%), resultado muito similar ao observado nos ensaios no para-raio B6, mostrados na Tabela 6.

Não se pode afirmar, contudo, que seja exatamente essa a condição real desse para-raio, pois o mesmo não foi desmontado para inspeção interna (6), e diversas outras combinações de defeitos poderiam levar a esses mesmos resultados.

Conclui-se, portanto, que os parâmetros capacitância e resistência equivalentes são sensíveis a este tipo de defeito nos para-raios de SiC.

5.3.1.4. Entrada de umidade

A perda de estanqueidade e conseqüente entrada de umidade são reportadas como uma das principais causas de problemas em para-raios. Além de causar a degradação dos elementos internos em para-raios de SiC, como oxidações, por exemplo, a presença de água cria caminhos paralelos para a circulação de corrente de fuga resistiva.

Essa condição pode ser simulada como uma redução uniforme da resistência de todos os resistores de equalização, uma vez que a princípio todos estarão expostos à mesma umidade. Isso resulta numa redução de igual valor na resistência equivalente, como ilustra o exemplo da Tabela 12 abaixo, em que os resistores de equalização foram reduzidos em 20%, resultando em redução também de 20% na resistência equivalente, enquanto a capacitância equivalente permanece inalterada.

Tabela 12 – Parâmetros elétricos de para-raio de SiC do fabricante B (6) com simulação de entrada de umidade

Parâmetro	Entrada de umidade, redução de 20% nos resistores de equalização	
	Valor	Alteração
C _{SG}	9,3 pF	0%
R _{EQ}	747,2 M Ω	- 20%

Esse pode ser o caso da amostra B4, como mostram os valores calculados a partir das medições efetuadas, mostrados na Tabela 6, que apresenta capacitância (8 pF) praticamente

inalterada em relação à amostra de referência B1 (9,3 pF), porém com resistências ligeiramente inferiores: 821 M Ω contra 934 M Ω da amostra B1.

Em casos como esse, em que a diferença é relativamente pequena (-12%), a monitoração contínua e em tempo real do parâmetro permitiria observar se existe uma tendência de evolução, comprovando a existência de um defeito em evolução no equipamento (entrada de umidade), ou se há simplesmente uma diferença construtiva normal entre os para-raios.

Conclui-se, portanto, que o parâmetro resistência equivalente é sensível a este tipo de defeito nos para-raios de SiC, principalmente se o diagnóstico for feito com base na tendência de evolução da resistência. No entanto, como não existem dados de desmontagem do para-raio da amostra B4 que permitam comprovar a hipótese de entrada de umidade, sugere-se que em trabalhos futuros sejam realizados ensaios simulando essa condição para comprovação do efeito final na resistência equivalente.

5.3.1.5. Blocos de SiC ou outros componentes desconectados

A partir do modelo elétrico completo do para-raio de SiC, mostrado na Figura 4, observa-se que a desconexão acidental de quaisquer dos elementos em série com os centelhadores, como os blocos de SiC e a bobina de extinção de arco, fariam a corrente de fuga tender teoricamente a zero – na prática, haveria grande redução da corrente de fuga, que passaria a ser ditada principalmente pelas capacitâncias parasitas do ponto de desconexão.

Um defeito desse tipo, que poderia ser causado, por exemplo, por danos mecânicos ao equipamento, seria enxergado no modelo reduzido como uma grande redução da capacitância equivalente, que tenderia ao valor das capacitâncias parasitas do ponto de desconexão.

Dessa forma, verifica-se que o parâmetro capacitância equivalente é sensível a este tipo de defeito nos para-raios de SiC.

5.3.1.6. Alterações nos blocos de SiC

Como exposto no capítulo 3.1, os blocos de carboneto de silício tem resistência comparativamente muito menor que os blocos de centelhadores e suas resistências de equalização. Por isso, os mesmos não têm praticamente influência sobre a corrente de fuga e sobre os parâmetros capacitância equivalente e resistência equivalente do modelo elétrico reduzido.

Dessa forma, esses parâmetros não se mostram sensíveis a eventuais alterações na curva V-I dos blocos de SiC.

No entanto, os principais fatores que causam deterioração dos blocos de SiC, como a perda de estanqueidade com ingresso de umidade e as correntes de descarga elevadas, tendem a causar alterações também nos resistores de equalização, como citado no capítulo 5.3.1.2, além de causar a circulação de corrente resistiva por caminhos paralelos a estes, como menciona o capítulo 5.3.1.4.

Com isso, existe a possibilidade de que esses fatores, se levarem à degradação dos blocos de SiC, sejam detectados a partir da deterioração causada em outros elementos do para-raio.

Cumprе ressaltar que, devido a essa característica de baixa impedância dos blocos de SiC, outras técnicas de diagnóstico, como as medições de terceiro harmônico da corrente de fuga e de temperatura por termovisão têm exatamente a mesma dificuldade em detectar a degradação dos mesmos.

A análise do modelo elétrico do para-raio de SiC permite concluir que as medições de terceira harmônica na corrente de fuga obtidas na referência (6) são geradas pelos resistores de equalização não-lineares, e não pelos blocos de SiC, assim como as elevações de temperatura observadas.

5.3.2. Capacitância e resistência equivalentes de para-raios de ZnO

Como demonstrado no capítulo 3.2, um para-raio de ZnO em regime permanente pode ser representado por um modelo elétrico completo, que pode ser empregado para obtenção de um modelo reduzido, reproduzidos por conveniência na Figura 19 a seguir, partes (a) e (b) respectivamente, onde:

- C_{Bj} é a capacitância do bloco de óxido de zinco “j”, com j variando de 1 a m;
- R_{Bj} é a resistência do bloco de óxido de zinco “j”, com j variando de 1 a m;
- C_B é a capacitância equivalente do modelo reduzido;
- R_B é a resistência equivalente do modelo reduzido.

Com base nesses modelos elétricos, é possível simular a ocorrência de diferentes tipos de defeitos no para-raio de ZnO e observar seus efeitos na capacitância e resistência equivalentes C_B e R_B , que são os parâmetros que se pretende monitorar com a nova técnica de diagnóstico proposta.

Figura 19 – Modelos elétricos de um para-raio de ZnO em regime permanente. (a) Modelo completo; (b) Modelo reduzido.

As simulações dessas condições de falha são demonstradas nas seções seguintes, utilizando-se as características elétricas aproximadas de um para-raio real, obtidas a partir dos testes reportados na referência (12), realizados em um para-raio de ZnO, como já citado no capítulo 3.2.

Onde dados de ensaios em para-raios reais com defeitos estiverem disponíveis, estes serão apresentados para ilustração. Caso contrário, as situações de falhas serão apenas simuladas.

Os parâmetros capacitância equivalente e resistência equivalente para um para-raio em bom estado são os já mostrados na Tabela 2, reproduzida a seguir na Tabela 13 por conveniência.

Tabela 13 – Parâmetros elétricos equivalentes para o para-raio de ZnO ensaiado na referência (12)

Para-raio de 266 kV	
C_B	$\approx 15,9 \text{ pF}$
R_B	$\approx 5320 \text{ M}\Omega$

Não existem dados disponíveis a respeito da forma construtiva do para-raio ensaiado na referência (12), principalmente o número de blocos de ZnO que o compõe. No entanto, de acordo com a referência (8), um para-raio desse nível de tensão (266 kV fase-terra, tensão do

sistema 420 kV fase-fase) é constituído por cerca de 66 blocos de ZnO em série. Dessa forma, o índice “m” dos parâmetros da Figura 19 é igual a 66.

Partindo dessa premissa, cada um dos 66 blocos de ZnO é representado pela capacitância C_{Bi} de 1,05 nF e pela resistência R_{Bi} de 80,6 M Ω , o que resulta nos parâmetros do modelo reduzido mostrados na Tabela 13.

5.3.2.1. Blocos de ZnO alterados

Vários fatores podem causar a degradação dos blocos de ZnO de um para-raio, como a ocorrência de descargas com energia superior àquela para a qual os blocos foram projetados, a redução de oxigênio nas suas bordas ou os estresses causados pela tensão do sistema aplicada aos blocos, nas primeiras gerações de para-raios de ZnO (27).

Essas deteriorações causam alterações na curva V-I do para-raio, como ilustra a Figura 20 abaixo (27), de forma que a corrente de fuga resistiva tende a aumentar para um mesmo valor de tensão aplicada.

Segundo (27), alterações causadas por redução de oxigênio não seriam detectadas pela monitoração da terceira harmônica da corrente de fuga, pois como mostra a Figura 20, a curva V-I se desloca, mas não altera sua inclinação, de forma que a componente fundamental da corrente resistiva aumenta, mas a componente de terceiro harmônico permanece constante.

Figura 20 – Alteração da curva V-I de para-raios de ZnO. Fonte: (27)

As simulações de dois cenários, um com redução de 30% na resistência de cerca de metade dos blocos do para-raio (35 blocos) e outro com redução de 70% da resistência de 10% dos blocos (7 blocos) são mostradas na Tabela 14 abaixo.

Em ambos os casos são observadas reduções da ordem de 20% na resistência equivalente, sem alterações na capacitância em relação aos valores iniciais da Tabela 13.

Tabela 14 – Parâmetros elétricos de para-raio de ZnO com simulações de alterações nos blocos não-lineares

Parâmetro	Redução de 30% em 35 blocos		Redução de 70% em 7 blocos	
	Valor	Alteração	Valor	Alteração
C_B	15,9 pF	0%	15,9 pF	0%
R_B	4335 M Ω	- 18,5%	4270 M Ω	- 19,7%

A referência (37) apresenta diversos dados de ensaios em blocos varistores individuais, utilizados para a construção de para-raios comerciais para sistemas de transmissão, que corroboram os efeitos de blocos de ZnO alterados sobre a resistência equivalente do para-raio.

Nesses ensaios foram utilizados 14 blocos de ZnO com as características mostradas na Tabela 15 abaixo.

Tabela 15 – Características dos blocos de ZnO usados nos ensaios da referência (37)

Característica	Especificação
Tensão Nominal	4,0 kVrms
Máxima tensão contínua de operação (MCOV)	3,4 kVrms
Corrente de descarga nominal	10,0 kA
Corrente de referência (I_{ref})	1,0 mA
Tensão de referência mínima (I_{refm})	4,2 kVrms
Tensão residual média	12,0 kV
Classe de descarga de linhas de transmissão	Classe 1

Diferentes tipos de estresses de degradação foram aplicados em amostras distintas dos blocos de ZnO, conforme detalhado na Tabela 16, a seguir.

Tabela 16 – Estresses de degradação aplicados aos blocos de ZnO da referência (37)

Estresse	Características	Amostras submetidas
Degradação por ciclos de impulsos atmosféricos	4 grupos de quinze impulsos, cada um com:	5
	- Correntes de pico 10 kA nos grupos 1 e 3	6
	- Correntes de pico 15 kA nos grupos 2 e 4	16
	- Formato 8/20 μ s	22
	- Intervalos da ordem de 1 minuto entre impulsos	
Degradação por impulsos de múltiplas descargas	6 grupos de 5 impulsos, cada um com:	10
	- Pico 10 kA, 8/20 μ s	11
	- Intervalo entre impulsos 20 a 40 ms	12
	Intervalos da ordem de 1 minuto entre grupos	13
Degradação por impulsos de corrente suportável de longa duração	6 grupos de três impulsos, cada um com:	8
	- Energia 5,44 kJ (1,36 kJ/kV)	20
	- Duração virtual de crista 2000 μ s	29
	- Intervalos da ordem de 1 minuto entre impulsos	30
	Resfriamento à temperatura ambiente entre grupos	

Antes e após os ensaios de degradação, as mesmas amostras listadas na Tabela 16 foram submetidas aos seguintes ensaios não destrutivos, a fim de verificar a degradação ocorrida nas amostras devido aos estresses aplicados, com exceção das amostras 8, 13 e 22, que foram submetidas a ensaios metalográficos (37):

- Curva característica V-I, de 0,4 a 4,2 kVrms
- Curva característica V-C (tensão-capacitância), de 0,4 a 4,2 kVrms
- Curva característica V-TanD (tensão-tangente delta), de 0,4 a 4,2 kVrms
- Tensão residual à corrente de descarga nominal (10 kA)
- Tensão de referência à corrente de referência (1 mA)
- Corrente de polarização e despolarização.

Durante a aplicação dos seus respectivos estresses de degradação, conforme Tabela 16, as amostras 5, 16, 22, 10 e 12 sofreram descargas na superfície lateral do bloco, e por isso não tiveram a curva característica V-I levantada após a degradação (37). No entanto, as curvas características V-C e V-TanD foram levantadas, após a degradação, para os valores iniciais de

tensão (37), o que fornece informações interessantes a respeito dos efeitos das degradações na capacitância equivalente e na resistência equivalente dos para-raios, uma vez que a tangente delta é a razão entre a componente resistiva e a capacitiva do bloco, sendo diretamente proporcional, portanto, à corrente resistiva deste, como mostra a Figura 21.

Os principais resultados de medições de capacitância e tangente durante o levantamento das curvas V-C e V-TanD antes e após o estresse das amostras 5, 16, 10 e 12, que sofreram descarga na superfície lateral do bloco (37), são mostrados nas Tabelas 17, 18, 19 e 20 a seguir, juntamente com a variação percentual desses parâmetros.

Tabela 17 – Variação de capacitância e tangente delta do bloco 5 antes e após descarga na sua lateral (37).

Tensão (kV)	Capacitância			Tangente Delta		
	Antes (pF)	Depois (pF)	Variação	Antes (pu)	Depois (pu)	Variação
0,4	167,5	180,0	+7,5 %	0,033	0,063	+90,9 %
0,8	165,7	188,3	+13,6 %	0,033	0,112	+239 %
3,4 (MCOV)	149,4	-	-	0,088	-	-
3,6	149,2	-	-	0,110	-	-
4,0 (Un)	150,7	-	-	0,206	-	-

Figura 21 – Tangente Delta dos blocos de ZnO

Enquanto as variações de capacitância da amostra 5 após a degradação foram modestas, é digna de nota a grande variação na tangente delta, mais de 3 vezes o valor original com apenas 0,8 kV. Observar também que com apenas 0,8 kV o valor da tangente delta já era superior ao que era observado com 3,6 kV, maior que a tensão contínua de operação (3,4 kV).

Esses resultados indicam a grande elevação ocorrida na corrente resistiva do para-raio, e, portanto, a grande redução ocorrida em sua resistência equivalente, como predito pelas simulações com o modelo simplificado para o caso de alterações nos blocos de ZnO, como mostrado na Tabela 14.

Tabela 18 – Variação de capacitância e tangente delta do bloco 16 antes e após descarga na sua lateral (37).

Tensão (kV)	Capacitância			Tangente Delta		
	Antes (pF)	Depois (pF)	Variação	Antes (pu)	Depois (pu)	Variação
0,4	207,4	281,9	+35,9 %	0,027	0,559	+1970 %
0,8	207,2	279,0	+34,7 %	0,030	1,110	+3600 %
3,4 (MCOV)	187,6	-	-	0,093	-	-
3,6	185,5	-	-	0,111	-	-
4,0 (Un)	188,2	-	-	0,205	-	-

De forma similar ao ocorrido na amostra 5, a amostra 16 também apresenta variações modestas nas capacitâncias e alterações muito grandes na tangente delta, porém bem mais acentuadas que as verificadas na amostra 5. Com apenas 0,4 kV a tangente delta já era superior à verificada anteriormente à tensão nominal de 4 kV, atingindo valores 37 vezes os originais.

Portanto, a amostra 16 confirma também a redução na resistência equivalente do para-raio causada por alterações nos blocos de ZnO.

Tanto a amostra 5 quanto a 16 sofreram deterioração devido à aplicação de ciclos de impulsos atmosféricos com picos de até 15 kA, superiores, portanto, à corrente de descarga nominal de 10 kA, simulando degradações que podem ocorrer nas aplicações reais.

Tabela 19 – Variação de capacitância e tangente delta do bloco 10 antes e após descarga na sua lateral (37).

Tensão (kV)	Capacitância			Tangente Delta		
	Antes (pF)	Depois (pF)	Variação	Antes (pu)	Depois (pu)	Variação
0,4	161,0	145,6	-9,6 %	0,031	0,038	+22,6 %
0,8	161,0	154,3	-4,2 %	0,034	0,166	+388 %
1,2	160,8	163,6	+1,7 %	0,038	0,342	+800 %
3,4 (MCOV)	147,7	-	-	0,092	-	-
3,8	147,9	-	-	0,142	-	-
4,0 (Un)	149,9	-	-	0,211	-	-
4,2	152,5	-	-	0,319	-	-

Tabela 20 – Variação de capacitância e tangente delta do bloco 12 antes e após descarga na sua lateral (37).

Tensão (kV)	Capacitância			Tangente Delta		
	Antes (pF)	Depois (pF)	Variação	Antes (pu)	Depois (pu)	Variação
0,4	163,2	141,7	-13,2 %	0,028	0,036	+28,6 %
0,8	163,1	147,0	-9,9 %	0,031	0,072	+132,3 %
3,2	149,4	-	-	0,073	-	-
3,4 (MCOV)	148,4	-	-	0,086	-	-
4,0 (Un)	149,7	-	-	0,200	-	-

De forma similar ao observado nas amostras 5 e 16, a amostra 10 apresentou aumento significativo em sua tangente delta após a ocorrência de descarga em sua superfície lateral, 800% em comparação com o valor original. Foram observadas também reduções na

capacitância nos mesmos valores de tensão, sem uma explicação aparente, mas que não invalidam a constatação de redução da resistência equivalente após a degradação da amostra.

Apesar de ter apresentado variações menores após a degradação quando comparada às amostras 5, 16 e 10, constata-se também na amostra 12 incremento apreciável na tangente delta. Isso fica claro ao se observar que com apenas 0,8 kV a tangente delta já tinha valor igual ao obtido anteriormente com 3,2 kV, já próximo da tensão máxima para operação contínua. Embora não tenha sido medido nesse ensaio, fica claro que quando submetida às tensões normais de operação, essa amostra, assim como as demais, apresentaria valores de tangente delta extremamente altos.

Portanto, as amostras 10 e 12 confirmam também a redução na resistência equivalente do para-raio causada por alterações nos blocos de ZnO. Ambas as amostras sofreram deterioração devido à aplicação de impulsos de múltiplas descargas, com picos de corrente de 10 kA, dentro do limite nominal dos blocos, porém uma elevada taxa de repetição, simulando degradações que podem ocorrer nas aplicações reais.

Além dos desgastes decorrentes diretamente das sobretensões e sobrecorrentes a que foram submetidas, as amostras 5, 16, 10 e 12 sofreram também com uma descarga em sua superfície lateral.

A descarga lateral não ocorreu com as amostras 6, 11, 20, 29 e 30, cujas variações de capacitância e tangente delta são apresentadas de forma resumida nas Tabelas 21 e 22 a seguir.

Tabela 21 – Variações de capacitância dos blocos 6, 11, 13, 20, 29 e 30 após estresses (37).

Tensão (kV)	Variações de capacitância (%)				
	Amostra 6	Amostra 11	Amostra 20	Amostra 29	Amostra 30
0,4	+0,5	-9,7	0,0	+0,8	+9,9
0,8	+1,2	-9,7	+0,1	+0,7	+9,9
3,4 (MCOV)	+2,4	-5,5	+0,6	-1,4	+9,4
3,6	+2,4	-5,4	-0,1	-0,8	+9,6
4,0 (Un)	+2,7	-4,8	-0,4	-0,9	+9,8

Tabela 22 – Variações de tangente delta dos blocos 6, 11, 13, 20, 29 e 30 após estresses (37).

Tensão (kV)	Variações de Tangente Delta (%)				
	Amostra 6	Amostra 11	Amostra 20	Amostra 29	Amostra 30
0,4	+4,2	+4,3	-7,7	-4,2	0,0
0,8	+23,1	+7,7	-6,9	-7,1	-3,6
3,2	+70,5	+16,3	+2,2	-3,4	+6,4
3,4 (MCOV)	+62,6	+11,0	+1,8	-2,8	+7,0
4,0 (Un)	+59,1	+6,0	+0,5	-2,0	+2,3

Conforme seria esperado para o tipo de estresse aplicado às amostras 6, 11, 20, 29 e 30, as capacitâncias não apresentaram variações importantes, sendo difícil afirmar se as mesmas realmente refletem alterações nos blocos de ZnO ou se são devidas às imprecisões e incertezas da medição.

O mesmo ocorre com as medições de tangente delta das amostras 20, 29 e 30. Já as amostras 6 e 11, apesar de apresentarem mudanças modestas ou pequenas na tangente delta, tiveram variações coerentes com os resultados observados nas amostras em que houve descarga lateral, com destaque para a amostra 6.

Essa conclusão se baseia no fato de que, dos 3 tipos de estresses de degradação utilizados, os que se basearam em corrente suportável de longa duração não causaram descarga lateral em nenhuma amostra. É coerente, portanto, que as amostras 20, 29 e 30 não apresentem qualquer sinal de alteração nas medições de capacitância e tangente delta, o que indica que esse tipo de estresse não tem grande poder de degradação para o tipo de bloco de ZnO ensaiado.

A amostra 6, pertencente ao grupo em que 3 das 4 amostras estressadas apresentaram descarga lateral, apesar de ser a única a “escapar ilesa”, apresentou variação visível na tangente delta, superior a 60 % na tensão máxima de operação contínua. É provável que, se a mesma continuasse a ser submetida a estresses, o aumento da tangente delta (e a redução da resistência equivalente) evoluísse acentuadamente, o que seria detectado pela nova técnica de diagnóstico proposta nesse trabalho.

Já a amostra 11, pertencente ao grupo em que 2 das 4 amostras apresentaram descargas laterais, apresentou alterações visíveis, porém pequenas na tangente delta, o que é coerente com o fato de ser esse um tipo de estresse um pouco menos exigente para os módulos de ZnO empregados (50% das amostras apresentaram descarga).

Portanto, com base nas simulações efetuadas e nos resultados de ensaios com blocos de ZnO da referência (37), é possível concluir que o parâmetro resistência equivalente é sensível a defeitos que causem alterações nos para-raios de ZnO.

De forma complementar, é interessante notar que os ensaios de tensão residual realizados antes e após as degradações (37) comprovam que as alterações na curva V-I dos para-raios ocorre na sua região linear, e não na região de descarga, conforme afirma a literatura, ilustrada pela Figura 22 abaixo.

Figura 22 – Alteração na região linear da curva V-I de para-raios de ZnO após estresse. Fonte: (37)

De fato, os resultados obtidos na referência (37) mostram que os valores de tensão residual antes e após a degradação têm variações desprezíveis mesmo para os blocos que apresentaram descarga pela superfície lateral, como indicam os dados compilados na Tabela 23 a seguir.

Tabela 23 – Variações na tensão residual dos blocos antes e após estresses (37).

Amostra	Tensão Residual a 10 kA		
	Antes (kV)	Depois (kV)	Variação (%)
5	11,4	11,0	-3,5 %
16	10,9	10,7	-1,8 %
10	11,4	11,2	-1,8 %
12	11,3	10,8	-4,4 %

5.3.2.2. Entrada de umidade

A perda de estanqueidade e conseqüente entrada de umidade são reportadas como uma das principais causas de defeitos também nos para-raios de ZnO. Além de causar a degradação dos elementos internos, como oxidações, por exemplo, a presença de água cria caminhos paralelos aos blocos para a circulação de corrente de fuga resistiva.

Segundo (27), esse tipo de defeito pode não ser detectado pela monitoração de terceira harmônica da corrente de fuga, pois como o aumento da corrente não tem origem nos resistores não-lineares, somente a componente fundamental da corrente resistiva é alterada.

Essa condição pode ser simulada como uma redução uniforme da resistência de todos os blocos de ZnO, uma vez que a princípio todos estarão expostos à mesma umidade. Isso resulta numa redução de igual valor na resistência equivalente, como ilustra o exemplo da Tabela 24 abaixo, em que os resistores de equalização foram reduzidos em 20%, resultando em redução também de 20% na resistência equivalente, enquanto a capacitância equivalente permanece inalterada.

Tabela 24 – Parâmetros elétricos de para-raio de ZnO com simulação de entrada de umidade

Parâmetro	Entrada de umidade, redução de 20% nos resistores de equalização	
	Valor	Alteração
C_B	15,9 pF	0%
R_B	4256 M Ω	- 20%

Conclui-se, portanto, que o parâmetro resistência equivalente é sensível a este tipo de defeito nos para-raios de ZnO, principalmente se o diagnóstico for feito com base na tendência de evolução da resistência. Considera-se que a alteração de 20% aqui simulada seja modesta em relação a condições que podem ser encontradas em campo; no entanto, como não existem dados de ensaios que permitam comprovar essa hipótese, sugere-se que em trabalhos futuros sejam realizados ensaios simulando essa condição para comprovação do efeito final na resistência equivalente.

5.3.2.3. Blocos de ZnO ou outros componentes desconectados

A partir do modelo elétrico do para-raio de ZnO, mostrado na Figura 19, observa-se que a desconexão acidental de qualquer elemento em série no circuito faria a corrente de fuga tender teoricamente a zero – na prática, haveria grande redução no seu módulo, que passaria a ser ditada principalmente pelas capacitâncias parasitas do ponto de desconexão.

Um defeito desse tipo, que poderia ser causado por danos mecânicos ao equipamento, seria visto no modelo reduzido como uma grande redução da capacitância equivalente, que tenderia ao valor das capacitâncias parasitas do ponto de desconexão.

Dessa forma, verifica-se que o parâmetro capacitância equivalente é sensível a este tipo de defeito nos para-raios de ZnO.

6. MÉTODO DE MONITORAÇÃO EM TEMPO REAL

Este capítulo apresenta uma proposta de método para viabilizar a monitoração em tempo real dos parâmetros capacitância equivalente e resistência equivalente dos para-raios, de forma a permitir o diagnóstico contínuo do estado desses equipamentos utilizando o novo método descrito no capítulo 5.

6.1. Limitações para medição de tensão

Como demonstrado no capítulo 5.3, a monitoração dos parâmetros capacitância equivalente e resistência equivalente dos para-raios de SiC e ZnO em regime permanente permite detectar os principais tipos de defeitos envolvendo esses equipamentos.

Isso foi demonstrado, no caso dos para-raios de SiC, utilizando dados de medições realizadas em laboratório, publicadas em (6). Nesse caso, o cálculo da capacitância e resistência foi realizado de forma simples, utilizando, as medições de corrente de fuga e da tensão aplicada ao para-raio, além do ângulo de defasagem entre ambas.

No entanto, para aplicações de monitoração em tempo real de para-raios em campo essa estratégia apresenta dificuldades, pelo fato da medição de tensão aplicada ao equipamento não estar disponível, e nos casos em que esteja, o acesso à mesma pode implicar em custos que inviabilizariam economicamente a monitoração.

Dificuldade muito semelhante é enfrentada na monitoração em tempo real de buchas capacitivas, onde se busca monitorar a capacitância e a tangente delta (ou fator de potência) da isolação. Nessa aplicação, a barreira citada é ultrapassada com o uso da técnica da soma vetorial das correntes de fuga (38), (39), (40).

Nesse trabalho se buscará aplicar, sem alterações, uma técnica já existente no mercado, que é a da soma vetorial das correntes de fuga. Para tanto, as correntes de fuga dos três para-raios das três fases, que compõe um conjunto trifásico, são medidas simultaneamente com o objetivo de monitorar as alterações dos parâmetros equivalentes da isolação, capacitância e resistência, sem a necessidade de medição da tensão do sistema.

Deve ser feita distinção clara entre o método aqui proposto e o método de diagnóstico A4 da norma IEC 60099-5 (13), que também monitora a soma das correntes de fuga, porém com o objetivo de anular a componente capacitiva das correntes de fuga e medir a somatória das

componentes de terceiro harmônico. O método aqui proposto tem filosofia de funcionamento e objetivo distintos.

6.2. Soma vetorial das correntes de fuga

Quando a tensão do sistema é aplicada a um para-raio, uma corrente de fuga passa a circular através de sua isolamento, devido principalmente à sua capacitância, e em menor proporção, às suas perdas, representadas pela resistência da isolamento.

A Figura 23 ilustra esta situação. Nela podemos observar, através do modelo elétrico reduzido de um para raio, que pode ser de SiC ou ZnO, a composição das componentes capacitiva e resistiva da corrente para gerar a corrente de fuga medida para a monitoração.

Figura 23 – Correntes de fuga capacitiva e resistiva em um para-raio energizado

Na Figura 23 temos:

U é a tensão do sistema, aplicada ao para-raio;

C é a capacitância equivalente do para-raio, do modelo reduzido;

R é a resistência equivalente do para-raio, do modelo reduzido;

I_C é a corrente capacitiva;

I_R é a corrente resistiva;

I_F é a corrente de fuga medida.

As medições das correntes de fuga em cada um dos três para-raios do sistema trifásico, bem como a somatória das três correntes, são realizadas nos cabos de aterramento dos equipamentos, por meio de transformadores de corrente (TCs) de janela, de forma a não interferir no aterramento dos para-raios. Para isso, suas bases devem estar isoladas dos

suportes, para garantir que toda a corrente de fuga passe pelo cabo de aterramento e seja medida.

Cuidados especiais devem ser observados quanto à localização dos TCs nos cabos de aterramento, tendo em vista que os grampos de fixação dos cabos podem criar caminhos paralelos de circulação das correntes de fuga para terra, inserindo erros nas medições; dessa forma, os TCs devem estar localizados próximos do ponto de conexão dos cabos aos terminais de aterramento dos para-raios, antes, portanto, do primeiro grampo.

Também devem ser tomadas medidas para eliminação de possíveis erros nas medições das correntes de fuga causados por acoplamentos capacitivos e/ou indutivos com os condutores de alta tensão. Em algumas aplicações pode ser necessário o uso de blindagens metálicas e magnéticas nos TCs e nos cabos de medição.

Para utilização nesse método, apenas as componentes fundamentais de todas as correntes medidas devem ser utilizadas. Para isso, as medições devem ser submetidas a filtragens adequadas para eliminação de todas as componentes harmônicas das medições.

Como as três correntes de fuga estão defasadas entre si em aproximadamente 120° , e normalmente tem a mesma ordem de magnitude, a somatória das três correntes tende a apresentar valor menor que as correntes de fuga individuais, como ilustrado na Figura 24.(a) abaixo para uma dada condição inicial de capacitâncias e resistências.

Figura 24 – Correntes de fuga de três para-raios em um sistema trifásico e sua somatória. (a) Para uma dada condição inicial; (b) com alteração na capacitância e resistência equivalentes do para-raio da fase A

Supondo agora que ocorra uma alteração na capacitância e na resistência do para-raio da fase A, como mostrado na Figura 24.(b), com aumento de suas correntes de fuga capacitiva e resistiva, a alteração ocorrida na corrente de fuga I_a reflete-se de forma idêntica na somatória das correntes.

Com isso, temos uma nova corrente somatória, alterada em relação à inicial tanto em módulo quanto em ângulo. Ao decompor o vetor resultante da diferença entre a corrente somatória final e a inicial nos eixos correspondentes à tensão da mesma fase e no eixo ortogonal a este, obtemos dois vetores que são proporcionais às alterações, respectivamente, na resistência e na capacitância do para-raio.

Como, na realidade, as tensões do sistema não estão disponíveis para o sistema de monitoração, a decomposição do vetor de alteração na corrente somatória, citada acima, pode ser efetuada tomando como referência o conjunto de correntes de fuga dos três para-raios, que permite estimar o ângulo das tensões. Contribui para o sucesso dessa estratégia o fato das correntes de fuga serem predominantemente capacitivas, adiantadas, portanto, cerca de 90 graus elétricos em relação às suas respectivas tensões.

Para permitir a determinação das alterações ocorridas na somatória das correntes é necessária uma referência de valor inicial para a mesma. Essa referência é obtida em um período de “aprendizado” inicial do sistema, durante o qual a corrente somatória inicial é determinada e gravada na memória do sistema de monitoração.

Observa-se, portanto, que os parâmetros monitorados de fato por essa técnica referem-se às variações ocorridas na capacitância e na resistência, e não a seus valores absolutos. Tal fato não constitui problema, visto que o que indica a degradação em um para-raio é a variação desses parâmetros, e não seus valores absolutos, como verificado nas simulações demonstradas no capítulo 5.3.

No entanto, caso seja desejável indicar para o usuário o valor absoluto dos parâmetros ao invés de suas variações, basta que se programem no sistema os valores iniciais de capacitância e resistência, obtidos por medições efetuadas com o equipamento fora de serviço. A soma dos valores iniciais com as variações medidas corresponderá ao valor atual dos parâmetros.

Fica claro também que a corrente somatória é influenciada não apenas pelas mudanças na capacitância e resistência dos para-raios, mas também por alterações nas tensões fase-terra do sistema. Uma parte dessas influências é eliminada naturalmente por efeito de cancelamento na somatória vetorial das correntes, enquanto que outras influências são eliminadas por meio de tratamentos estatísticos das medições.

De forma similar, as variações nas correntes de fuga resistivas causadas pelas variações da temperatura dos resistores não-lineares tendem a ser canceladas na corrente somatória, se considerarmos que os três para-raios operam à mesma temperatura e tem curvas similares de alteração de corrente em função da temperatura. Por outro lado, a eventual degradação de um

dos para-raios que cause uma maior influência da temperatura sobre sua corrente resistiva causará alteração na somatória das correntes, permitindo sua detecção.

Uma das premissas verificadas na descrição do método da soma das correntes acima é que apenas um dos três para-raios apresenta deterioração nos parâmetros de capacitância e resistência equivalentes. Dessa forma, a determinação de qual das fases apresenta alteração nos parâmetros pode ser efetuada facilmente a partir da orientação do vetor de alteração na corrente somatória em relação aos vetores das correntes de fuga individuais.

De fato, a probabilidade de ocorrência de deterioração simultânea em mais de um para-raio pode ser considerada pequena. No entanto, na eventualidade de ocorrência de degradação em mais de uma fase, a tendência é que o defeito seja detectado e atribuído equivocadamente a uma alteração nos parâmetros da terceira fase, que se encontra em bom estado. Há que se considerar, entretanto, que em caso de emissão de um alerta de defeito pelo sistema de monitoração, o usuário irá desligar o equipamento para verificação, sendo o desligamento efetuado de forma trifásica, ficando os três para-raios disponíveis para ensaios. Assim, o usuário deve sempre efetuar os ensaios nas três fases monitoradas, e não apenas em uma delas, o que já seria natural de toda forma, já que todas estão desenergizadas.

6.3. Simulações de medições por soma vetorial em para-raios ZnO

A fim de demonstrar a viabilidade de uso da técnica de soma vetorial das correntes de fuga, já amplamente utilizada atualmente na monitoração de buchas capacitivas, para a monitoração em tempo real dos parâmetros capacitância equivalente e resistência equivalente de para-raios, diversas simulações são mostradas a seguir.

Para as simulações de uso dessa técnica em para-raios de ZnO serão usados como base os parâmetros equivalentes já utilizados no item 5.3.2 como representativos de um para-raios em bom estado com tensão máxima de operação contínua 266 kV, empregados em sistemas trifásicos de 420 kV.

6.3.1. Condições iniciais da simulação

Como explanado no item 6.2, o método de soma vetorial das correntes de fuga baseia-se na comparação das medições mais atuais obtidas com as medições de referência, obtidas durante o período de aprendizado do sistema no início de sua operação. Dessa forma, é

necessária para a simulação que seja determinada essa referência inicial, conforme descrito a seguir.

Os parâmetros iniciais de simulação do para-raio da fase B serão exatamente os valores já utilizados no item 5.3.2. Para o para-raio da fase A foram introduzidas variações arbitrárias de 10% para cima na capacitância equivalente e 10% para baixo na resistência equivalente, enquanto para a fase C as variações foram arbitradas em 5 % para baixo na capacitância e 5% para cima na resistência.

As variações arbitrárias introduzidas têm por objetivo simular as diferenças normais existentes entre os para-raios, mesmo que sejam de mesmo fabricante, modelo e lote. Os valores iniciais adotados para as três fases são mostrados na Tabela 25 abaixo.

Tabela 25 – Parâmetros elétricos iniciais de para-raio de ZnO em bom estado utilizados para simulação

	Fase A	Fase B	Fase C
Capacitância inicial	17,5 pF	15,9 pF	15,1 pF
Resistência inicial	4788 MΩ	5320 MΩ	5586 MΩ

Para as simulações, considera-se que os três para-raios acima estão conectados às três fases de um sistema elétrico com as características mostradas na Tabela 26 abaixo.

Tabela 26 – Características do sistema elétrico ao qual estão conectados os para-raios de ZnO para simulação

	Fase A	Fase B	Fase C
Frequência	60 Hz		
Ângulos de defasagem	0 °	240 °	120 °
Tensão nominal fase-fase	420 kV		
Tensão nominal fase-terra	242,5 kV		
Tensão efetiva fase-terra	242,5 kV	244,925 kV	237,65 kV

Considera-se na simulação que, inicialmente, o sistema apresenta exatamente os valores de tensões fase-terra mostrados nessa tabela, podendo variar ao longo da simulação conforme indicado. Como se pode observar, foram introduzidas variações arbitrárias nas tensões das

fases B e C, com o objetivo de simular um leve desbalanço entre as tensões fase-terra do sistema, de 1 % para cima e 2% para baixo respectivamente, em relação à fase A.

Os módulos e ângulos das correntes de fuga de cada para-raio, bem como o módulo e ângulo da resultante da soma vetorial das três correntes de fuga podem ser calculados pelas equações (12) a (19) a seguir.

$$I_{Ci} = U_{Fi} \cdot \omega \cdot C_i \quad (12)$$

$$I_{Ri} = \frac{U_{Fi}}{R_i} \quad (13)$$

$$I_{Fi} = \sqrt{I_{Ci}^2 + I_{Ri}^2} \quad (14)$$

$$A'_{Fi} = \tan^{-1} \left(\frac{I_{Ci}}{I_{Ri}} \right) + A_{Ui} \quad (15)$$

$$A_{Fi} = A'_{Fi} - A'_{F1} \quad (16)$$

$$I_S = \sqrt{ \left(\sum_{i=1}^3 I_{Fi} \cdot \cos(A_{Fi}) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^3 I_{Fi} \cdot \sin(A_{Fi}) \right)^2 } \quad (18)$$

$$A_S = \tan^{-1} \left(\sum_{i=1}^3 I_{Fi} \cdot \sin(A_{Fi}) / \sum_{i=1}^3 I_{Fi} \cdot \cos(A_{Fi}) \right) \quad (19)$$

Onde:

- i é o número da fase, de 1 a 3 (representando as fases A, B e C)
- I_{Ci} é a componente capacitiva da corrente de fuga da fase i
- I_{Ri} é a componente resistiva da corrente de fuga da fase i
- U_{Fi} é a tensão fase-terra da fase i
- ω é a frequência angular das tensões fase-terra (igual a $2 \cdot \pi \cdot f$)
- C_i é capacitância equivalente do para-raio da fase i
- R_i é a resistência equivalente do para-raio da fase i
- I_{Fi} é a corrente de fuga total da fase i
- A_{Ui} é o ângulo de defasagem da tensão fase-terra da fase i adotando como referência o ângulo da tensão fase-terra da fase A

- A'_{Fi} é o ângulo de defasagem da corrente de fuga total da fase i adotando como referência o ângulo da tensão fase-terra da fase A
- A_{Fi} é o ângulo de defasagem da corrente de fuga total da fase i adotando como referência os ângulos da corrente de fuga da fase A
- I_S é a corrente somatória, correspondente à soma vetorial das correntes de fuga totais dos para-raios das três fases
- A_S é o ângulo de defasagem da corrente somatória adotando como referência o ângulo da corrente de fuga da fase A.

A combinação das características do sistema elétrico e dos parâmetros dos para-raios, acima descritos, produz como resultado as correntes de fuga indicadas na Tabela 27 abaixo, calculadas utilizando as equações (12) a (19).

Tabela 27 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes das condições iniciais de simulação

	Fase A	Fase B	Fase C
Componente capacitiva da corrente de fuga	1,600 mA	1,468 mA	1,353 mA
Componente resistiva da corrente de fuga	0,051 mA	0,046 mA	0,043 mA
Corrente de fuga total	1,601 mA	1,469 mA	1,354 mA
Ângulo da corrente de fuga total em relação à tensão da fase A	88,187 °	328,204 °	208,199 °
Ângulo da corrente de fuga total em relação à corrente total da fase A	0,000 °	240,017 °	120,012 °
Soma vetorial das três correntes de fuga totais	0,214 mA		
Ângulo da corrente somatória	-27,9 °		

Para as simulações de detecção de defeitos nos para-raios por meio da técnica da soma vetorial de correntes, apresentadas a seguir, serão utilizados os mesmos defeitos hipotéticos detalhados nos itens 5.3.2.

6.3.2. Simulação 1 – Blocos de ZnO alterados ou entrada de umidade

Conforme demonstrado no item 5.3.2.1, os blocos de ZnO dos para-raios podem sofrer alterações de sua resistência devido a estresses por descargas com energia superior ao seu limite de projeto, redução de oxigênio nas bordas e outros fatores.

Em duas simulações realizadas, uma com redução de 30% na resistência de cerca de metade dos blocos do para-raio (35 blocos) e outro com redução de 70% da resistência de 10% dos blocos (7 blocos), foram obtidas reduções da resistência equivalente de 18,5% e 19,7%, respectivamente, sem alteração apreciável na capacitância equivalente do para-raio.

Num outro cenário, demonstrado no item 5.3.2.2, ocorre a entrada de umidade no para-raios, com efeito similar de redução na sua resistência equivalente, tendo sido simulada uma redução de 20%.

Ambos os cenários são representados a seguir por uma redução de 20% na resistência equivalente do para-raio da fase C, de forma que as características dos para-raios usadas na simulação, antes e depois da alteração, são as mostradas na Tabela 28 abaixo.

Tabela 28 – Parâmetros elétricos dos para-raios considerando redução de 20% na resistência equivalente do para-raio da fase C

		Fase A	Fase B	Fase C
Capacitância	Inicial	17,5 pF	15,9 pF	15,1 pF
	Nova	17,5 pF	15,9 pF	15,1 pF
Resistência	Inicial	4788 MΩ	5320 MΩ	5586 MΩ
	Nova	4788 MΩ	5320 MΩ	4468,8 MΩ

Os novos valores de correntes e ângulos, calculados de acordo com as equações (12) a (19) são os mostrados na Tabela 29 a seguir.

Tabela 29 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de redução de 20% na resistência do para-raio da fase C

	Valores iniciais			Valores novos		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Ifuga capacitiva (mA)	1,600	1,468	1,353	1,600	1,468	1,353
Ifuga resistiva (mA)	0,051	0,046	0,043	0,051	0,046	0,053
Ifuga total (mA)	1,601	1,469	1,354	1,601	1,469	1,354
Ângulo de Ifuga ref. tensão (°)	88,187	328,204	208,199	88,187	328,204	207,749
Ângulo de Ifuga ref. I fase A (°)	0,000	240,017	120,012	0,000	240,017	119,562
Soma vetorial (mA)		0,214			0,220	
Ângulo da soma (°)		-27,9			-25,5 °	

A partir dos resultados mostrados na Tabela 29 se observa, na fase C, que a componente capacitiva da corrente de fuga não se altera, conforme esperado, porém o mesmo ocorre com a corrente de fuga total, apesar de estar apresentada com 3 casas decimais (resolução de 1 μ A), devido à predominância da componente capacitiva sobre a resistiva. O ângulo da corrente de fuga total se altera apenas ligeiramente, com redução de 0,45 °.

Este fato ilustra com bastante clareza a baixa sensibilidade que se obteria na detecção de alterações na resistência equivalente se apenas as medições de correntes de fuga totais fossem utilizadas.

Por outro lado, a medição da corrente somatória apresenta alteração mensurável, de 0,214 mA para 0,220 mA, além de mudança de 2,4 ° no seu ângulo, o que comprova o aumento de sensibilidade proporcionado pelo método.

A Figura 25 a seguir apresenta de forma gráfica a variação observada na corrente somatória. Nessa figura as correntes de fuga totais são apresentadas propositalmente fora de escala (menores do que são na realidade), a fim de facilitar a visualização da somatória. As

variações ocorridas no ângulo e módulo da corrente da fase C são muito pequenas para serem visualizadas adequadamente.

Foi adotada a corrente de fuga total da fase A como referência para a medição de todos os demais ângulos, visto que na aplicação prática as medições de tensões não estão disponíveis. As tensões fase-terra são mostradas também sem escala, apenas para visualização de suas posições relativas em relação às correntes, que estão adiantadas em aproximadamente 90° por serem predominantemente capacitivas.

Figura 25 – Correntes de fuga totais e corrente somatória para a condição inicial (vermelho) e após redução da resistência equivalente do para-raio da fase C

A Figura 26 a seguir apresenta um detalhe muito ampliado da corrente somatória antes e depois da redução da resistência equivalente do para-raio da fase C, além de demonstrar o vetor alteração $I_{ALTERAÇÃO}$, que é calculado de acordo com a equação (20), correspondendo à diferença vetorial de $I_{SOMA NOVO}$ e $I_{SOMA ORIGINAL}$.

Figura 26 – Detalhe ampliado da variação na corrente somatória devido à redução da resistência equivalente do para-raio da fase C

$$\dot{I}_{ALTERAÇÃO} = \dot{I}_{SOMA NOVO} - \dot{I}_{SOMA ORIGINAL} \quad (20)$$

Onde:

$\dot{I}_{ALTERAÇÃO}$ é o vetor que representa a alteração vetorial ocorrida na corrente somatória

$\dot{I}_{SOMA NOVO}$ é o novo valor assumido pelo vetor da corrente somatória, após alterações nos parâmetros dos para-raios

$\dot{I}_{SOMA ORIGINAL}$ é o valor original do vetor da corrente somatória, obtido durante o período de aprendizado inicial do sistema de monitoração.

O vetor alteração $\dot{I}_{ALTERAÇÃO}$ tem módulo de 10,6 μA e ângulo 31,8°, o que o posiciona no intervalo entre os ângulos da tensão da fase C (aproximadamente 30°, sempre tomando como referência a corrente de fuga da fase A) e a corrente de fuga total da fase C (aproximadamente 120°), o que indica ao sistema de monitoração que a alteração detectada foi causada pela fase C.

A decomposição de $\dot{I}_{ALTERAÇÃO}$ em dois vetores ortogonais entre si, um em fase com a tensão da fase C e outro em fase com a corrente total da fase C fornece as contribuições, respectivamente, da alteração da resistência equivalente e da alteração da capacitância equivalente para a alteração verificada na corrente somatória.

No caso sob análise, o vetor alteração encontra-se praticamente em fase com a tensão da fase C e ortogonal à corrente de fuga da fase C, de forma que sua decomposição resultará em uma componente nula em fase com a corrente de fuga, indicando contribuição nula de

alterações da capacitância da fase C, e uma componente em fase com a tensão praticamente igual ao próprio vetor alteração.

A componente do vetor alteração em fase com a tensão da fase terá, portanto, módulo de aproximadamente 10,6 μA , que comparado à componente resistiva da corrente de fuga da fase C, com valor 53 μA , representa a redução da resistência equivalente, como demonstra a equação (21):

$$R_{EQC} = 10,6/53 \cdot 5586 = 4468,8 \text{ M}\Omega \quad (21)$$

Onde:

R_{EQC} é o novo valor da resistência equivalente do para-raio da fase C, calculada a partir das medições de correntes de fuga e corrente somatória do sistema de monitoração.

O resultado obtido coincide com o valor utilizado no início das simulações do método de soma vetorial das correntes de fuga (4468,8 M Ω), conforme indicado anteriormente na Tabela 28.

Portanto, o resultado das simulações realizadas indica que esse método de medição é capaz de monitorar corretamente, em tempo real, as alterações ocorridas na resistência equivalente de um para-raio em um conjunto trifásico.

6.4. Simulações de medições por soma vetorial em para-raios SiC

Para as simulações de uso da técnica de soma vetorial das correntes de fuga em para-raios de SiC serão usados como base os parâmetros equivalentes já utilizados no item 5.3.1 como representativos de um para-raio em bom estado com classe de tensão 138 kV.

6.4.1. Condições iniciais da simulação

Será utilizado como referência para as simulações o para-raio identificado como B1 na referência (6), que apresentou resultados satisfatórios em todos os ensaios realizados e também foi encontrado em bom estado interno após sua desmontagem. Os valores de

capacitância e resistência equivalentes calculados para esse para-raio a partir das medições de correntes de fuga são os mostrados na Tabela 6.

Os parâmetros iniciais de simulação do para-raio da fase A serão exatamente os valores já utilizados no item 5.3.1. Para o para-raio da fase B foram introduzidas variações arbitrárias de 10% para cima na capacitância equivalente e 10% para baixo na resistência equivalente, enquanto para a fase C as variações foram arbitradas em 5 % para baixo na capacitância e 5% para cima na resistência.

As variações arbitrárias introduzidas têm por objetivo simular as diferenças normais existentes entre os para-raios, mesmo que sejam de mesmo fabricante, modelo e lote. Os valores iniciais adotados para as três fases são mostrados na Tabela 30 abaixo.

Tabela 30 – Parâmetros elétricos iniciais de para-raio de SiC em bom estado utilizados para simulação

	Fase A	Fase B	Fase C
Capacitância inicial	9,3 pF	10,23 pF	8,84 pF
Resistência inicial	934 MΩ	840,6 MΩ	980,7 MΩ

Para as simulações, considera-se que os três para-raios acima estão conectados às três fases de um sistema elétrico com as características mostradas na Tabela 31.

Considera-se na simulação que, inicialmente, o sistema apresenta exatamente os valores de tensões fase-terra mostrados nessa tabela, podendo variar ao longo da simulação conforme indicado.

Como se pode observar, foram introduzidas variações arbitrárias nas tensões das fases A e B, com o objetivo de simular um leve desbalanço entre as tensões fase-terra do sistema, de 1 % para cima e 2% para baixo respectivamente, em relação à fase C.

Tabela 31 – Características do sistema elétrico ao qual estão conectados os para-raios de SiC para simulação

	Fase A	Fase B	Fase C
Frequência	60 Hz		
Ângulos de defasagem	0 °	240 °	120 °
Tensão nominal fase-fase	138 kV		
Tensão nominal fase-terra	79,68 kV		
Tensão efetiva fase-terra	80,47 kV	78,08 kV	79,68 kV

Os módulos e ângulos das correntes de fuga de cada para-raio, bem como o módulo e ângulo da resultante da soma vetorial das três correntes de fuga podem ser calculados pelas equações (12) a (19) mostradas no item 6.3.1.

A combinação das características do sistema elétrico e dos parâmetros dos para-raios, acima descritos, produz como resultado as correntes de fuga indicadas na Tabela 32, calculadas utilizando as equações (12) a (19).

Tabela 32 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes das condições iniciais de simulação

	Fase A	Fase B	Fase C
Componente capacitiva da corrente de fuga	0,282 mA	0,301 mA	0,266 mA
Componente resistiva da corrente de fuga	0,086 mA	0,093 mA	0,081 mA
Corrente de fuga total	0,295 mA	0,315 mA	0,278 mA
Ângulo da corrente de fuga total em relação à tensão da fase A	73,019 °	312,857 °	192,988 °
Ângulo da corrente de fuga total em relação à corrente total da fase A	0,000 °	239,838 °	119,969 °
Soma vetorial das três correntes de fuga totais	0,032 mA		
Ângulo da corrente somatória	266,3 °		

Para as simulações de detecção de defeitos nos para-raios por meio da técnica da soma vetorial de correntes, apresentadas a seguir, serão utilizados os mesmos defeitos hipotéticos detalhados nos itens 5.3.1.

6.4.2. Simulação 1 – Desconexão de resistores de equalização

Conforme demonstrado no item 5.3.1.1, quebras nos suportes dos resistores de equalização, quebra dos centelhadores ou outras alterações mecânicas podem causar a desconexão de um ou mais dos resistores de equalização de potencial dos centelhadores nos para-raios de SiC.

Possíveis causas para esse tipo de defeito são os esforços mecânicos causados pelos elevados campos magnéticos durante as descargas e as grandes elevações de temperatura que ocorrem nos centelhadores devido a arcos de vários kA, assim como quebras por impactos no transporte.

Em três situações simuladas, com a desconexão de um, dois ou três resistores de equalização, foram obtidas variações significativas na resistência equivalente, com elevações de 20,3 %, 51,6 % e 104,7 % respectivamente, sem alteração significativa na capacitância equivalente do para-raio em relação aos valores iniciais, antes das desconexões.

Os valores de capacitância e resistência equivalente para os 3 cenários são mostrados a seguir na Tabela 33 a seguir, juntamente com os valores iniciais antes dos defeitos, que são simulados no para-raio da fase A.

Os novos valores de correntes e ângulos, calculados de acordo com as equações (12) a (19) são os mostrados nas Tabelas 34, 35 e 36, a seguir.

Tabela 33 – Parâmetros elétricos dos para-raios considerando desconexão de um, dois ou três resistores de equalização no para-raio da fase A

		Fase A	Fase B	Fase C
Capacitância	Inicial	9,3 pF	10,23 pF	8,84 pF
	Um resistor desconectado	9,42 pF	10,23 pF	8,84 pF
	Dois resistores desconectados	9,49 pF	10,23 pF	8,84 pF
	Três resistores desconectados	9,51 pF	10,23 pF	8,84 pF
Resistência	Inicial	934 MΩ	840,6 MΩ	980,7 MΩ
	Um resistor desconectado	1123,7 MΩ	840,6 MΩ	980,7 MΩ
	Dois resistores desconectados	1415,5 MΩ	840,6 MΩ	980,7 MΩ
	Três resistores desconectados	1911,6 MΩ	840,6 MΩ	980,7 MΩ

Tabela 34 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de desconexão de um resistor de equalização no para-raio da fase A

	Valores iniciais			Valores novos		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Ifuga cap. (mA)	0,282	0,301	0,266	0,286	0,301	0,266
Ifuga res. (mA)	0,086	0,093	0,081	0,072	0,093	0,081
Ifuga total (mA)	0,295	0,315	0,278	0,295	0,315	0,278
Ângulo de Ifuga ref. tensão (°)	73,019	312,857	192,988	75,932	312,857	192,988
Ângulo de Ifuga ref. I fase A (°)	0,000	239,838	119,969	0,000	236,925	117,056
I soma (mA)	0,032		0,017			
Ângulo soma (°)	266,3		257,7			

Tabela 35 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de desconexão de dois resistores de equalização no para-raio da fase A

	Valores iniciais			Valores novos		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Ifuga cap. (mA)	0,282	0,301	0,266	0,288	0,301	0,266
Ifuga res. (mA)	0,086	0,093	0,081	0,057	0,093	0,081
Ifuga total (mA)	0,295	0,315	0,278	0,293	0,315	0,278
Ângulo de Ifuga ref. tensão (°)	73,019	312,857	192,988	78,830	312,857	192,988
Ângulo de Ifuga ref. I fase A (°)	0,000	239,838	119,969	0,000	234,027	114,158
I soma (mA)		0,032			0,006	
Ângulo soma (°)		266,3			197,6	

Tabela 36 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de desconexão de três resistores de equalização no para-raio da fase A

	Valores iniciais			Valores novos		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Ifuga cap. (mA)	0,282	0,301	0,266	0,289	0,301	0,266
Ifuga res. (mA)	0,086	0,093	0,081	0,042	0,093	0,081
Ifuga total (mA)	0,295	0,315	0,278	0,292	0,315	0,278
Ângulo de Ifuga ref. tensão (°)	73,019	312,857	192,988	81,699	312,857	192,988
Ângulo de Ifuga ref. I fase A (°)	0,000	239,838	119,969	0,000	231,159	111,289
I soma (mA)		0,032			0,015	
Ângulo soma (°)		266,3			117,4	

A partir dos resultados mostrados nas Tabelas 34, 35 e 36 se observa, na fase A, que a componente capacitiva da corrente de fuga se altera apenas levemente, de forma coerente com

as alterações muito pequenas de capacitância simuladas (da ordem de 2 % no pior caso, com três resistores de equalização desconectados), o mesmo ocorrendo com a corrente de fuga total da fase A, apesar das alterações importantes ocorridas na resistência equivalente, o que ilustra mais uma vez a baixa sensibilidade que se obteria na detecção de alterações na resistência equivalente se apenas as medições de correntes de fuga totais fossem utilizadas.

Devido às alterações de grande porte na resistência equivalente da fase A, o ângulo de sua corrente de fuga total apresenta alterações significativas, com elevações de $2,9^\circ$ para um resistor, $5,8^\circ$ para dois resistores e $8,7^\circ$ para três resistores desconectados.

As medições da somatória das correntes apresentam alterações importantes, chegando a mudar de quadrante no caso mais extremo, com três resistores desconectados, comprovando a sensibilidade proporcionada ao método pela sua utilização na monitoração dos parâmetros elétricos dos para-raios.

As alterações ocorridas na corrente somatória são mais bem visualizadas na Figura 27 a seguir, que apresenta de forma gráfica sua evolução da condição inicial para as situações de desconexão de um, dois e três resistores de equalização. Nessa figura as correntes de fuga totais são apresentadas propositalmente fora de escala (menores do que são na realidade), a fim de facilitar a visualização da somatória. As variações ocorridas no ângulo e módulo da corrente da fase A são muito pequenas para serem visualizadas adequadamente.

Foi adotada a corrente de fuga total da fase A como referência para a medição de todos os demais ângulos, visto que na aplicação prática as medições de tensões não estão disponíveis. As tensões fase-terra são mostradas também sem escala, apenas para visualização de suas posições relativas em relação às correntes, que estão adiantadas em aproximadamente 90° por serem predominantemente capacitivas.

A Figura 28 a seguir apresenta em detalhes a corrente somatória antes e depois da redução da resistência equivalente do para-raio da fase A para os três cenários simulados, bem como os vetores alteração correspondentes $I_{\text{ALTERAÇÃO } 1R}$ (desconexão de um resistor), $I_{\text{ALTERAÇÃO } 2R}$ (desconexão de dois resistores), $I_{\text{ALTERAÇÃO } 3R}$ (desconexão de três resistores), que são calculados de acordo com a equação (20), já apresentada no item 6.3.2.

Figura 27 – Tensões fase-terra, correntes de fuga totais e somatória para a condição inicial (vermelho) e após desconexão de um, dois ou três resistores de equalização na fase A

Figura 28 – Detalhes da variação na corrente somatória devido às alterações da resistência equivalente do para-raio da fase A

O vetor alteração $I_{ALTERAÇÃO}$ tem módulos de $15 \mu A$, $30 \mu A$ e $45 \mu A$, sempre com ângulo de $96,1^\circ$, o que o posiciona de forma invertida (girado em 180°) no intervalo entre os ângulos da tensão da fase A (aproximadamente -90° , sempre tomando como referência a corrente de fuga da fase A) e a corrente de fuga total da fase A (0° , por ser a referência adotada), o que indica ao sistema de monitoração que a alteração detectada foi causada pela fase A.

A decomposição de $I_{ALTERAÇÃO}$ em dois vetores ortogonais entre si, um em fase com a tensão da fase A e outro em fase com a corrente total da fase A fornece as contribuições, respectivamente, da alteração da resistência equivalente e da alteração da capacitância equivalente para a alteração verificada na corrente somatória.

No caso sob análise, essa decomposição resulta nos valores calculados de capacitância e resistência equivalentes mostradas na Tabela 37 abaixo.

Tabela 37 – Resultados das simulações de monitoração pela somatória de correntes para desconexão de um, dois ou três resistores de equalização no para-raio da fase A

		Valor esperado	Valor indicado	Erro
Capacitância	Um resistor desconectado	9,42 pF	9,41 pF	-0,2 %
	Dois resistores desconectados	9,49 pF	9,47 pF	-0,2 %
	Três resistores desconectados	9,51 pF	9,49 pF	-0,3 %
Resistência	Um resistor desconectado	1123,7 M Ω	1112,1 M Ω	-1,0 %
	Dois resistores desconectados	1415,5 M Ω	1375,9 M Ω	-2,8 %
	Três resistores desconectados	1911,6 M Ω	1803,8 M Ω	-5,6 %

Os resultados obtidos apresentam boa coerência com os valores esperados, utilizados no início das simulações, com erros de até 5,6% para as resistências equivalentes e 0,3% para as capacitâncias equivalentes, como indicado na Tabela 37.

Os erros obtidos são considerados aceitáveis, pois são bastante inferiores às variações que se deseja detectar, causadas por defeitos nos para-raios, que no caso simulado são superiores a 100 % para a resistência e 2 % para a capacitância.

Portanto, o resultado das simulações realizadas indica que esse método de medição é capaz de monitorar corretamente, em tempo real, as alterações ocorridas na resistência equivalente de um para-raio em um conjunto trifásico.

6.4.3. Simulação 2 – Resistores de equalização alterados

A degradação dos resistores de equalização, empregados nos para-raios de SiC para equalização do potencial entre seus centelhadores, pode levar à alteração de sua curva V-I,

conforme demonstrado no item 5.3.1.2, o que se reflete em alterações nas constantes k e/ou n da equação (10).

No caso estudado no item 5.3.1.2, o para-raio B5 da referência (6) apresentou elevação de 20 % na constante n e redução de 80 % em k do resistor de equalização 5, variações essas causadas provavelmente pelos estresses descritos acima, já que não foram encontrados sinais de umidade na desmontagem desse para-raio.

Essas degradações implicam em alterações na impedância dos resistores de equalização, o que se reflete ao final em alterações na resistência equivalente do para-raio.

No item 5.3.1.2 são simulados dois cenários de alteração em um dos resistores de equalização do para-raio, com reduções de 40 % e 80 % na resistência. Os efeitos observados são reduções de 9,4 % e 25,4 % na resistência equivalente, respectivamente, com apenas leves alterações na capacitância equivalente do para-raio, de 0,5 % e 7,5 %, em relação aos valores iniciais.

Os valores de capacitância e resistência equivalente para os dois cenários são mostrados a seguir na Tabela 38, juntamente com os valores iniciais antes dos defeitos, que são simulados nesse caso no para-raio da fase C aplicando as reduções percentuais citadas sobre o valor inicial da resistência.

Tabela 38 – Parâmetros elétricos dos para-raios considerando alterações de 40% e 80% em um resistor de equalização no para-raio da fase C

		Fase A	Fase B	Fase C
Capacitância	Inicial	9,3 pF	10,23 pF	8,84 pF
	Redução de 40 % no resistor de equalização	9,3 pF	10,23 pF	8,88 pF
	Redução de 80 % no resistor de equalização	9,3 pF	10,23 pF	9,5 pF
Resistência	Inicial	934 MΩ	840,6 MΩ	980,7 MΩ
	Redução de 40 % no resistor de equalização	934 MΩ	840,6 MΩ	888,5 MΩ
	Redução de 80 % no resistor de equalização	934 MΩ	840,6 MΩ	731,6 MΩ

Os novos valores de correntes e ângulos, calculados de acordo com as equações (12) a (19) são os mostrados nas Tabelas 39 e 40 a seguir.

Tabela 39 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de alteração de 40% em um resistor de equalização no para-raio da fase C

	Valores iniciais			Valores novos		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Ifuga cap. (mA)	0,282	0,301	0,266	0,282	0,301	0,267
Ifuga res. (mA)	0,086	0,093	0,081	0,086	0,093	0,090
Ifuga total (mA)	0,295	0,315	0,278	0,295	0,315	0,281
Ângulo de Ifuga ref. tensão (°)	73,019	312,857	192,988	73,019	312,857	191,418
Ângulo de Ifuga ref. I fase A (°)	0,000	239,838	119,969	0,000	236,925	118,399
I soma (mA)		0,032			0,025	
Ângulo soma (°)		266,3			276,5	

Tabela 40 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de alteração de 80% em um resistor de equalização no para-raio da fase C

	Valores iniciais			Valores novos		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Ifuga cap. (mA)	0,282	0,301	0,266	0,282	0,301	0,285
Ifuga res. (mA)	0,086	0,093	0,081	0,086	0,093	0,109
Ifuga total (mA)	0,295	0,315	0,278	0,295	0,315	0,305
Ângulo de Ifuga ref. tensão (°)	73,019	312,857	192,988	73,019	312,857	189,111
Ângulo de Ifuga ref. I fase A (°)	0,000	239,838	119,969	0,000	239,838	116,092
I soma (mA)		0,032			0,003	
Ângulo soma (°)		266,3			38,1	

A partir dos resultados mostrados nas Tabelas 39 e 40 se observa, na fase C, que a componente capacitiva da corrente de fuga se altera apenas levemente, de forma coerente com as alterações pequenas de capacitância simuladas (7,5 % no pior caso), o mesmo ocorrendo com a corrente de fuga total da fase C, apesar das alterações importantes ocorridas na resistência equivalente, o que ilustra mais uma vez a baixa sensibilidade que se obteria na detecção de alterações na resistência equivalente se apenas as medições de correntes de fuga totais fossem utilizadas.

Devido às alterações de grande porte na resistência equivalente da fase C, o ângulo de sua corrente de fuga total apresenta alterações significativas, com reduções de $1,6^\circ$ para a alteração de 40 % no resistor de equalização e $3,9^\circ$ para a alteração de 40 %.

As medições da somatória das correntes apresentam alterações importantes, chegando a mudar de quadrante no caso mais extremo, comprovando a sensibilidade proporcionada ao método pela sua utilização na monitoração dos parâmetros elétricos dos para-raios.

As alterações ocorridas na corrente somatória são mais bem visualizadas na Figura 29 a seguir, que apresenta de forma gráfica sua evolução da condição inicial para as situações de alteração de 40 % e 80 % em um resistor de equalização. Nessa figura as correntes de fuga totais são apresentadas propositalmente fora de escala (menores do que são na realidade), a fim de facilitar a visualização da somatória. As variações ocorridas no ângulo e módulo da corrente da fase C são muito pequenas para serem visualizadas adequadamente.

No cenário de alteração de 80 % no resistor de equalização as correntes de fuga totais chegam muito próximas a uma condição de equilíbrio, em que a corrente somatória seria anulada. Nesse caso, a somatória tem módulo de apenas $3 \mu\text{A}$ com ângulo de $38,1^\circ$, tornando um pouco mais difícil sua visualização na Figura 29.

Figura 29 – Tensões fase-terra, correntes de fuga totais e corrente somatória para a condição inicial (vermelho) e após alteração de 40 % e 80 % em um resistor de equalização no para-raio da fase C

Foi adotada a corrente de fuga total da fase A como referência para a medição de todos os demais ângulos, visto que na aplicação prática as medições de tensões não estão disponíveis. As tensões fase-terra são mostradas também sem escala, apenas para visualização de suas posições relativas em relação às correntes, que estão adiantadas em aproximadamente 90° por serem predominantemente capacitivas.

A Figura 30 a seguir apresenta em detalhes a corrente somatória antes e depois das alterações em um resistor de equalização do para-raio da fase C para os dois cenários simulados, bem como os vetores alteração correspondentes $I_{\text{ALTERAÇÃO } 40\%}$ (alteração de 40 % no resistor de equalização) e $I_{\text{ALTERAÇÃO } 80\%}$ (alteração de 80 % no resistor de equalização), que são calculados de acordo com a equação (20), já apresentada no item 6.3.2.

Figura 30 – Detalhes da variação na corrente somatória devido às alterações no resistor de equalização do para-raio da fase C

O vetor alteração $I_{ALTERAÇÃO 40\%}$ tem módulo de $8,5 \mu A$ com ângulo de $55,1^\circ$, o que o posiciona no intervalo entre os ângulos da tensão da fase C (aproximadamente 30° , sempre tomando como referência a corrente de fuga da fase A) e a corrente de fuga total da fase C (aproximadamente 120°), o que indica ao sistema de monitoração que a alteração detectada foi causada pela fase C.

A decomposição de $I_{ALTERAÇÃO 40\%}$ em dois vetores ortogonais entre si, um em fase com a tensão da fase C e outro em fase com a corrente total da fase C fornece as contribuições, respectivamente, da alteração da resistência equivalente e da alteração da capacitância equivalente para a alteração total verificada na corrente somatória. Vale observar que, apesar de muito pequeno (cerca de $0,5\%$), o aumento da capacitância da fase C influi significativamente na corrente somatória, devido à predominância das componentes capacitivas nas correntes de fuga totais, afastando significativamente o ângulo de $I_{ALTERAÇÃO 40\%}$ do ângulo da componente resistiva (30°) e fazendo-o inclinar-se em direção ao ângulo da componente capacitiva (120°).

O vetor alteração $I_{ALTERAÇÃO 80\%}$ tem módulo de $34 \mu A$ com ângulo de $82,6^\circ$, o que o posiciona também no intervalo entre os ângulos da tensão da fase C e a corrente de fuga total da fase C, o que indica ao sistema de monitoração que a alteração detectada foi causada pela fase C.

Como o vetor $I_{ALTERAÇÃO 80\%}$ é gerado por um aumento mais significativo da capacitância da fase C ($7,5\%$), apesar da redução da resistência ser também um pouco maior ($25,4\%$), seu ângulo tende mais fortemente ao ângulo da componente capacitiva da corrente de fuga (120°) total.

No caso sob análise, essa decomposição resulta nos valores calculados de capacitância e resistência equivalentes mostradas na Tabela 41.

Tabela 41 – Resultados das simulações de monitoração de capacitância e resistência equivalentes pela somatória de correntes para alterações de 40% e 80% em um resistor de equalização no para-raio da fase C

		Valor esperado	Valor indicado	Erro
Capacitância	Redução de 40 % no resistor de equalização	8,88 pF	8,95 pF	0,8 %
	Redução de 80 % no resistor de equalização	9,5 pF	9,7 pF	2,1 %
Resistência	Redução de 40 % no resistor de equalização	888,5 MΩ	892,6 MΩ	0,5 %
	Redução de 80 % no resistor de equalização	731,6 MΩ	743,1 MΩ	1,6 %

Os resultados obtidos apresentam boa coerência com os valores esperados, utilizados no início das simulações, com erros de até 1,6 % para as resistências equivalentes e 2,1 % para as capacitâncias equivalentes, conforme indicado na Tabela 41.

Os erros obtidos são considerados aceitáveis, pois são bastante inferiores às variações que se deseja detectar, causadas por defeitos nos para-raios, que no caso simulado são superiores a 25 % para a resistência e 7,5 % para a capacitância.

Portanto, o resultado das simulações realizadas indica que o esse método de medição é capaz de monitorar corretamente, em tempo real, as alterações ocorridas na capacitância e na resistência equivalentes de um para-raio em um conjunto trifásico.

6.4.4. Simulação 3 – Módulo centelhador em curto-circuito

Os intensos campos magnéticos durante as descargas dos para-raios, assim como as elevadas temperaturas a que são submetidos os centelhadores devido às correntes de arco de vários kA, submetem o conjunto dos centelhadores a severos esforços mecânicos, o mesmo ocorrendo devido a impactos no transporte.

Conforme demonstrado no item 5.3.1.3, danos mecânicos aos conjuntos de centelhadores podem levar não apenas à desconexão acidental de seus resistores de equalização, mas também fazer com que um ou mais centelhadores entrem em curto-circuito, devido à quebra ou deslocamento dos espaçadores isolantes dos centelhadores.

Por outro lado, o curto-circuito de um ou mais centelhadores faz com que os centelhadores restantes, inicialmente em bom estado, tenham que suportar em menor número a totalidade da tensão fase-terra, submetendo permanentemente seus resistores de equalização a tensões superiores àsquelas para as quais foram projetados. O sobreaquecimento pelo excesso de potência dissipada pode provocar, então, alterações nesses resistores.

Essa seqüência de eventos é simulada no item 5.3.1.3 através de três cenários:

- O primeiro com o curto-circuito de um centelhador;
- O segundo, que é a evolução do primeiro, com o curto-circuito de dois centelhadores; e
- O terceiro, que é a evolução do segundo, em que três resistores de equalização nos centelhadores que não estão em curto alteram seus valores, dois com redução de 80 % e um com redução de 70 %.

Os valores de capacitância e resistência equivalente para esses 3 cenários são mostrados a seguir na Tabela 42 a seguir, juntamente com os valores iniciais antes dos defeitos, que são simulados no para-raio da fase B.

Tabela 42 – Parâmetros elétricos dos para-raios considerando curto-circuito de um e dois centelhadores e alteração de três resistores de equalização no para-raio da fase B

		Fase A	Fase B	Fase C
Capacitância	Inicial	9,3 pF	10,23 pF	8,84 pF
	Um centelhador em curto	9,3 pF	12,28 pF	8,84 pF
	Dois centelhadores em curto	9,3 pF	15,35 pF	8,84 pF
	Dois centelhadores em curto e 3 resistores alterados	9,3 pF	17,84 pF	8,84 pF
Resistência	Inicial	934 MΩ	840,6 MΩ	980,7 MΩ
	Um centelhador em curto	934 MΩ	700,2 MΩ	980,7 MΩ
	Dois centelhadores em curto	934 MΩ	560,7 MΩ	980,7 MΩ
	Dois centelhadores em curto e 3 resistores alterados	934 MΩ	174 MΩ	980,7 MΩ

A principal distinção dessa simulação em relação às anteriores é a severidade dos defeitos no para-raio, que no pior caso apresenta variações da ordem de +75 % e -80 % na capacitância e resistência equivalentes, respectivamente.

Os novos valores de correntes e ângulos, calculados de acordo com as equações (12) a (19) são os mostrados nas Tabelas 43, 44 e 45, a seguir.

Tabela 43 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de curto-circuito de um centelhador no para-raio da fase B

	Valores iniciais			Valores novos		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Ifuga cap. (mA)	0,282	0,301	0,266	0,282	0,361	0,266
Ifuga res. (mA)	0,086	0,093	0,081	0,086	0,112	0,081
Ifuga total (mA)	0,295	0,315	0,278	0,295	0,378	0,278
Ângulo de Ifuga ref. tensão (°)	73,019	312,857	192,988	73,019	312,856	192,988
Ângulo de Ifuga ref. I fase A (°)	0,000	239,838	119,969	0,000	239,837	119,969
I soma (mA)		0,032			0,093	
Ângulo soma (°)		266,3			248,7	

Tabela 44 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de curto-circuito de dois centelhadores no para-raio da fase B

	Valores iniciais			Valores novos		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Ifuga cap. (mA)	0,282	0,301	0,266	0,282	0,452	0,266
Ifuga res. (mA)	0,086	0,093	0,081	0,086	0,139	0,081
Ifuga total (mA)	0,295	0,315	0,278	0,295	0,473	0,278
Ângulo de Ifuga ref. tensão (°)	73,019	312,857	192,988	73,019	312,871	192,988
Ângulo de Ifuga ref. I fase A (°)	0,000	239,838	119,969	0,000	239,852	119,969
I soma (mA)		0,032			0,187	
Ângulo soma (°)		266,3			244,3	

Tabela 45 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de curto-circuito de dois centelhadores e alteração de três resistores de equalização no para-raio da fase B

	Valores iniciais			Valores novos		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Ifuga cap. (mA)	0,282	0,301	0,266	0,282	0,525	0,266
Ifuga res. (mA)	0,086	0,093	0,081	0,086	0,449	0,081
Ifuga total (mA)	0,295	0,315	0,278	0,295	0,691	0,278
Ângulo de Ifuga ref. tensão (°)	73,019	312,857	192,988	73,019	289,486	192,988
Ângulo de Ifuga ref. I fase A (°)	0,000	239,838	119,969	0,000	216,467	119,969
I soma (mA)		0,032			0,434	
Ângulo soma (°)		266,3			203,1	

A partir dos resultados mostrados nas Tabelas 43, 44 e 45 se observa, na fase B, que, para os dois primeiros cenários, a componente corrente capacitiva apresenta grande variação, enquanto a componente resistiva tem variação moderada. Já para o terceiro cenário, tanto a componente capacitiva quanto a resistiva da corrente de fuga se alteram fortemente, de forma coerente com as grandes alterações de capacitância e resistência equivalentes simuladas, o que se reflete em uma grande alteração na corrente de fuga total da fase B.

Devido às alterações substanciais na resistência equivalente da fase B, no terceiro cenário o ângulo de sua corrente de fuga total apresenta também alterações significativas, com reduções de 23,4 °, devido à grande redução nos resistores de equalização que se somou aos centelhadores em curto-circuito.

Nos dois primeiros cenários as medições da somatória das correntes assumem ângulo claramente influenciado pelo grande aumento na corrente capacitiva da fase B, próximo de 240 °, além de apresentar aumento substancial de módulo.

Quando a redução da resistência equivalente se soma aos centelhadores em curto-circuito para compor o terceiro cenário observa-se um claro deslocamento da somatória causado pelo aumento da componente resistiva da fase B, que tem ângulo aproximado de 150 °, levando a

somatória a diminuir seu ângulo, que era da ordem de 240° , para cerca de 200° , aproximando-o do ângulo da corrente resistiva da fase B enquanto aumenta o seu módulo.

As alterações ocorridas na corrente somatória são mais bem visualizadas na Figura 31 abaixo, que apresenta de forma gráfica sua evolução da condição inicial para as situações de curto-circuito de um e dois centelhadores, acrescentando depois a alteração nos resistores de equalização. Nessa figura as correntes de fuga totais são apresentadas propositalmente fora de escala (menores do que são na realidade), a fim de facilitar a visualização da somatória.

Figura 31 – Tensões fase-terra, correntes de fuga totais e corrente somatória para a condição inicial (vermelho) e após curto-circuito de um e dois centelhadores e alteração nos resistores de equalização no para-raio da fase B

Foi adotada a corrente de fuga total da fase A como referência para a medição de todos os demais ângulos, visto que na aplicação prática as medições de tensões não estão disponíveis. As tensões fase-terra são mostradas também sem escala, apenas para visualização de suas posições relativas em relação às correntes, que estão adiantadas em aproximadamente 90° por serem predominantemente capacitivas.

A Figura 32 a seguir apresenta em detalhes a corrente somatória antes e depois da redução da resistência equivalente do para-raio da fase B para os três cenários simulados, bem como

os vetores alteração correspondentes $I_{\text{ALTERAÇÃO } 1\text{CC}}$ (um centelhador em curto-circuito), $I_{\text{ALTERAÇÃO } 2\text{CC}}$ (dois centelhadores em curto-circuito) e $I_{\text{ALTERAÇÃO } 2\text{CC}+3\text{R}}$ (dois centelhadores em curto-circuito e três resistores alterados), que são calculados de acordo com a equação (20), já apresentada no item 6.3.2.

Figura 32 – Detalhes da variação na corrente somatória devido às alterações da capacitância e resistência equivalentes do para-raio da fase B

Os vetores alteração $I_{\text{ALTERAÇÃO } 1\text{CC}}$ e $I_{\text{ALTERAÇÃO } 2\text{CC}}$ têm módulos de $63,2 \mu\text{A}$ e $157,7 \mu\text{A}$ com ângulos praticamente iguais de $239,8^\circ$ e $239,9^\circ$, respectivamente, o que os posiciona no intervalo entre os ângulos da tensão da fase B (aproximadamente 150° , sempre tomando como referência a corrente de fuga da fase A) e a corrente de fuga total da fase B (aproximadamente 240°), o que indica ao sistema de monitoração que a alteração detectada foi causada pela fase B.

A decomposição de $I_{\text{ALTERAÇÃO } 1\text{CC}}$ e $I_{\text{ALTERAÇÃO } 2\text{CC}}$ em dois vetores ortogonais entre si, um em fase com a tensão da fase B e outro em fase com a corrente total da fase B fornece as contribuições, respectivamente, da alteração da resistência equivalente e da alteração da capacitância equivalente para a alteração total verificada na corrente somatória. Como em ambos os cenários a alteração da capacitância equivalente foi significativa, apesar das variações na resistência também serem importantes, predominam nos vetores alteração as componentes capacitivas nas correntes de fuga totais, afastando significativamente os ângulos de $I_{\text{ALTERAÇÃO } 1\text{CC}}$ e $I_{\text{ALTERAÇÃO } 2\text{CC}}$ do ângulo da componente resistiva (150°) e fazendo-os inclinarem-se em direção ao ângulo da componente capacitiva (240°).

O vetor alteração $I_{\text{ALTERAÇÃO } 2\text{CC}+3\text{R}}$ tem módulo de $420,5 \mu\text{A}$ com ângulo de $199,2^\circ$, o que o posiciona também no intervalo entre os ângulos da tensão da fase B e da corrente de fuga total da fase B, o que indica ao sistema de monitoração que a alteração detectada foi causada ainda pela fase B.

Como o vetor $I_{\text{ALTERAÇÃO } 2\text{CC}+3\text{R}}$ é gerado pelo mesmo aumento de capacitância que causou $I_{\text{ALTERAÇÃO } 2\text{CC}}$ somado a uma redução muito grande na resistência equivalente da fase B, seu

ângulo começa a desviar-se em direção ao ângulo da componente resistiva da corrente de fuga total (150 °).

No caso sob análise, essa decomposição resulta nos valores calculados de capacitância e resistência equivalentes mostradas na Tabela 46 abaixo.

Tabela 46 – Resultados das simulações de monitoração pela somatória de correntes para curto-circuito de um e dois centelhadores e alteração nos resistores de equalização no para-raio da fase B

		Valor esperado	Valor indicado	Erro
Capacitância	Um centelhador em curto	12,28 pF	12,28 pF	0 %
	Dois centelhadores em curto	15,35 pF	15,35 pF	0 %
	Dois centelhadores em curto e 3 resistores alterados	17,84 pF	20,56 pF	15,2 %
Resistência	Um centelhador em curto	700,2 MΩ	706,3 MΩ	0,88 %
	Dois centelhadores em curto	560,7 MΩ	572,6 MΩ	2,1 %
	Dois centelhadores em curto e 3 resistores alterados	174 MΩ	217,7 MΩ	25,1 %

Nos dois primeiros cenários da simulação, com um e dois centelhadores em curto-circuito, os resultados obtidos apresentam coerência muito boa com os valores esperados, utilizados no início das simulações, com erros de até 2,1 % para as resistências equivalentes e zero para as capacitâncias equivalentes, como indicado na Tabela 46.

Para o terceiro cenário da simulação, as alterações muito grandes ocorridas nos parâmetros equivalentes de capacitância e resistência do para-raio provocam erros maiores nos resultados obtidos, da ordem de 15 % para a capacitância e 25 % para a resistência em relação aos valores teóricos esperados.

No entanto, considerando que o objetivo da monitoração em tempo real é detectar a evolução de defeitos no para-raio, e não necessariamente obter medições com grande precisão, os erros obtidos são considerados aceitáveis, pois não deixam qualquer margem a

dúvida com relação aos defeitos em evolução no para-raio nem com relação à gravidade dos mesmos.

Portanto, o resultado das simulações realizadas indica que esse método de medição é capaz de monitorar corretamente, em tempo real, as alterações ocorridas na capacitância e resistência equivalentes de um para-raio em um conjunto trifásico.

6.4.5. Simulação 4 – Entrada de umidade

A entrada de água ou mesmo de umidade nos para-raios de SiC tem efeitos deletérios capazes de gerar falhas graves nesses equipamentos, sendo reportada como uma das principais fontes de problemas, como oxidações e criação de caminhos para circulação de correntes resistivas, que trazem aquecimento e aceleram a degradação do equipamento, conforme demonstrado no item 5.3.1.4.

Esse cenário é simulado no item 5.3.1.4 como uma redução uniforme de 20 % na resistência de cada resistor de equalização, devido aos caminhos paralelos criados para circulação de corrente resistiva, o que resulta em uma redução de 20 % também na resistência equivalente do para-raio sem provocar alteração significativa na capacitância equivalente.

Os valores de capacitância e resistência equivalente para esse cenário são mostrados a seguir na Tabela 47, juntamente com os valores iniciais antes do defeito, que é simulado nesse caso no para-raio da fase C aplicando a redução percentual citada sobre o valor inicial da resistência.

Tabela 47 – Parâmetros elétricos dos para-raios considerando redução de 20% na resistência equivalente do para-raio da fase C devido à entrada de umidade

		Fase A	Fase B	Fase C
Capacitância	Inicial	9,3 pF	10,23 pF	8,84 pF
	Redução de 20 % na resistência equivalente	9,3 pF	10,23 pF	8,84 pF
Resistência	Inicial	934 MΩ	840,6 MΩ	980,7 MΩ
	Redução de 20 % na resistência equivalente	934 MΩ	840,6 MΩ	784,6 MΩ

Os novos valores de correntes e ângulos, calculados de acordo com as equações (12) a (19) são os mostrados na Tabela 48 abaixo.

Tabela 48 – Correntes de fuga e ângulos de defasagem resultantes da simulação de redução de 20% na resistência equivalente do para-raio da fase C

	Valores iniciais			Valores novos		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Ifuga cap. (mA)	0,282	0,301	0,266	0,282	0,301	0,266
Ifuga res. (mA)	0,086	0,093	0,081	0,086	0,093	0,102
Ifuga total (mA)	0,295	0,315	0,278	0,295	0,315	0,284
Ângulo de Ifuga ref. tensão (°)	73,019	312,857	192,988	73,019	312,857	189,071
Ângulo de Ifuga ref. I fase A (°)	0,000	239,838	119,969	0,000	239,838	116,053
I soma (mA)		0,032			0,021	
Ângulo soma (°)		266,3			304,7	

A partir dos resultados mostrados na Tabela 48 se observa, na fase C, que a componente capacitiva da corrente de fuga não sofre alteração, conforme esperado, e a corrente de fuga total tem alteração muito pequena, apesar da alteração importante ocorrida na resistência equivalente, o que ilustra mais uma vez a baixa sensibilidade que se obteria na detecção de alterações na resistência equivalente se apenas as medições de correntes de fuga totais fossem utilizadas.

Devido à alteração de porte ocorrida na resistência equivalente da fase C, o ângulo de sua corrente de fuga total apresenta alteração significativa, com redução de 3,9 °.

A medição da corrente somatória apresenta alteração mensurável, de 0,032 mA para 0,021 mA, além de uma grande mudança de 38,4 ° no seu ângulo, o que comprova a sensibilidade do método a variações não tão grandes nos parâmetros do para-raio.

A alteração ocorrida na corrente somatória é mais bem visualizada na Figura 33 a seguir, que apresenta de forma gráfica sua evolução da condição inicial para a situação de redução de 20 % na resistência equivalente. Nessa figura as correntes de fuga totais são apresentadas propositalmente fora de escala (menores do que são na realidade), a fim de facilitar a

visualização da somatória. As variações ocorridas no ângulo e módulo da corrente da fase C são muito pequenas para serem visualizadas adequadamente.

Foi adotada a corrente de fuga total da fase A como referência para a medição de todos os demais ângulos, visto que na aplicação prática as medições de tensões não estão disponíveis. As tensões fase-terra são mostradas também sem escala, apenas para visualização de suas posições relativas em relação às correntes, que estão adiantadas em aproximadamente 90° por serem predominantemente capacitivas.

Figura 33 – Tensões fase-terra, correntes de fuga totais e corrente somatória para a condição inicial (vermelho) e após redução de 20% na resistência equivalente do para-raio da fase C

A Figura 34 a seguir apresenta em detalhes a corrente somatória antes e depois da redução da resistência equivalente do para-raio da fase C, bem como o vetor alteração correspondente $I_{ALTERAÇÃO}$, que é calculado de acordo com a equação (20), já apresentada no item 6.3.2.

Figura 34 – Detalhes da variação na corrente somatória devido à redução de 20% na resistência equivalente do para-raio da fase C

O vetor alteração $I_{ALTERAÇÃO}$ tem módulo de 20,3 μA com ângulo de 47 °, o que o posiciona no intervalo entre os ângulos da tensão da fase C (aproximadamente 30°, sempre tomando como referência a corrente de fuga da fase A) e a corrente de fuga total da fase C (aproximadamente 120 °), o que indica ao sistema de monitoração que a alteração detectada foi causada pela fase C.

A decomposição de $I_{ALTERAÇÃO}$ em dois vetores ortogonais entre si, um em fase com a tensão da fase C e outro em fase com a corrente total da fase C fornece as contribuições, respectivamente, da alteração da resistência equivalente e da alteração da capacitância equivalente para a alteração total verificada na corrente somatória.

Nesse cenário de simulação, o vetor alteração tem ângulo próximo do ângulo da tensão da fase C, de forma que sua decomposição resultará em uma componente quase nula em fase com a corrente de fuga, indicando alteração muito pequena da capacitância da fase C, e uma componente em fase com a tensão praticamente igual ao próprio vetor alteração.

No caso sob análise, essa decomposição resulta nos valores calculados de capacitância e resistência equivalentes mostradas na Tabela 49 abaixo.

Tabela 49 – Resultados das simulações de monitoração de capacitância e resistência equivalentes pela somatória de correntes para redução de 20% na resistência equivalente do para-raio da fase C

		Valor esperado	Valor indicado	Erro
Capacitância	Redução de 20 % na resistência	8,84 pF	9,03 pF	2,1 %
Resistência	equivalente	784,6 M Ω	793,4 M Ω	1,1 %

Os resultados obtidos apresentam boa coerência com os valores esperados, utilizados no início das simulações, com erros de 1,1 % para as resistências equivalentes e 2,1 % para as capacitâncias equivalentes, conforme indicado na Tabela 49.

Os erros obtidos são considerados aceitáveis, pois são bastante inferiores à variação que se deseja detectar, causada por defeito no para-raio, que no caso simulado é de 20 % de redução na resistência, sem alteração na capacitância.

Portanto, o resultado das simulações realizadas indica que esse método de medição é capaz de monitorar corretamente, em tempo real, uma alteração moderada e de forma isolada na resistência equivalente de um para-raio em um conjunto trifásico.

7. RESULTADOS ESPERADOS COM O NOVO MÉTODO

Conforme demonstrado no item 5.3, é esperado, com base nos dados de ensaios disponíveis, na modelagem elétrica dos para-raios e nas simulações realizadas, que os principais tipos de defeitos observados em para-raios possam ser detectados com a monitoração em tempo real de alterações nos seus parâmetros capacitância equivalente e resistência equivalente, proposta de forma inovadora nesse trabalho.

Isso é mostrado de forma resumida na Tabela 50 abaixo para os para-raios de SiC e na Tabela 51 a seguir para os de ZnO.

Nas tabelas são usadas as seguintes convenções:

- Parâmetro afetado pelo defeito
- ↑ Tendência de elevação no parâmetro
- ↓ Tendência de redução no parâmetro

Como pode ser observado nas tabelas, o emprego dessa técnica apresenta vantagens esperadas em relação aos métodos atualmente empregados para monitoração desses equipamentos, principalmente a medição de terceira harmônica da corrente de fuga, que não é sensível a defeitos que não influenciam os harmônicos da corrente, mas apenas sua componente fundamental.

Tabela 50 – Tipos de defeitos em para-raios de SiC detectáveis pela técnica de monitoração proposta

Tipo de defeito	Parâmetro afetado	
	Capacitância	Resistência
Desconexão de resistores de equalização		●↑
Alteração de resistores de equalização		●↓
Centelhadores em curto-circuito	●↑	●↓
Perda de estanqueidade e entrada de umidade		●↓
Componentes desconectados	●↓	
Alterações nos blocos de SiC		

Tabela 51 – Tipos de defeitos em para-raios de ZnO detectáveis pela técnica de monitoração proposta

Tipo de defeito	Parâmetro afetado	
	Capacitância	Resistência
Perda de estanqueidade e entrada de umidade		●↓
Componentes desconectados	●↓	
Alteração nos blocos de ZnO por I de descarga		●↓
Alteração nos blocos de ZnO por redução de O ₂		●↓

Na Tabela 50 pode ser observada também a principal limitação da técnica no caso de para-raios de SiC, que é a dificuldade em detectar alterações nos blocos de SiC, pelo fato da resistência dos mesmos ser muito baixa em comparação com a dos resistores de equalização, de forma que as alterações provocadas na corrente de fuga são imperceptíveis, exceto em caso de desconexão completa dos blocos. Tal dificuldade é compartilhada por outros métodos de diagnóstico, como a medição de terceiro harmônico e a termovisão, cujas medições, quando empregadas, estão relacionadas aos resistores de equalização, e não aos blocos de SiC.

Ajuda a mitigar essa deficiência, no entanto, o fato de que uma grande parte dos problemas em para-raios de SiC ter origem na falha de estanqueidade e entrada de umidade, que afeta igualmente os resistores de equalização, sendo detectada dessa maneira.

Já na aplicação do método em para-raios de ZnO não existem limitações desse tipo, conforme Tabela 51, visto que todos os modos de falha listados são detectados de forma eficiente.

Por outro lado, as simulações realizadas nos itens 6.3 e 6.4 demonstraram que é viável a monitoração dos parâmetros capacitância equivalente e resistência equivalente dos para-raios em tempo real, utilizando-se a técnica de somatória vetorial das correntes de fuga de três para-raios em um conjunto trifásico, o que abre grandes possibilidades para a aplicação dessa técnica nas concessionárias de energia elétrica, criando meios para que sejam atendidas as necessidades e atingidos os objetivos citados nos itens 1.3 e 1.4 deste trabalho.

8. CONCLUSÕES

A proposta apresentada neste trabalho, de uma nova técnica de diagnóstico de estado de para-raios em sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica, baseada na monitoração em tempo real dos parâmetros elétricos capacitância equivalente e resistência equivalente, fornece uma alternativa eficaz para a detecção dos principais modos de falha encontrados nesses equipamentos.

Ademais, essa nova metodologia de diagnóstico mostra-se vantajosa em comparação com as técnicas atualmente utilizadas para esse fim, visto que é esperada sensibilidade a modos de falha que não são detectáveis pelos métodos existentes, evitando assim a ocorrência de falhas em para-raios que não seriam evitadas pelo estado da arte vigente até então.

Por conseguinte, essa contribuição pode trazer grandes benefícios para a confiabilidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica para a sociedade, cada vez mais dependente dessa forma de energia.

Um importante benefício da técnica apresentada é a possibilidade de aplicação não apenas em para-raios de tecnologia óxido de zinco, atualmente o estado da arte nessa área, mas também na grande quantidade de para-raios de carboneto de silício ainda em operação nas concessionárias de energia elétrica, que precisam ter seu estado diagnosticado até mesmo para permitir a priorização de substituições, visto que muitos já ultrapassaram o tempo de vida para o qual foram projetados.

Outra contribuição desse trabalho é a demonstração da viabilidade de utilização da técnica de soma vetorial das correntes de fuga para monitoração de capacitância e resistência equivalente dos para-raios, de forma a ultrapassar o plano apenas teórico e viabilizar técnica e economicamente a monitoração em tempo real desses equipamentos. Essa técnica não foi objeto de desenvolvimento nesse trabalho, visto que já está disponível e é utilizada atualmente para monitoração de buchas capacitivas, porém seu emprego nessa aplicação é inovador.

9. TRABALHOS FUTUROS

As seguintes etapas são sugeridas para a expansão do trabalho aqui apresentado, visando concretizar sua utilização prática nas concessionárias de energia elétrica e com isso auferir de fato seus benefícios:

- (a) Realização de ensaios em laboratório com para-raios de SiC e ZnO, tanto em bom estado quanto defeituosos com os vários modos de falha previstos no item 5.3, com a utilização do método proposto de diagnóstico pela capacitância e resistência equivalentes do para-raios associado à técnica de soma vetorial de correntes para monitoração em tempo real desses parâmetros. Simultaneamente, devem ser aplicadas também as técnicas atuais de diagnóstico, para fins de comparação;
- (b) Realização de testes em campo com a monitoração em tempo real dos parâmetros capacitância e resistência equivalentes de para-raios de SiC e ZnO, utilizando a técnica de monitoração contínua pela soma vetorial de correntes de fuga.

Deve ser observado que a realização dessas etapas depende de viabilização financeira, dados os custos envolvidos, incluindo horas de uso de laboratórios e instrumentos e os custos dos para-raios usados nos testes, considerando os riscos de danos durante ensaios e manipulação.

Além disso, a viabilidade da etapa (b) depende de trabalho em conjunto com concessionárias de energia elétrica, a fim de viabilizar o acesso às instalações e aos para-raios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **IEEE C62.22-2009** IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems. 2009.
- (2) LAT, M., KORTSCHINSKI, J., Application Guide for Surge Arresters and Field Research of Lightning Effects on Distribution Systems. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 10., 1989, Brighton. **Anais. CIRED 1989**, 1989.
- (3) KIM, J. et al, An investigation of aging characteristics of polymer housed distribution surge arresters by accelerated aging test. ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION DIELECTRIC PHENOMENA. 2008, Quebec. **Proceedings. CEIDP 2008**, 2008.
- (4) SAKSHAUG, E. C., A Brief History of AC Surge Arresters. **IEEE Power Engineering Review**, v.11, p. 11-13, 40, Aug. 1991.
- (5) IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. **IEEE C62.1-1989** IEEE Standard for Gapped Silicon-Carbide Surge Arresters for AC Power Circuits. 1989.
- (6) ZANOTTI JÚNIOR, Milton. **Contribuição à metodologia de avaliação dos pára-raios do sistema de transmissão de energia elétrica**. 2009. 187f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- (7) BACEGA, W. et al, Diagnóstico do Estado dos Para-raios em Operação no Sistema de Transmissão. CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 5. 2009, Belém. **Anais. V CITENEL**, 2009.
- (8) HINRICHSSEN, V., **Metal-Oxide Surge Arrester Fundamentals**. Germany: Berlin, 2001.
- (9) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. **IEC 60099-4** : Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems. 2009.
- (10) IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. **IEEE C62.11-2005. 22** IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (> 1 kV). 2006.

- (11) ZAHEDI, A., Effect of Dry Band on Performance of uhv Surge Arrester and Leakage Current Monitoring, using new developed Model. INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROPERTIES AND APPLICATIONS OF DIELECTRIC MATERIALS, 4. 1994, Brisbane. **Proceedings**. 1994.
- (12) SHIRAKAWA, S. et. al., Maintenance of Surge Arrester by a Portable Arrester Leakage Current Detector. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 3, n. 3, p. 998-1003, July 1988.
- (13) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. **IEC 60099-5**. Surge arresters – Part 5: Selection and Application Recommendations. 2000.
- (14) SHAW, J., HOLMGREN, N., Characteristics which can be used to detect defective distribution surge arrester. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, vol. PAS-104, No. 1, p. 137-141, 1985.
- (15) MARTINEZ, M. et al, Medição de corrente de fuga, uma alternativa para a manutenção preventiva de pára-raios. IN SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 10.,1989, Curitiba. **Anais. X SNPTEE** Curitiba, 1989.
- (16) JUNQUEIRA F., A. et al, Avaliação do desempenho de para-raios convencionais (SiC) em sistemas de transmissão: Técnicas preditivas atuais e novas propostas para a identificação de unidades defeituosas em serviço. SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 11,1993, Recife. **Anais. XII SNPTEE** Recife, 1993.
- (17) MCDONALD, DARVENIZA J., SAHA, T., The diagnostic testing of high voltage silicon carbide surge arresters. AUSTRALASIAN UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE. 2000, Brisbane. **Anais. AUPEC 2000**, 2000.
- (18) ARARIPE JR., J., BACEGA, W., Ensaio de tensão disruptiva a 60 Hz em para-raios de carboneto de silício (SiC) em campo. ENCONTRO REGIONAL LATINO-AMERICANO DO CIGRE,, 1995. Foz do Iguaçu.. **Trabalhos Técnicos VI ERLAC** 1995.
- (19) DARVENIZA, M., MERCER, R., WATSON, R., An assessment of the reliability of in-service gapped silicon-carbide distribution surge arresters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 11, n.. 4, p. 745-750, Oct. 1996.

- (20) GRZYBOWSKI, S., GAO, G., **Evaluation of 15-420 kV substation lightning arresters after 25 years of service**. New Jersey: Southeastcon, 1999.
- (21) McDERMID, W., **Reliability of Station Class Surge Arresters**. Boston: International Symposium on Electrical Insulation,, 2002.
- (22) LUNDQUIST, J. et al, New method for measurement of the resistive leakage current of metal-oxide surge arresters in service. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 5, n. 4, p. 1811-1822, 1990.
- (23) ORSINO FILHO, O. et al, Performance Evaluation of 20 Years Old ZnO Surge Arresters Based on Laboratory Tests. INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATION. 2008, Chongqing. **Proceedings ICHVE 2008**, 2008.
- (24) VITOLS, A., STEAD, J., Condition Monitoring of Post Insulators and Surge Arresters. IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE. 2009, Montreal.
- (25) CALAZANS, A. XIMENES, R., REZENDE, Z., Diagnóstico de pára-raios de óxido de zinco através de técnicas preditivas. SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA,14., , 1997 Belém. **Anais. XIV SNPTEE**, 1997.
- (26) HEINRICH, C. et al., On line monitoring of high-voltage metal-oxide arresters by wireless passive surface acoustic wave (SAW) temperature sensors. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 11, 1999. London, **Proceedings**. 1999.
- (27) HEINRICH, C., HINRICHSEN, V., Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networks – comparison of existing and newly developed procedures. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 16, n. 1, p. 138-143, Jan. 2001.
- (28) ZHAO T., LI, Q., QIAN, J., Investigation on Digital Algorithm for On-Line Monitoring and Diagnostics of Metal Oxide Surge Arrester Based on an Accurate Model. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 20, n. 2, p. 751-756, Apr. 2005.
- (29) TASKIN, T., Introduction of a measurement system to monitor the condition of ZnO surge arresters. **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**, vol. 3, p. 1553-1557, Jan. 2000.

- (30) ABDUL-MALEK, Z., YOUSOF, M., Field Experience on Surge Arrester Condition Monitoring - Modified Shifted Current Method. International Universities Power Engineering Conference, 45., 2010, Cardiff. **Proceedings UPEC 2010**, 2010.
- (31) LARSEN, V., LIEN, K., In-service testing and diagnostic of gapless metal oxide surge arresters. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 9., 2007. Foz do Iguaçu. **Proceedings**., 2007.
- (32) CAVALLINI, A. et al, Advanced PD Inference in On-Field Measurements. Part I: Noise Rejection. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 10, n.. 2, p. 216-224, Apr. 2003.
- (33) CAVALLINI, A. et al, Advanced PD Inference in On-Field Measurements. Part II: Identification of defects in solid insulation systems. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 10, n.. 3, p. 528-538, Jun. 2003.
- (34) BRITO, Tales. Metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade Aplicada a Pára-Raios de Alta Tensão. 2006. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- (35) HINRICHSSEN, V. et al, Online monitoring of high-voltage metal-oxide surge arresters by wireless passive surface acoustic wave (SAW) temperature sensors. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING , 11., London, 1999. **Proceedings**. (Conf. Publ. No. 467)
- (36) ZHU, H., RAGHUVeer, M., Influence of Representation Model and Voltage Harmonics on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 16, n.. 4, p. 599-603, Oct. 2001.
- (37) BARBOSA, F., **Técnicas de Diagnóstico e Correlação com Fenômenos de Degradação em Varistores de ZnO**. 2007. Dissertação (Mestrado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.
- (38) ALVES, M. **Monitoração de Buchas Condensivas Isoladas com Papel Impregnado com Óleo**. 2004. Dissertação (Mestrado) –Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- (39) ALVES, M., SILVA, J. Sistema de Monitoração On-line de Capacitância e Tangente Delta de Buchas Condensivas. ENCONTRO REGIONAL IBERO-AMERICANO DO CIGRE, 12., 2007. FOZ DO IGUAÇU. **TRABALHO TÉCNICO XII ERIAC**, 2007.

- (40) ALVES, M., MELO, M., Experiência com Monitoração On-Line de Capacitância e Tangente Delta de Buchas Condensivas. SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 19. 2007, Rio de Janeiro. **Anais. XIX SNPTEE**, 2007.
- (41) CALAZANS, A., XIMENES, R., REZENDE, Z., Diagnóstico de Pára-raios de Óxido de Zinco Através de Técnicas Preditivas. SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 14. 1997, Belém. **Anais. XIV SNPTEE**, 1997.