

Universidade Federal do Ceará
Centro de Tecnologia
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica



**UMA NOVA TÉCNICA DE LAVAGEM DE ISOLADORES DA REDE
ELÉTRICA DE DISTRIBUIÇÃO**

RAFAEL OLIVEIRA DE SOUSA

Fortaleza, Março 2010

RAFAEL OLIVEIRA DE SOUSA

**UMA NOVA TÉCNICA DE LAVAGEM DE ISOLADORES DA REDE
ELÉTRICA DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação submetida à Coordenação do
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
da Universidade Federal do Ceará como requisito
parcial para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Ricardo Silva Thé Pontes, Dr.

Co-orientador:

Prof. Carlos Almir Monteiro de Holanda, Dr.

Fortaleza, Março 2010

UMA NOVA TÉCNICA DE LAVAGEM DE ISOLADORES DA REDE ELÉTRICA DE DISTRIBUIÇÃO

Rafael Oliveira de Sousa

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.

Ricardo Silva Thé Pontes, Dr.
Orientador

Luiz Henrique Barreto, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora

Ricardo Silva Thé Pontes, Dr.

Prof.Fernando Luiz Marcelo Antunes, Dr.

Prof.Cícero Marcos Tavares Cruz, Dr.

José Júlio de Almeida Lins Leitão, Dr.

Fortaleza, Março 2010

Em especial ao meu querido e amado pai, José Oliveira Nunes, pelo amor e dedicação dispensados a mim e por nunca ter me deixado esmorecer e nunca ter desistido de me incentivar mesmo nos momentos em que eu não demonstrava nenhum interesse pelos estudos. Por me ensinar e dar o exemplo dos valores que um homem precisa aprender para ser digno e honrado e por ter me aberto os olhos para a enorme importância da busca pelo conhecimento. Que não pode me ver graduado e nem dando andamento ao curso de pós-graduação, mas que estará em minha mente e em meu coração enquanto eu viver, sendo lembrado a cada dia como o grande responsável pelo meu sucesso até aqui conquistado e pelo sucesso que ainda conquistarei.

A minha querida e amada mãe, Maria do Carmo Ferreira de Sousa Oliveira, pelo amor, dedicação pelo seu exemplo, ensinamentos e luta constante para que eu tivesse condições de estudar e progredir desde o início até o presente dia.

Aos meus irmãos Gabriel Oliveira de Sousa e Lorena Oliveira de Sousa, pelo carinho, apoio, companheirismo e por me aturarem todo esse tempo até os dias de hoje.

A todos os meus parentes e amigos pela força, apoio e atenção em todos os momentos da vida.

Ao meu estimado orientador, Ricardo Silva Thé Pontes e demais colaboradores deste trabalho, por suas contribuições valorosas.

Eu dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, pela força em todos os momentos de dificuldade, pela família maravilhosa que tenho e pela minha saúde para lutar por meus objetivos.

Aos meus pais, irmãos que me apoiaram durante todo esse período e são minha grande razão de viver. Aos meus parentes pelo incentivo, apoio, ajuda e por acreditarem na minha capacidade.

Ao professor Ricardo Silva Thé Pontes pela valiosa orientação, liderança, amizade, confiança e dedicação neste trabalho e em todas as atividades do LAMOTRIZ - UFC. Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará que participaram da minha formação como Engenheiro Eletricista e que participaram em todas as etapas do curso de pós-graduação, em especial: Prof. José Carlos, Prof. Fernando Antunes, Prof. Luiz Henrique, Prof. Arthur Plínio e Prof. Otacílio da Mota.

À equipe técnica da pesquisa, em especial, Antônio Thé Pontes pela sua experiência, conhecimento, competência, fundamentais para o andamento dessa pesquisa, e amizade. A Engenheira Anadite Luna pelo seu conhecimento e experiência dedicadas a esta pesquisa, professor Carlos Almir pelo conhecimento fornecido na área de compressores. Aos alunos de graduação que contribuíram para este trabalho, Dante Shimoda, Bruno Dourado e Marcelo Gino.

À COELCE (Companhia Energética do Ceará) por acreditar e dar o suporte financeiro a essa pesquisa. Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) também pelo apoio financeiro para realização deste trabalho. À B&Q Eletrificação LTDA, em especial à diretoria administrativa, Luis Cláudio e Alexandre Gadelha de Queiroz, aos funcionários de extrema importância na concretização do trabalho, Márcio Gleyson, George, Jack e a todos os outros que contribuíram. A David Munoz da Cenarcom pelo seu apoio de grande importância no que envolveu os compressores. Ao Prof. Ricardo Emílio do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFC pela colaboração.

Aos amigos de estudo, em especial, Francisco Eudes Barroso (PG), Rodrigo Paulino Magalhães (mestrim), Herminio Miguel de Oliveira (Bruce Wayne), Francisca Livia

(Jade), Darby Freitas (fils de petit Gerard), Aluisio Vieira (preocupado), Antônio Barbosa (toim das caucaia), Dirceu dos Santos (O. Cobblepot), Ana Lúcia, José Roque, Daniel Lima, Samuel Jó, Samuel Vieira, Natanael, Fátima por estarem presentes e atuantes nas tarefas em conjunto da pós-graduação. Aos amigos Danilo Nobre, Éber de Castro, Nelber Ximenes, Wilkley, Vanessa e Adson. A todos os amigos do curso de graduação em engenharia elétrica.

Aos servidores e funcionários técnico-administrativos deste departamento. Destaco: Eduardo (LAMOTRIZ), Mário Sérgio (DEE), Rafael Gomes (PPGEE), Pedro (GPEC), Gleidson, , Vasco (xerox) e Dona Socorro.

Às pessoas amigas que tiveram grande importância nessa trajetória e que me proporcionaram momentos especiais, Ricardo (cadim), Nelson (dedão), Michele, Lídia e Cris Louvrier, Micheline, Erika, Thiago, Alice, Paulo. Aos meus amigos e companheiros de banda Thyago e Gilberto pela compreensão para com a minha falta de tempo.

Ao Black Sabbath por ter criado o Heavy Metal, minha grande paixão, ao todo poderoso São Paulo Futebol Clube pelos grandes momentos de alegria que me proporcionou com suas inúmeras vitórias e conquistas e às “menina” pelos maravilhosos momentos.

A todos estes e aos que me esqueci de listar, agradeço pela amizade, incentivo e confiança.

"...Together we stand, divided we fall."

Pink Floyd

Sousa, R. O. “Uma Nova Técnica de Lavagem de Isoladores da Rede Elétrica de Distribuição”, Universidade Federal do Ceará – UFC, 2010, 184p.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma nova técnica de limpeza de isoladores das redes de distribuição de energia elétrica. O atual processo usado por todas as concessionárias de transmissão e distribuição de energia elétrica para a limpeza dos isoladores de vidro e porcelana utiliza grande quantidade de água tratada. A nova técnica propõe a substituição da limpeza com água por uma limpeza com ar comprimido. Esta pesquisa foi de caráter estritamente experimental, com forte apoio laboratorial e testes de campo para validação. Em um primeiro momento os testes desse novo método de limpeza foram feitos em laboratório. Uma técnica de poluição artificial dos isoladores foi desenvolvida para os testes de limpeza em laboratório. Nessa etapa foram utilizados compressores industriais e um sistema de gás nitrogênio em alta pressão para a limpeza. Em um segundo momento ainda em laboratório, foram realizados diversos testes de limpeza nos isoladores com um compressor de alta vazão. Após essa etapa laboratorial foram realizados testes em campo. Esses testes foram feitos primeiramente em um centro de treinamento de eletricitas que simula a rede elétrica. Em seguida os testes foram postos em prática em linhas de distribuição da COELCE, com a rede desenergizada. Durante todos os ensaios de limpeza com ar comprimido a medição da corrente de fuga dos isoladores foi o parâmetro para a validação do processo. Todos os ensaios realizados apontam para uma solução ambientalmente correta, que contribui para a preservação do meio ambiente e eficaz no processo de limpeza.

Palavras-chave: Água, ar comprimido, corrente de fuga, isoladores, limpeza a seco, preservação do meio ambiente.

Sousa, R. O. "A New Technique of Washing of Insulators of the Electric Distribution Grid", Universidade Federal do Ceará – UFC, 2010, 184p.

The work presents a new technique of cleaning of insulators of the grid of distribution of electrical energy. The current process used by all energy company to cleaning of glass and porcelain insulators use a lot of treated water. The new technique proposes the substitution of the cleaning with water for a cleaning with compressed air. This research was strictly experimental, with great laboratory support and field tests for validation. At first the tests of this new methodology of cleaning were done in laboratory. A technique of artificial pollution of insulators was developed for the testes in laboratory. In this stage were used industrial compressors and a system of nitrogen gas in high pressure. In a second moment, still in laboratory, were done several tests with a compressor of high outflow. After this stage of laboratory field tests were done. These tests were done initially in a training center for electricians that simulate the electrical grid. After that the tests were done in lines of distribution of the electrical company, COELCE, with de-energized grid. During all tests the cleaning with compressed air the measurement of the leakage current of insulators was the parameter for the validation of the process. All the tests have done show a environmentally friendly solution, that contributes to the preservation of the environment and effective in the cleaning process.

Keywords: Dry washing, insulators, water, compressed air, leakage current, preservation of the environment.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS	XIX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XXII
CAPÍTULO 1	1
1.1 - PROCESSO ATUAL DE LAVAGEM DE ISOLADORES	2
1.2 - OBJETIVOS	6
1.3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	9
CAPÍTULO 2	11
2.1 - ASPECTOS GERAIS.....	11
2.2 - MATERIAIS ISOLANTES	12
2.2.1 Isoladores de Porcelana	13
2.2.2 Isoladores de Vidro	14
2.2.3 Isoladores Poliméricos.....	14
2.3 - PRINCIPAIS CAUSAS E CONSEQÜÊNCIAS DE FALHAS EM ISOLADORES	15
2.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	22
CAPÍTULO 3	24
3.1 - MÉTODOS DE POLUIÇÃO ARTIFICIAL.....	24
3.1.1 Método da Câmara de Névoa Salina	25
3.1.2 Método Manual	29
3.2 - MÉTODOS DE VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DO ISOLADOR ELETRICAMENTE	36
3.2.1 Rigidez Dielétrica	37
3.2.2 Corrente de Fuga.....	37
3.3 - MÉTODOS DE LIMPEZA A SECO.....	40
3.3.1 Compressores Industriais	41
3.3.1.1 Compressor Rotativo de Parafuso.....	42
3.3.1.2 Compressor Alternativo a Pistão	45
3.3.2 Resultados dos Testes com Compressores Industriais	46
3.3.3 Cilindros de Gás Nitrogênio em Alta Pressão	47
3.3.3.1 Aspectos Construtivos do Sistema e Procedimentos	49

3.3.3.2	Resultados da Limpeza com Gás Nitrogênio	57
3.3.4	Compressores de Alta Vazão	64
3.3.4.1	Etapa 1 - Compressor GA 37	65
3.3.4.2	Etapa 2 - Compressor XATS 176	75
3.4 -	PROCEDIMENTO ALTERNATIVO DE LIMPEZA	89
3.5 -	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
	CAPÍTULO 4	93
4.1 -	ETAPA 1 – TESTES NO CENTRO DE TREINAMENTO.....	93
4.1.1	Procedimento Alternativo de Limpeza em Postes de Altura Reduzida	96
4.1.2	Procedimento MPA de Limpeza em Postes de Real Grandeza.....	101
4.2 -	ETAPA 2 – TESTES NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO	110
4.2.1	Procedimento MPA de Limpeza em Linha de 69 kV	110
4.2.2	Procedimento MPA de Limpeza em Linha de 13,8 kV	113
	CAPÍTULO 5	121
5.1 -	CONCLUSÕES.....	121
5.2 -	PUBLICAÇÕES RELACIONADAS COM A PESQUISA	124
5.3 -	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	125
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
	APÊNDICE A.....	129
	APÊNDICE B.....	158
	APÊNDICE C	161

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Sistema convencional de lavagem com robô instalado em um guindauto de um caminhão munck.....	3
Figura 1.2 - Sistema convencional de lavagem em funcionamento.	4
Figura 1.3 - Maior detalhe da lavagem convencional com robô.	4
Figura 1.4 - Maior detalhe da lavagem convencional de forma manual.	5
Figura 1.5 - Outro ângulo da lavagem convencional de forma manual.	6
Figura 2.1 - Ilustração do fenômeno da condutividade superficial [8].....	17
Figura 2.2 - Distância de escoamento em um isolador tipo disco [5].	17
Figura 2.3 - Distância de escoamento em um isolador tipo pino multicorpo [5]. ...	18
Figura 2.4 - Fenômeno da condutividade da massa do isolador [8].	19
Figura 2.5 - Fenômeno da perfuração da massa do isolador [8].	19
Figura 2.6 - Ilustração do fenômeno da descarga disruptiva ou flashover [8].	20
Figura 2.7 - Imagem de um flashover [18].....	20
Figura 3.1 - Imagem frontal da câmara de névoa salina (foto do autor).....	25
Figura 3.2 - Imagem do interior da câmara de névoa salina (foto do autor).....	25
Figura 3.3 - Isolador de porcelana tipo disco (foto do autor).	28
Figura 3.4 - Borrifador da solução salina pelo método manual (foto do autor).	30
Figura 3.5 - Estrutura de sustentação e transporte das cadeias de isoladores (foto do autor).....	31
Figura 3.6 - Aplicação da solução salina nos isoladores pelo método manual (foto do autor).....	32
Figura 3.7 - Comparação visual entre o (a) método da câmara de névoa salina e o (b) método manual (foto do autor).....	33
Figura 3.8 – Comparação gráfica entre correntes de fuga de cadeias de isoladores poluídas artificialmente pelos dois métodos citados.	35
Figura 3.9 - Fixação da cadeia de isoladores para o teste de corrente de fuga (foto do autor).....	38
Figura 3.10 - Classificação dos compressores quanto ao princípio físico de operação [15].	41
Figura 3.11 – Representação de um compressor rotativo de parafuso [15].	43
Figura 3.12 - Compressor de parafuso com pressão máxima de trabalho de 7,5 bars e vazão de 339 litros por minuto (foto do autor).	44

Figura 3.13 - Reservatório de ar com capacidade para 300 litros (foto do autor).	44
Figura 3.14 - Representação do compressor alternativo a pistão [15].	45
Figura 3.15 - Compressor a pistão com pressão máxima de trabalho de 12,1 bars e vazão de 577 litros por minuto (foto do autor).	46
Figura 3.16 - Bico-pistola utilizado para a aplicação do ar sobre o isolador (foto do autor).	47
Figura 3.17 – Mangueira trançada utilizada nos testes (foto do autor).	47
Figura 3.18 - Cilindros de gás nitrogênio para os testes de limpeza das cadeias de isoladores (foto do autor).	49
Figura 3.19 - Sistema de regulação da pressão dos cilindros de gás nitrogênio.	50
Figura 3.20 - Serpentina de cobre e serpentina flexível.	51
Figura 3.21 - Vista lateral da conexão entre os cilindros e o MANIFOLD (foto do autor).	52
Figura 3.22 - Vista superior da conexão entre os cilindros e o MANIFOLD (foto do autor).	52
Figura 3.23 - Fixação da serpentina à barra metálica (foto do autor).	53
Figura 3.24 - Movimentação vertical da barra de fixação da serpentina flexível (foto do autor).	54
Figura 3.25 - Estrutura de sustentação para a cadeia de isoladores (foto do autor).	55
Figura 3.26 – Circuito de canos que conecta a saída do cilindro com a serpentina flexível (foto do autor).	56
Figura 3.27 - Comparação da condição do isolador antes e após a limpeza com gás nitrogênio (foto do autor).	58
Figura 3.28 - Gráfico das correntes de fuga da cadeia de isoladores 1 limpa com água e das correntes de fuga da cadeia de isoladores 1 limpa com gás nitrogênio.	61
Figura 3.29 - Gráfico das correntes de fuga da cadeia de isoladores 2 limpa com água e das correntes de fuga da cadeia de isoladores 2 limpa com gás nitrogênio.	61
Figura 3.30 - Gráfico das correntes de fuga da cadeia de isoladores 1 poluída pelo método manual e das correntes de fuga da cadeia de isoladores 1 limpa com gás nitrogênio.	62
Figura 3.31 - Gráfico das correntes de fuga da cadeia de isoladores 2 poluída pelo método da câmara de névoa salina e das correntes de fuga da cadeia de isoladores 2 limpa com gás nitrogênio.	63

Figura 3.32 - Compressor GA 37 e secador de ar (foto do autor).....	66
Figura 3.33 - Reservatório e filtro de ar do compressor GA 37 (foto do autor).....	67
Figura 3.34 - Elemento compressor do GA 37 (foto do autor).....	67
Figura 3.35 - Motor de acionamento do compressor GA 37 (foto do autor).	68
Figura 3.36 - Quadro de comando para a partida do motor (foto do autor).....	68
Figura 3.37 - Quadro de força para a alimentação do motor (foto do autor).	69
Figura 3.38 – Uma das mangueira de PVC wingfoot utilizadas na limpeza (foto do autor).....	69
Figura 3.39 - Estrutura mecânica para o teste de limpeza das cadeias de isoladores (foto do autor).	70
Figura 3.40 - Estrutura mecânica para o teste de limpeza das cadeias de isoladores com a mangueira fixada (foto do autor).	71
Figura 3.41 - Estrutura para a sustentação das cadeias de isoladores (foto do autor).....	72
Figura 3.42 – Posicionamento para ataque de ar sobre a superfície do isolador (foto do autor).....	73
Figura 3.43 - Isoladores antes e depois da limpeza com ar comprimido (foto do autor).....	73
Figura 3.44 - Carroceria que comporta motor e compressor (foto do autor).	76
Figura 3.45 - Figura que ilustra as medidas da carroceria do compressor com rodas e engate.	76
Figura 3.46 - Painel de instrumentos (foto do autor).	77
Figura 3.47 - Motor de combustão interna (foto do autor).	78
Figura 3.48 - Elemento compressor do XATS 176 (foto do autor).....	78
Figura 3.49 - Reservatório de ar do XATS 176 (foto do autor).....	79
Figura 3.50 - Visão geral da parte interna da carroceria (foto do autor).....	79
Figura 3.51 - Bico utilizado nos testes de limpeza laboratoriais com o compressor XATS 176 (foto do autor).	80
Figura 3.52 - Visão geral do laboratório de ensaios elétricos (foto do autor).	81
Figura 3.53 - Cadeia de isoladores tirada da rede de distribuição (foto do autor).	84
Figura 3.54 - Gráfico de comparação entre correntes de fuga de cadeias de isoladores poluídas naturalmente e artificialmente.....	85

Figura 3.55 - O gráfico de comparação entre as correntes de fuga da cadeia de isoladores limpa com água e da cadeia poluída naturalmente e limpa com ar comprimido.....	87
Figura 3.56 - O gráfico de comparação entre as correntes de fuga da cadeia de isoladores poluída naturalmente e da cadeia poluída naturalmente e limpa com ar comprimido.....	87
Figura 3.57 - Comparação visual de isoladores naturalmente poluídos antes e após a limpeza com ar comprimido (foto do autor).	89
Figura 3.58 - Comparação visual entre um isolador poluído artificialmente e um isolador naturalmente poluído (foto do autor).....	89
Figura 3.59 - Cadeia de isoladores poluída artificialmente antes do teste com o procedimento alternativo (foto do autor).....	90
Figura 3.60 - Limpeza da cadeia de isoladores com ar comprimido e uso do procedimento alternativo em laboratório (foto do autor).....	91
Figura 3.61 - Cadeia de isoladores após a limpeza com ar comprimido e aplicação do procedimento MPA (foto do autor).	91
Figura 3.62 - Recipiente que armazena a água usada no processo MPA (foto do autor).....	92
Figura 4.1 - Postes de altura reduzida do centro de treinamento da B&Q Eletrificação (foto do autor).	94
Figura 4.2 - Mangueira MANTEX (foto do autor).....	95
Figura 4.3 - Imagem do momento em que MPA atinge o jato de ar comprimido e o momento posterior (foto do autor).....	96
Figura 4.4 - Eletrobomba automotiva (foto do autor).....	97
Figura 4.5 - Bico injetor (foto do autor).....	97
Figura 4.6 - Configuração dos jumpers para o correspondente tempo mínimo de pulso.....	98
Figura 4.7 - Pontos de conexão e de configuração do receptor RX-MC2.	99
Figura 4.8 - Aplicação do procedimento alternativo no centro de treinamento (postes de altura reduzida) (foto do autor).	100
Figura 4.9 - Caminhão munck (foto do autor).....	101
Figura 4.10 - Acoplamento entre caminhão munck e carroceria do compressor (foto do autor).....	102

Figura 4.11 - Conjunto caminhão munck e carroceria do compressor acoplados (foto do autor).....	102
Figura 4.12 - Cesto e controle da lança (foto do autor).....	103
Figura 4.13 - Posicionamento dos eletricitas no cesto (foto do autor).....	104
Figura 4.14 - Lança em processo de subida (foto do autor).....	104
Figura 4.15 - Isoladores tipo disco, pino (multicorpo) e roldana no poste do centro de treinamento (foto do autor).....	105
Figura 4.16 - Limpeza das cadeias de isoladores tipo disco de porcelana (foto do autor).....	106
Figura 4.17 - Limpeza das cadeias de isoladores tipo disco de porcelana (foto do autor).....	106
Figura 4.18 - Limpeza dos isoladores tipo pino multicorpo de vidro (foto do autor).	107
Figura 4.19 - Limpeza dos isoladores tipo pino multicorpo de vidro (foto do autor).	107
Figura 4.20 - Isolador de pino multicorpo 1 (foto do autor).....	109
Figura 4.21 - Isolador de pino multicorpo 2 (foto do autor).....	109
Figura 4.22 - Isolador de pino multicorpo 3 (foto do autor).....	110
Figura 4.23 - Estrutura de uma linha de distribuição de 69 kV (foto do autor). ..	111
Figura 4.24 - Limpeza de isoladores de uma linha de 69 kV no Mucuripe (foto do autor).....	112
Figura 4.25 - Limpeza de isoladores de uma linha de 69 kV no Mucuripe (foto do autor).....	112
Figura 4.26 - Limpeza de isoladores de uma linha de 69 kV no Mucuripe (foto do autor).....	113
Figura 4.27 – Estrutura de uma linha de distribuição de 13,8 kV (foto do autor).	114
Figura 4.28 - Limpeza das cadeias de isoladores tipo disco de porcelana em uma linha de distribuição de 13,8 kV na praia da Sabiaguaba (foto do autor).	116
Figura 4.29 - Limpeza das cadeias de isoladores tipo disco de porcelana em uma linha de distribuição de 13,8 kV na praia da Sabiaguaba (foto do autor).	116
Figura 4.30 - Cadeias de isoladores retiradas de uma linha de distribuição de 13,8 kV para testes (foto do autor).....	117

Figura 4.31 - Comparação entre as correntes de fuga da cadeia 1 e as correntes de fuga da cadeia 2 (foto do autor).	119
Figura 4.32 - Comparação entre as correntes de fuga da cadeia 1 e as correntes de fuga da cadeia 3 (foto do autor).	119
Figura A.1 - Isolador tipo roldana modelo 1101 (conforme [7]).	130
Figura A.2 - Isolador tipo roldana modelo 1102 (conforme [7]).	130
Figura A.3 - Isolador tipo roldana modelo 1108 (conforme [7]).	131
Figura A.4 - Isolador de pino monocorpo modelo 1114 (conforme [7]).	133
Figura A.5 - Isolador de pino multicorpo modelo 23105 (conforme [7]).	133
Figura A.6 - Isolador tipo castanha modelo 1176 (conforme [7]).	134
Figura A.7 - Isolador tipo castanha modelo 1197 (conforme [7]).	135
Figura A.8 - Isolador tipo castanha modelo 1199 (conforme [7]).	135
Figura A.9 - Isolador tipo disco com engate concha-bola modelo 24305 (conforme [7]).	138
Figura A.10 - Isolador tipo disco com engate garfo-olhal redondo modelo 24303 (conforme [7]).	138
Figura A.11 - Isolador tipo disco com engate garfo-olhal quadrado modelo 24306 (conforme [7]).	139
Figura A.12 - Isolador tipo disco anti-poluição com engate concha-bola modelo 28303 (conforme [7]).	139
Figura A.13 - Isolador tipo disco com engate concha-bola para linha de transmissão modelo 25102 (conforme [7]).	141
Figura A.14 - Isolador tipo disco de vidro com engate concha-bola modelo E80Z/146 (conforme [7]).	142
Figura A.15 - Cadeia de isoladores de vidro unidos com engate concha-bola [19].	143
Figura A.16 - Isolador tipo bastão em porcelana modelo 41121 (conforma[7]). ..	144
Figura A.17 - Isoladores tipo bastão de material polimérico [20].	144
Figura A.18 - Isolador tipo pilar para linha em porcelana modelo 10622 (conforme [7]).	146
Figura A.19 - Isolador tipo pilar para linha em material polimérico [20].	147
Figura A.20 - Isolador tipo pilar para estação [21].	149
Figura A.21 - Isolador tipo pilar para estação usado em linhas de 69 kV [22]. ...	149
Figura A.22 - Isolador tipo suporte modelo 1157 (conforme [7]).	151

Figura A.23 - Isolador tipo pedestal modelo 23451 (conforme [7]).....	152
Figura A.24 - Isolador tipo pedestal modelo 23470 (conforme [7]).....	152
Figura A.25 - Isolador tipo bucha para transformadores modelo 1027-T1 (conforme [7]).....	154
Figura A.26 - Cadeia de isoladores em suspensão simples [23].....	155
Figura A.27 - Cadeias de isoladores em suspensão dupla [24].	155
Figura A.28 - Cadeias de isoladores em suspensão em "V" [25].	156
Figura A.29 - Cadeias de isoladores tipo disco de vidro em linha de distribuição primária em amarração simples (foto do autor).....	157
Figura A.30 - Cadeias de isoladores tipo disco de vidro em amarração dupla [26].	157
Figura B.1 - Simulação com bico de 2 mm de diâmetro e 30 bars de pressão. .	159
Figura B.2 - Simulação com bico de 2 mm de diâmetro e 40 bars de pressão. .	159
Figura B.3 - Simulação com bico de 2 mm de diâmetro e 50 bars de pressão. .	160
Figura C.1 - Bicos testados no processo de limpeza a seco (foto do autor).	161
Figura C.2 - Seção cônica do bico de Technyl (foto do autor).	162
Figura C.3 - Seção cônica de um bico de aço (foto do autor).	162
Figura C.4 - Seção cônica de um bico de aço (foto do autor).	163
Figura C.5 - Bico utilizado na limpeza (foto do autor).....	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Comparação do nível de poluição entre 3 configurações de ensaio.	27
Tabela 3.2 - Classificação da poluição [3].	28
Tabela 3.3 - Cadeia de isoladores poluída pelo método da câmara de névoa salina.	36
Tabela 3.4 - Cadeia de isoladores poluída pelo método manual.	36
Tabela 3.5 - Cadeia de isoladores limpa com água – cadeia 1.	59
Tabela 3.6 - Cadeia de isoladores limpa com água – cadeia 2.	59
Tabela 3.7 - Cadeia de isoladores limpa com gás nitrogênio – cadeia 1.	60
Tabela 3.8 - Cadeia de isoladores limpa com gás nitrogênio – cadeia 2.	60
Tabela 3.9 - Características do compressor GA 37.	65
Tabela 3.10 - Características do compressor XATS 176.	75
Tabela 3.11 - Classes de contaminação e caracterização ambiental [16].	83
Tabela 3.12 - Correntes de fuga de uma cadeia de isoladores poluída naturalmente.	84
Tabela 3.13 - Correntes de fuga de cadeia de isoladores poluída artificialmente (método manual).	84
Tabela 3.14 - Correntes de fuga de uma cadeia de isoladores poluída naturalmente e limpa com ar comprimido.	86
Tabela 3.15 - Correntes de fuga de uma cadeia de isoladores totalmente limpa.	86
Tabela 4.1 – Correntes de fuga do isolador de pino 1.	108
Tabela 4.2 – Correntes de fuga do isolador de pino 2.	108
Tabela 4.3 – Correntes de fuga do isolador de pino 3.	108
Tabela 4.4 - Correntes de fuga da cadeia 1.	118
Tabela 4.5 - Correntes de fuga da cadeia 2.	118
Tabela 4.6 - Correntes de fuga da cadeia 3.	118
Tabela A.1 - Características do isolador tipo roldana modelo 1101 (conforme [7]).	131
Tabela A.2 - Características do isolador tipo roldana modelo 1102 (conforme [7]).	131
Tabela A.3 - Características do isolador tipo roldana modelo 1108 (conforme [7]).	132

Tabela A.4 - Características do isolador tipo pino monocorpo modelo 1114 (conforme [7]).	133
Tabela A.5 - Características do isolador tipo pino multicorpo modelo 23105 (conforme [7]).	134
Tabela A.6 - Características do isolador tipo castanha modelo 1176 (conforme [7]).	136
Tabela A.7 - Características do isolador tipo castanha modelo 1197 (conforme [7]).	136
Tabela A.8 - Características do isolador tipo castanha modelo 1199 (conforme [7]).	136
Tabela A.9 - Características do isolador tipo disco engate concha-bola modelo 24305 (conforme [7]).	140
Tabela A.10 - Características do isolador tipo disco engate garfo-olhal redondo modelo 24303 (conforme [7]).	140
Tabela A.11 - Características do isolador tipo disco engate garfo-olhal quadrado modelo 24306 (conforme [7]).	140
Tabela A.12 - Características do isolador tipo disco anti-poluição engate concha-bola modelo 28303 (conforme [7]).	141
Tabela A.13 - Características do isolador tipo disco engate concha-bola para linha de transmissão modelo 25102 (conforme [7]).	142
Tabela A.14 - Características do isolador tipo disco de vidro engate concha-bola para linha de transmissão modelo E80Z/146 (conforme [7]).	142
Tabela A.15 - Características do isolador tipo bastão em porcelana modelo 41121 (conforme [7]).	145
Tabela A.16 - Características do isolador tipo bastão polimérico modelo IPB 34/NP/8 (conforme [20]).	145
Tabela A.17 - Características do isolador tipo bastão polimérico modelo IPB 34/AP/9 (conforme [20]).	145
Tabela A.18 - Características do isolador tipo bastão polimérico modelo IPB 34/EAP/9 (conforme [20]).	146
Tabela A.19 - Características do isolador tipo pilar para linha em porcelana modelo 10622 (conforme [7]).	147
Tabela A.20 - Características do isolador tipo pilar para linha polimérico modelo IPBPL (conforme [20]).	148

Tabela A.21 - Características do isolador tipo pilar para estação em porcelana modelo 4062 (conforme [21]).	150
Tabela A.22 - Características do isolador tipo pilar para estação em porcelana modelo 4091 (conforme [21]).	150
Tabela A.23 - Características do isolador tipo suporte em porcelana modelo 1157 (conforme [7]).	151
Tabela A.24 - Características do isolador tipo pedestal em porcelana modelo 23451 (conforme [7]).	153
Tabela A.25 - Características do isolador tipo pedestal em porcelana modelo 23470 (conforme [7]).	153
Tabela A.26 - Características do isolador tipo bucha para transformadores modelo 1027-T1 (conforme [7]).	154

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente Contínua
CFD	Computacional Fluid Dynamics
CFM	Cubic Feet per Minute
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
CHLIE	Conferencia Hispano-Lusa de Ingeniería Eléctrica
CLAGTEE	Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica
COELCE	Companhia Energética do Ceará
DDSE	Densidade de Depósito de Sal Equivalente
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
EPDM	Ethylene Propylene Diene Monomer
LAMOTRIZ	Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes Industriais
MCI	Motor de Combustão Interna
MIT	Motor de Indução Trifásico
MPA	Micro Pulverização de Água
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
NUTEC	Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará
PET	PolyEthylene Terephthalate
PEX	Procedimentos de Execução
PSI	Pound Square Inch
PVC	PolyVinyl Chloride
RPM	Rotações por Minuto
SBSE	Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos
UFC	Universidade Federal do Ceará

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A poluição do ar é um fenômeno que gera agentes agressores e degradadores dos materiais elétricos, condutores ou isolantes, das redes aéreas de distribuição e transmissão de energia. No Brasil, em sua imensa maioria, a transmissão e distribuição de energia são feitas através de linhas aéreas, portanto totalmente expostas à intempérie climática e à poluição ambiental.

A poluição ambiental provoca principalmente a diminuição da capacidade dielétrica (propriedade que materiais isolantes possuem de suportar determinados níveis de tensão elétrica sem perder sua capacidade de isolamento) dos isoladores, aumentando a corrente de fuga, reduzindo seu desempenho isolante e conseqüentemente provocando a ocorrência de descargas “*flashover*”, além da redução de sua resistência mecânica.

É freqüente, no sistema elétrico de potência, a ocorrência de interrupções indesejáveis, devido às falhas em materiais e equipamentos, em particular nos isoladores, seja por poluição/oxidação ou por vandalismo. A busca pela qualidade no fornecimento de energia leva as empresas do setor a investirem significativas quantias em manutenção, para garantir ao sistema elétrico, índices aceitáveis de continuidade no fornecimento. Para assegurar a continuidade do fornecimento no sistema elétrico, as concessionárias utilizam grande contingente de homens, equipamentos, instrumentos e procedimentos técnicos especializados, onde se destacam os serviços de lavagem de linhas aéreas e subestações energizadas ou não, entre outras medidas de manutenção.

O serviço de lavagem de isoladores é necessário, principalmente nas regiões próximas do litoral, devido ao efeito da salinização, que contamina os isoladores com alto teor de sais. A poluição urbana e a industrial também provocam falhas no sistema elétrico.

1.1 - PROCESSO ATUAL DE LAVAGEM DE ISOLADORES

A lavagem de isoladores é um processo de manutenção preventiva fundamental para o bom funcionamento do sistema elétrico, que está submetido à constante contaminação gerada pelo ambiente. Nos grandes centros urbanos e nas proximidades de regiões litorâneas, este problema se agrava ainda mais, fazendo da lavagem dos isoladores um procedimento essencial para a redução de interrupções e ainda aumentando a vida útil dos isoladores.

O sistema de lavagem convencional utiliza água como fluido de limpeza. A água doce é um bem natural cada vez mais escasso e considerado um patrimônio da humanidade, portanto a limpeza dos isoladores com este fluido torna-se ambientalmente incorreta. A água utilizada ao final do processo de limpeza é totalmente descartada.

Embora com o problema ambiental, o processo convencional de limpeza dos isoladores é em muitos casos, a única alternativa das concessionárias para manter seus sistemas em funcionamento.

A lavagem é bastante efetiva quando o poluente depositado na superfície do isolador é poeira, sal, sujeira ou ácido, porque estes poluentes não aderem fortemente à superfície isolante. Em algumas áreas, a lavagem natural realizada pela chuva é suficiente a fim de prevenir *flashover* no isolador devido à contaminação. No entanto, em regiões onde a chuva não é freqüente, é necessário lavar os isoladores no período seco [1]. Este é o caso da maior parte das cidades da região nordeste do Brasil.

A freqüência de lavagem depende do nível de contaminação e das condições ambientais. Os isoladores devem ser lavados antes que eles acumulem níveis de contaminação crítica. Este nível pode ser determinado pelos seguintes critérios: medição da densidade de depósito de sal equivalente em isoladores de teste instalados próximos a linhas de distribuição ou transmissão, descargas superficiais observadas nos isoladores durante condições críticas, presença de radiointerferência e medição da corrente de fuga dos isoladores [1].

Atualmente as concessionárias de transmissão e distribuição de energia utilizam isoladores de vidro, porcelana e poliméricos, estes últimos cada vez mais presentes no sistema. O processo de limpeza com água só é usado nos dois

primeiros conjuntos de isoladores, pois em virtude de sua característica higroscópica os isoladores poliméricos não podem ser limpos com este processo, como será mostrado no capítulo 2.

O acompanhamento do processo convencional utilizado no estado do Ceará, foi feito em uma linha de sub-transmissão de 69 kV (quilovolt) da COELCE (Companhia Energética do Ceará). A lavagem feita por uma empresa especializada que presta serviço à concessionária é executada ao longo de todas as estruturas da rede. Em particular uma estrutura de ancoragem-suspensão é mostrada na figura 1.1, sendo limpa através de um robô instalado em um braço hidráulico de um caminhão, via um sistema de bombeamento que pressuriza a água do tanque, operado remotamente do solo por dois eletricitistas. A lavagem efetuada com o braço hidráulico pode ser vista nas figuras 1.2 e 1.3.



Figura 1.1 - Sistema convencional de lavagem com robô instalado em um guindauto de um caminhão munk.

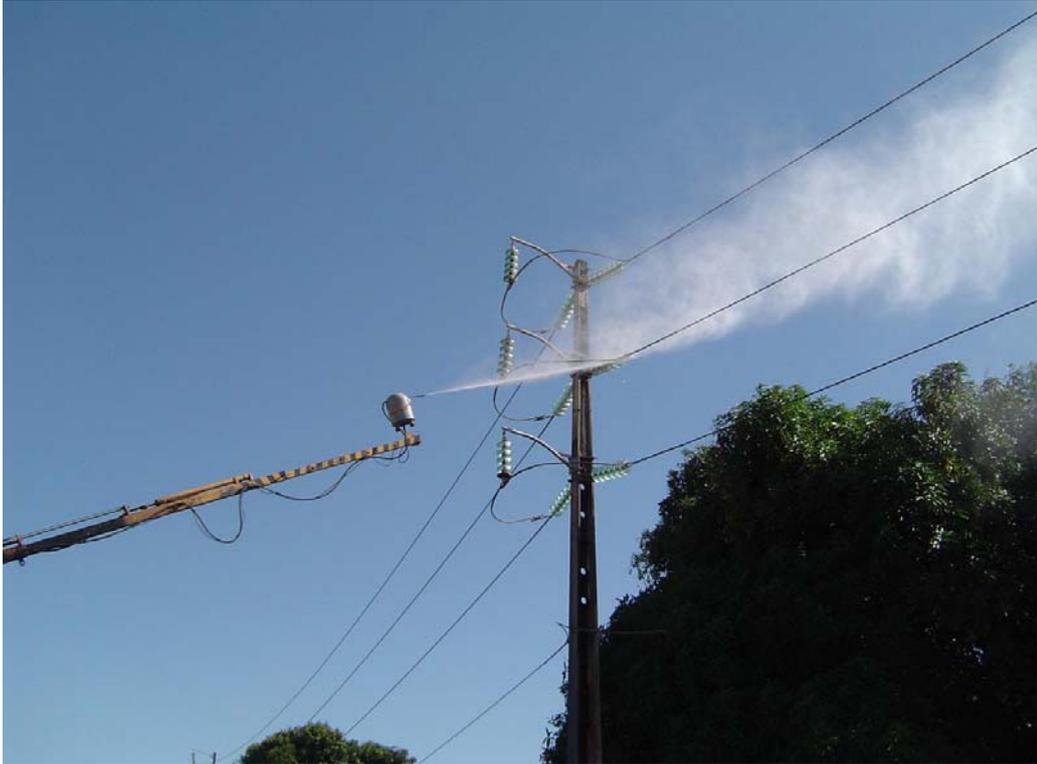


Figura 1.2 - Sistema convencional de lavagem em funcionamento.



Figura 1.3 - Maior detalhe da lavagem convencional com robô.

Em outra estrutura, no caso uma de suspensão, foi usado um método diferente, a lavagem manual. Um eletricitista escala a estrutura e efetua o serviço de lavagem das cadeias de isoladores manualmente com uma pistola. Este processo de lavagem manual com a pistola pode ser observado nas figuras 1.4 e 1.5. O outro eletricitista acompanha o procedimento do solo. Esse procedimento é obrigatoriamente executado com a linha desenergizada.

Nos dois casos apresentados a linha estava desligada, porém normalmente quando o robô é utilizado, a lavagem pode ser feita com as instalações energizadas. Os procedimentos a serem seguidos para a execução da limpeza convencional, assim como todos os equipamentos necessários são descritos em [9], [10] e [11].



Figura 1.4 - Maior detalhe da lavagem convencional de forma manual.



Figura 1.5 - Outro ângulo da lavagem convencional de forma manual.

Atualmente é utilizado no processo de lavagem com água aproximadamente 8000 litros de água desmineralizada para lavar, em média, entre 60 a 70 estruturas de média tensão. Portanto, isso mostra o desperdício de água na limpeza dos isoladores, além de um cuidado especial com a qualidade da água para efetuar o serviço com a linha energizada. Em período de chuva a lavagem dos isoladores não é realizada, pois a lavagem é feita naturalmente, sendo feita apenas no período seco.

1.2 - OBJETIVOS

Esta pesquisa tem por objetivo propor uma inovação tecnológica que é a lavagem a seco dos isoladores utilizados no sistema elétrico. A lavagem atual de isoladores de vidro e porcelana é feita com água que pela força do arraste e pela sua propriedade de solvente, provoca a remoção do produto da poluição acumulada no isolador. A lavagem dos isoladores poliméricos não é recomendada pelo método convencional tendo em vista, a sua principal característica que é a higroscopicidade. A proposta da pesquisa é a substituição da água pelo ar como fluido utilizado na lavagem dos isoladores.

A lavagem a seco de isoladores que esta pesquisa se propõe desenvolver, vai permitir uma limpeza ecologicamente correta, isto é, com um menor impacto ambiental pois não será utilizada uma grande quantidade de água. O processo torna-se mais abrangente, tendo em vista que com a utilização do ar na limpeza além dos isoladores já lavados com água (vidro e porcelana) os isoladores poliméricos também poderão ser lavados.

Tem-se ainda o fato da condutividade elétrica do ar ser cerca de 20 vezes menor do que a condutividade da água e desta forma pode tornar o processo muito mais seguro do ponto de vista do operador. Este novo método surge para substituir o procedimento convencional utilizado atualmente pela concessionária para a limpeza dos isoladores.

1.3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No tema que trata este trabalho, a lavagem a seco de cadeias de isoladores, não se encontra algo relacionado na literatura científica. O que se encontra em termos de lavagem de cadeias de isoladores são trabalhos que tratam da lavagem com água e tratam a respeito dos níveis de poluição encontrados em certas regiões e dos efeitos dela sobre os isoladores. Em relação às temáticas complementares do trabalho, tais como os isoladores, têm-se alguns trabalhos, mas a maioria de pouca relevância no estudo em questão. Uma abordagem teórica a respeito dos principais compressores foi feita. Algumas normas técnicas também foram utilizadas como referências.

Em se tratando da lavagem das cadeias de isoladores com utilização da água, Leslie Hill em 1947 tratou da possibilidade de limpeza de isoladores utilizando jato de água em alta pressão e também da corrente de fuga através do jato de água.

Em 1994, Perin e Ramamoorthy no artigo *Live-Line Insulator Washing: Experimental Investigation to Assess Safety and Efficiency Requirements*, avaliam a lavagem de isoladores em linha viva com foco no jateamento portátil e no jateamento montado em helicóptero levando em conta segurança, eficiência e confiabilidade.

José Renato Ferreira no artigo de 1997, *Lavagem de Isoladores em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Energizadas*, compara o método de

lavagem adotado pela COELCE com outro método já existente para realizar a mesma função. O método adotado pela COELCE busca lavar os isoladores em redes elétricas energizadas, sem interromper o fornecimento de energia com uso de um robô enquanto o outro método em questão é feito de forma manual (por pessoas). Também é feita uma comparação em termos dos custos de cada um dos métodos.

Em relação aos níveis de poluição em determinadas regiões e sua influência nos isoladores, em 1992, Lin, Chen e Morita, mostraram no artigo *Natural Insulator Contamination Test Results on Various Shed Shapes in Heavy Industrial Contamination Areas*, resultados de testes em diversos tipos de isoladores localizados em áreas de pesada poluição industrial na China.

Em 2004, Darcy de Mello e Raimundo Tarcísio apresentaram um estudo dos efeitos da poluição sobre os isoladores, assim como a metodologia para a obtenção de valores que possam determinar o grau de poluição desses equipamentos no artigo, *Avaliação do Grau de Poluição em Instalações de Transmissão, Subestação e Distribuição*.

Em 2005, Gerardo Montoya e Ramiro Hernández, no artigo *Experiences on Pollution Level Measurement in Mexico*, foi feito o levantamento de um mapa de contaminação para o desenvolvimento de um sistema de medição de corrente de fuga para o diagnóstico de isoladores instalados em linhas de transmissão. Mostra também o que é feito no mundo em relação ao problema da poluição dos isoladores.

Em *Efeitos da Poluição Atmosférica (Litorânea e Industrial) em Isoladores da rede elétrica da Região Metropolitana de Salvador*, de 2007, foi avaliado o desempenho de isoladores submetidos a um ambiente poluído. Neste artigo também se faz uma avaliação de alguns materiais usados na fabricação de isoladores e seu comportamento como dielétrico além de uma investigação dos poluentes encontrados na superfície dos isoladores.

Em *Transmissão de Energia Elétrica – Linhas Aéreas*, de Rubens Dario Fuchs, 1979, tem-se a descrição das funções e dos materiais usados na fabricação dos isoladores assim como os principais tipos.

Em *Residential, Commercial, Industrial Electrical Systems: Equipment and Selection* de Hemant Joshi, 2008 tem-se a descrição dos tipos de isoladores e suas aplicações.

No que se refere aos compressores tomou-se como referência o livro *Compressores Industriais* de Paulo Sérgio Rodrigues, 1991, que mostra os tipos de compressores existentes na indústria seu princípio de funcionamento e principais características.

Na dissertação de Victor Aguiar, 2008, *Estudo de Eficiência Energética no Acionamento de um Compressor Parafuso em um Sistema de Ar Comprimido*, foi tomado como referência a abordagem dos compressores rotativos de parafuso.

Quanto às normas, podem ser citados os procedimentos de execução, PEX, utilizados pela COELCE na lavagem das cadeias de isoladores. As PEX's contêm os procedimentos e regras a serem obedecidas no processo de limpeza assim como os recursos materiais necessários. São elas a PEX – 062/2006 R-01 que trata da lavagem de isoladores em linha de transmissão e subestação desenergizadas, a PEX – 028/2006 R-03 que trata da lavagem de isoladores em linha de transmissão e subestação energizadas e a PEX – 008/2006 R-06 que trata do procedimento para execução de lavagem de redes de média tensão energizadas.

A norma NBR – 10621: 2005 trata de ensaios de poluição artificial em isoladores utilizados em sistemas de alta tensão em corrente alternada. Utilizou-se essa norma com referência para os ensaios de poluição artificial em câmara de névoa salina.

A norma NBR 5032: 1984 trata dos testes de tensão aplicada de frequência industrial em isoladores de porcelana ou vidro para linhas aéreas e subestações de alta tensão. Esta norma foi usada como referência para os testes de medição da corrente de fuga das cadeias de isoladores.

1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 trata de uma explanação geral sobre os isoladores, mostrando sua função no sistema, materiais usados em sua fabricação, principais conseqüências e causas das falhas em isoladores caracterizando assim sua grande importância para o sistema elétrico.

O capítulo 3 aborda todos os testes laboratoriais de limpeza a seco dos isoladores, os procedimentos de limpeza e descrição dos componentes e equipamentos necessários para a realização dos testes. Trata dos métodos de poluição artificial e porque foram usados estes métodos. Este capítulo trata também dos ensaios elétricos realizados, como os testes de tensão aplicada, as medições de corrente de fuga e medição da rigidez dielétrica dos isoladores e resultados obtidos.

O capítulo 4 abrange a parte de campo do trabalho. Mostra os testes de limpeza a seco realizados no centro de treinamento da B&Q eletrificação e nas redes de distribuição da COELCE, assim como um procedimento alternativo que auxilia a técnica proposta de limpeza a seco.

O capítulo 5 aborda a conclusão do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

No Apêndice A é mostrado os principais tipos de isoladores existentes e utilizados no sistema elétrico, assim como apresentadas algumas de suas principais características.

Uma simulação computacional feita no início da pesquisa com o intuito de se observar o comportamento do ar sobre a superfície do isolador e obter alguns resultados para os primeiros testes práticos é apresentada no Apêndice B.

No Apêndice C são mostrados os principais bicos utilizados no procedimento de limpeza a seco.

CAPÍTULO 2

ISOLADORES

Neste capítulo, apresenta-se uma explanação geral sobre os isoladores, principais causas e conseqüências de falhas, tipos de materiais usados em sua fabricação e principais propriedades elétricas relacionadas. Para mais detalhes a respeito dos tipos de isoladores existentes e usados nas redes de distribuição e transmissão de energia elétrica além das principais características físicas, elétricas e mecânicas de cada tipo, consultar Apêndice A.

2.1 - ASPECTOS GERAIS

Os isoladores para linhas de alta e baixa tensão são dispositivos que têm função de mantê-los isolados do aterramento, de partes condutoras e das próprias estruturas de suporte e também dar suporte mecânico rígido ou flexível para os condutores elétricos ou equipamentos [4].

No que se refere à sua função de suportabilidade mecânica, pode ser visto em [5] que os isoladores são submetidos a solicitações mecânicas que lhes são transmitidas pelos cabos condutores. Essas solicitações são de três tipos. Forças verticais que se devem ao próprio peso do condutor, forças horizontais axiais no sentido dos eixos longitudinais das linhas para que os condutores se mantenham suspensos sobre o solo e a terceira e última são as forças horizontais transversais, em sentido ortogonal (perpendicular) aos eixos longitudinais das linhas, que se devem à ação da pressão do vento sobre os próprios cabos. Esses esforços são transmitidos pelos isoladores às estruturas que devem absorvê-los.

No que diz respeito às solicitações de natureza elétrica a que um isolador deve resistir são, tal como visto em [5], as tensões mais elevadas que podem ocorrer nas linhas, e sendo essas divididas em três. Tensão normal e sobretensões em frequência industrial. Surtos de sobretensão de manobra, que são de curta duração e podem atingir níveis de 3 a 5 vezes a tensão normal entre fase e terra. E por fim sobretensões de origem atmosférica, cujas intensidades podem ser muito elevadas e variadas.

Um isolador eficiente deve ainda ser capaz de fazer o máximo uso do poder isolante do meio que o envolve a fim de assegurar isolamento adequado. A falha de um isolador pode ocorrer tanto no interior do material (perfuração) ou pelo ar que o envolve (descarga externa). Seu desenho deve ser de forma a assegurar uma distribuição balanceada de potenciais e, conseqüentemente, dos gradientes de tensão no ar, com o objetivo de assegurar tensões de descarga adequadas. Daí suas formas peculiares. Além desses requisitos, deve ainda satisfazer outro, que é evitar a produção da indesejável radiointerferência. Exige-se ainda dos isoladores extrema robustez física de modo a resistir a condições de manuseio e armazenamento mais severas. Suas superfícies devem ter acabamento capaz de resistir bem às exposições ao ambiente, mesmo em atmosfera de elevado grau de poluição [5].

Descreve-se a seguir algumas características e propriedades elétricas dos dielétricos. A permissividade dielétrica que é a maior ou menor capacidade do dielétrico em permitir o adensamento do fluxo do campo elétrico. A unidade da permissividade é F/m (farad por metro). Tem-se também a permissividade relativa de um determinado material que é a relação da permissividade desse material, com a permissividade do vácuo, chamada também de constante dielétrica. Resistência de isolamento que é a medida da resistência à condução no dielétrico e varia inversamente proporcional com a temperatura de trabalho e a freqüência. Corrente de perda que é a corrente que escoar entre duas extremidades do dielétrico por trajetórias outras que não a sua região superficial. E por fim a rigidez dielétrica que é a propriedade do dielétrico de se opor à descarga elétrica através de sua estrutura. A rigidez dielétrica diminui com o aumento da temperatura e sua unidade é dada em kV/mm (quilovolt por milímetro). O gradiente de tensão para o qual a rigidez dielétrica do ar é rompida é de aproximadamente 1 kV/mm [17]. A umidade contribui para diminuir a rigidez dielétrica em torno da estrutura isoladora e assim aumentar a probabilidade de ocorrência de uma descarga disruptiva.

2.2 - MATERIAIS ISOLANTES

Os isoladores são fabricados com materiais dielétricos, ou seja, que não permitem a livre circulação de cargas elétricas, e podem ser divididos em três tipos básicos de materiais, conforme [6]. São eles isoladores cerâmicos (porcelana

vitrificada), isoladores de vidro e isoladores poliméricos e compósitos. A seguir será dissertado sobre cada um desses materiais.

2.2.1 Isoladores de Porcelana

Nesse tipo de isolador a porcelana é vitrificada para minimizar os poros e bolhas de ar e assim melhorar a resistência dielétrica do isolador. A resistência dielétrica desse isolador é da ordem de 6,5 kV/mm. A resistência mecânica sob tração é 2 kg/mm² (quilograma por milímetro quadrado) e sob compressão é 30 kg/mm². Este é o mais popular material usado em isoladores [5], [6].

As propriedades dielétricas da porcelana, segundo [4], são dependentes de um grande número de parâmetros, entre os quais se destacam a composição química, a espessura, as condições superficiais e a temperatura de sinterização (processo no qual pós com preparação cristalina ou não, uma vez compactados, recebem tratamento térmico, no qual a temperatura de processamento é sempre menor que a sua temperatura de fusão). Também, a espessura da amostra tem efeito na rigidez dielétrica, a qual diminui exponencialmente com seu acréscimo em consequência dos vazios e formas irregulares de grãos. A rigidez dielétrica da porcelana, em geral, diminui com o teor de poros. Mas para a mesma porosidade, quanto menor essa distribuição, maior a rigidez dielétrica.

A constante dielétrica da porcelana está entre 5,08 e 5,5, valores esses válidos para a temperatura de 25 °C (grau centígrado) e faixa de frequência de 60 Hz (hertz) a 1 MHz, e sua rigidez dielétrica é da ordem de 100 kV/mm.

Podem ser citadas como as principais vantagens do uso da porcelana na fabricação de isoladores o seu longo histórico de uso, o desempenho conhecido e a, fácil intercambialidade.

Como principais limitações do seu uso podem ser citadas peso, defeitos ocultos, susceptíveis ao vandalismo e técnicas de detecção de falhas não totalmente confiáveis.

2.2.2 Isoladores de Vidro

O isolador é fabricado com vidro temperado. Ele tem resistência dielétrica da ordem de 14 kV/mm. A resistência mecânica dos isoladores de vidro sob tração é a mesma que para isoladores de porcelana, mas sob compressão os isoladores de vidro possuem maior resistência [5], [6].

A constante dielétrica do vidro está entre 5 e 10, valores esses válidos para a temperatura de 25 °C e faixa de frequência de 60 Hz a 1 MHz, e sua rigidez dielétrica é da ordem de 80 kV/mm.

Podem ser citadas como as principais vantagens do uso do vidro na fabricação de isoladores, assim como os isoladores de porcelana, longo histórico de uso, desempenho conhecido e fácil intercambialidade. Além dessas vantagens, os defeitos são facilmente visíveis, possui um coeficiente de expansão menor que o da porcelana e, portanto apresenta menor deformação devido às mudanças de temperatura (por ser transparente absorve menos calor do sol). Os isoladores de vidro possuem custos mais baixos que os isoladores de porcelana.

Como principais limitações do seu uso pode-se citar a percepção negativa quanto à fragilidade, peso, atrativo para o vandalismo, mais sujeito a danos por vandalismo (devido à sua têmpera, os isoladores não resistem bem a impactos) e a umidade facilmente condensa no vidro.

2.2.3 Isoladores Poliméricos

Os isoladores poliméricos (também chamados isoladores compósitos) são feitos de duas partes isolantes. A primeira é um bastão de fibra de vidro funcionando como um núcleo e “saias” feitas de alguma espécie de polímero tais como teflon, resina epóxi, borracha de silicone, borracha de etileno propileno-dieno (EPDM) e polipropileno. As saias protegem o núcleo dos efeitos severos do ambiente. O bastão é conectado às ferragens, feitas de aço ou alumínio, de diferentes modos. Esses modos incluem cola com resina epóxi, inserção de cones e a compressão do metal no bastão. O núcleo suporta a carga mecânica [4], [6].

Podem ser citadas como as principais vantagens dos isoladores feitos de polímeros bom desempenho em ambientes poluídos, possuem baixa densidade o

que confere leveza e flexibilidade, facilidade e baixo custo de instalação, percepção de que são mais difíceis de serem danificados por vandalismo e devido a serem leves impõem menos carga às estruturas.

Como principais limitações do seu uso pode-se citar fratura frágil do núcleo, efeito do tempo no processo de envelhecimento, menor intercambialidade, pode ter defeitos ocultos e seu material é higroscópico (tem tendência a absorver água) e com isso a água absorvida, seja de chuva ou da condensação da umidade, pode alcançar o bastão e causar sua deterioração.

Dentre os materiais usados na fabricação dos isoladores poliméricos a fibra de vidro usada na fabricação do bastão tem constante dielétrica de 6,5. Na fabricação das saias utilizam-se teflon, resina-epóxi, borracha de silicone, etileno propileno-dieno (EPDM) e o polipropileno. O valor de constante dielétrica para o teflon está em torno de 2,1, entre 2,5 e 6 para a resina-epóxi, 2,5 a 2,7 para a borracha de silicone, aproximadamente 2,7 para o EPDM e de 2 a 2,3 para o polipropileno. Esses valores de constante dielétrica são válidos para a temperatura de 25 °C e faixa de frequência até 1 MHz. Em relação à rigidez dielétrica desses materiais são respectivamente, 20 a 80 kV/mm, 15 a 20 kV/mm, 17 a 20 kV/mm, 38 kV/mm e 20 a 26 kV/mm.

2.3 - PRINCIPAIS CAUSAS E CONSEQÜÊNCIAS DE FALHAS EM ISOLADORES

Os isoladores e as cadeias desses, são elementos que ficam submetidos a diversas condições adversas, sejam elas nas próprias linhas onde estão instalados ou mesmo na questão de transporte e armazenamento. Estão submetidos a esforços mecânicos de tração, compressão, assim como estão submetidos às adversidades climáticas como às forças do vento, de gelo acumulado, temperaturas extremas e condições do ambiente inadequadas e desfavoráveis. Estão também sujeitos a falhas de caráter construtivo. A seguir algumas das principais causas de falhas e algumas conseqüências serão apresentadas.

Conforme [4], a importância da avaliação dos isoladores vem do fato de corresponderem a cerca de 10% dos custos diretos de uma linha de transmissão e, indiretamente, por causarem prejuízos de grande custo ao setor elétrico, como na interrupção no fornecimento de energia ou “apagões”.

A diminuição da capacidade dielétrica de um isolante pode ter como origem um aumento da passagem da corrente de fuga (que é um fluxo de corrente anormal ou indesejada em um circuito ou sistema elétrico devido a caminhos de baixa impedância) entre seus terminais, ou seja, o aumento da condutividade superficial. Este aumento se deve, principalmente, ao grau de contaminação por agentes poluentes que modificam a resistividade elétrica da sua superfície. Estas contaminações podem ser o depósito de poeira, minerais inertes condutivos, como carbono e óxidos metálicos e as soluções de água e sal, que acarretam comportamentos semelhantes ao de um resistor variável e não-linear (varistor), sendo em muitos casos instáveis à presença do campo elétrico. Esta corrente de fuga acaba originando calor, produtos resultantes da eletrólise e descargas elétricas. Os principais processos de transporte e deposição de materiais nas superfícies dos isoladores e outros acessórios da rede elétrica são decorrentes de forças gravitacionais, atração eletrostática das partículas eletricamente carregadas, migração de partículas de alta permissividade para regiões com campo elétrico intenso e evaporação de soluções ou suspensões [4].

Esse problema da condutividade superficial pode ser melhorado com a utilização de isoladores com maior distância de escoamento, aumentando a distância de escoamento com a associação de isoladores em série ou limpando os isoladores preventivamente. A condutividade superficial está ilustrada na figura 2.1. A distância de escoamento é um parâmetro de extrema importância nos isoladores e nada mais é do que a menor distância entre duas partes condutoras, medidas sobre a superfície da isolação entre essas partes [12]. Conforme o conceito apresentado para distância de escoamento pode ser dito que essa distância está intimamente ligada à forma e comprimento do isolador (valores dessa grandeza para diversos isoladores assim como os tipos de isoladores e suas principais características serão mostrados no Apêndice A). A distância de escoamento é ilustrada nas figuras 2.2 e 2.3 para dois tipos de isoladores.

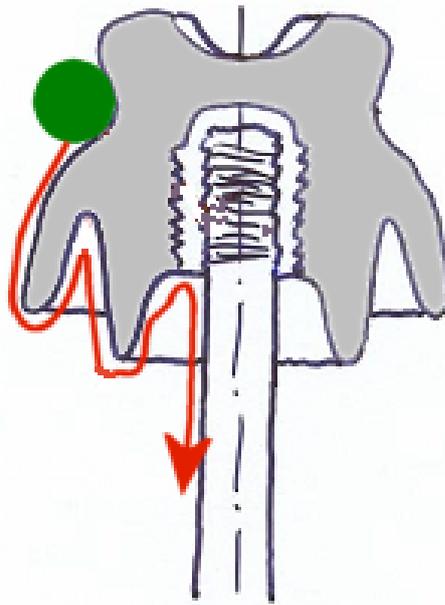


Figura 2.1 - Ilustração do fenômeno da condutividade superficial [8].

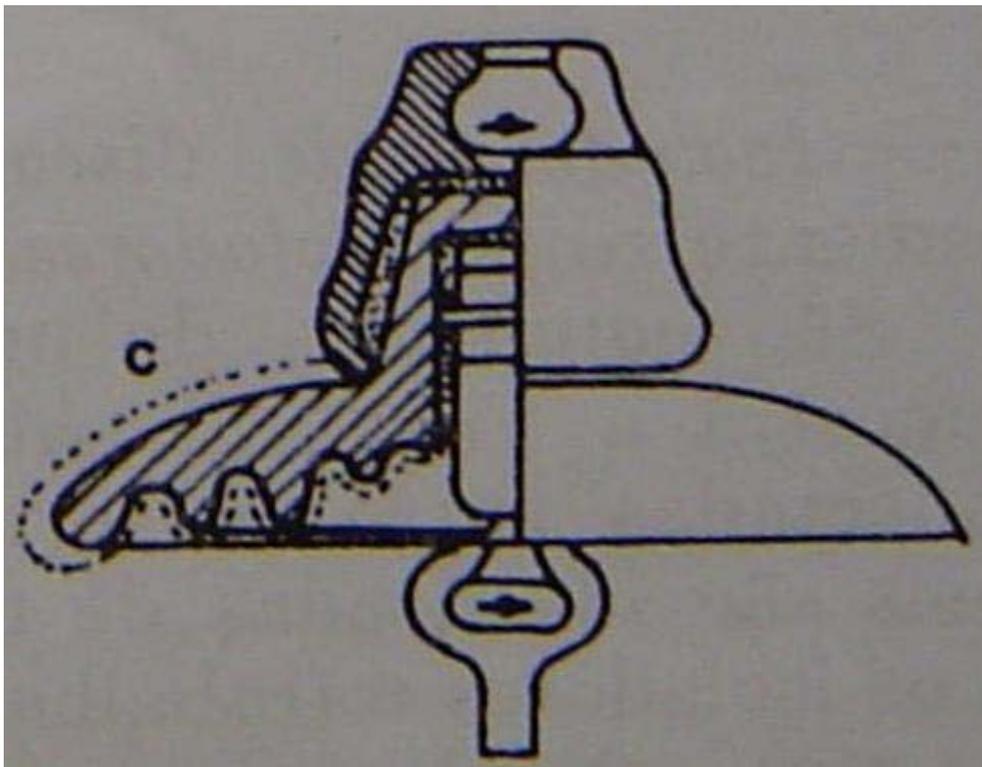


Figura 2.2 - Distância de escoamento em um isolador tipo disco [5].

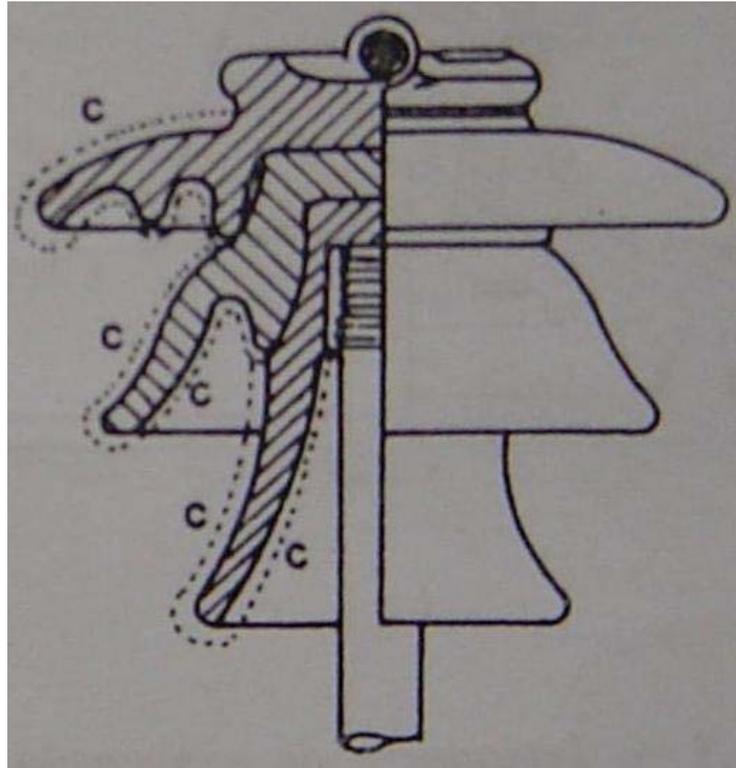


Figura 2.3 - Distância de escoamento em um isolador tipo pino multicorpo [5].

Outros fenômenos indesejáveis que podem ocorrer nos isoladores são a condutividade da massa do isolador, a perfuração da massa do isolador e a descarga disruptiva e contornamento.

A condutividade da massa do isolador é a perda da capacidade dielétrica do isolador causando condução por todo o isolador. É um incidente muito grave, mas com os materiais utilizados na fabricação dos isoladores a corrente resultante pode ser considerada insignificante. O fenômeno é ilustrado na figura 2.4.

A perfuração da massa do isolador é um incidente com probabilidade crescente de ocorrência com o aumento do nível de tensão. Este processo aterra o condutor provocando curto-circuito fase-terra. Em baixa tensão este problema é praticamente inexistente, devido à pequena espessura do isolador, que garante mais homogeneidade ao material que o constitui. Em alta e extra-alta tensão a espessura do material isolante é maior, aumentando a probabilidade de introdução de uma heterogeneidade no processo de fabricação do isolador que possa conduzir ao risco de perfuração. A figura 2.5 ilustra o fenômeno da perfuração [8].

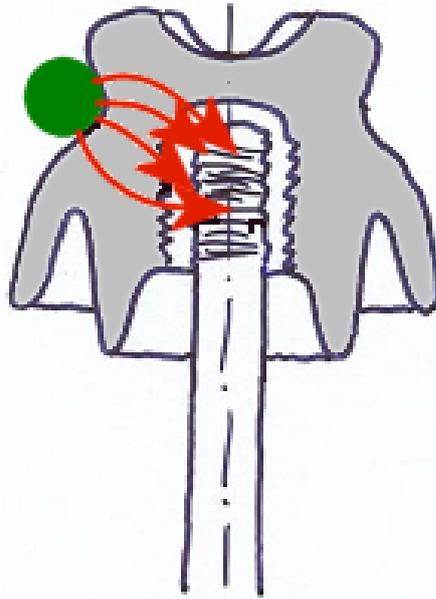


Figura 2.4 - Fenômeno da condutividade da massa do isolador [8].

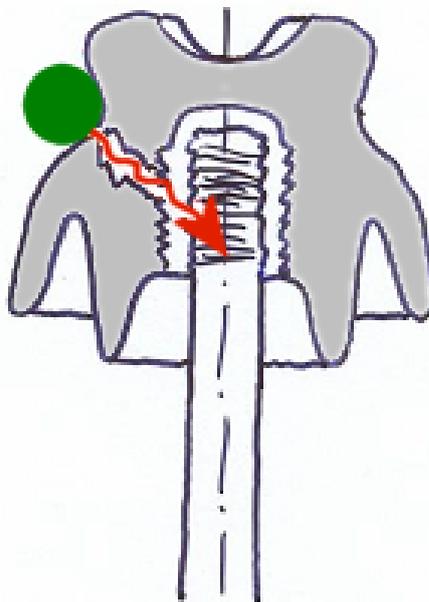


Figura 2.5 - Fenômeno da perfuração da massa do isolador [8].

A descarga disruptiva ou *flashover* é a condução de corrente entre um condutor e as partes metálicas do isolador através do ar que o circunda. Isso ocorre quando a rigidez dielétrica do ar se apresenta com um valor muito baixo (acontece

com chuva ou com um alto grau de umidade do ar). Uma descarga disruptiva pode acontecer também através da superfície do isolador em decorrência do aumento de intensidade das descargas superficiais (descritas a seguir). Na figura 2.6 é ilustrado o comportamento do fenômeno da descarga disruptiva e na figura 2.7 pode ser visto o fenômeno real.

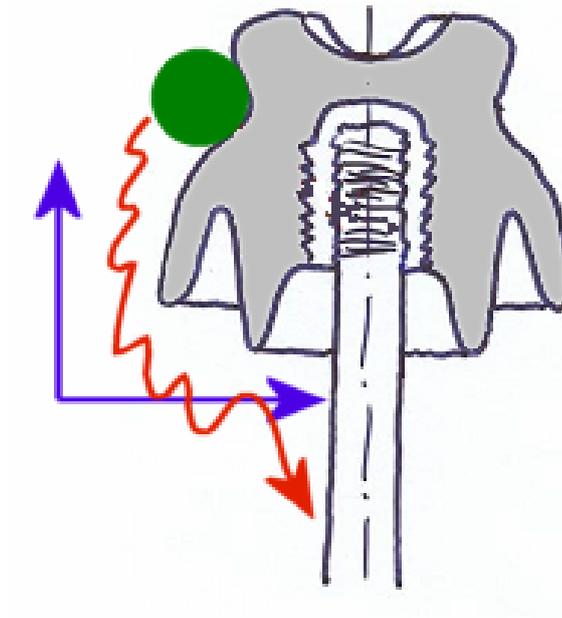


Figura 2.6 - Ilustração do fenômeno da descarga disruptiva ou *flashover* [8].



Figura 2.7 - Imagem de um *flashover* [18].

As descargas superficiais e o trilhamento elétrico são também fenômenos bastante indesejáveis que ocorrem nos isoladores da rede elétrica. Segundo [4], as descargas superficiais ocorrem, normalmente, entre o condutor e parte da superfície do sistema isolante. Quando o campo elétrico paralelo à superfície excede determinado valor crítico, devido a alterações na sua condutividade, inicia-se o processo de descargas elétricas superficiais, com a formação de trilhamento elétrico, que se propaga ao longo da direção do campo. O trilhamento elétrico é uma degradação irreversível, formada por caminhos que se iniciam e se desenvolvem na superfície de um material isolante. Estes caminhos são condutivos mesmo quando secos. A ocorrência do fenômeno de trilhamento elétrico até a ruptura do dielétrico pode ser descrita como contaminação e umedecimento da sua superfície, formando uma camada condutora com baixa resistência superficial. O próximo passo seria a passagem de corrente elétrica superficial com alta dissipação de calor e perda não-uniforme da camada condutora, favorecendo a formação das bandas secas. Há a diminuição do fluxo de corrente elétrica superficial, devido à presença da banda seca. Ocorre a elevação da temperatura pelas descargas superficiais, causando a formação de resíduos que geram a erosão gradual. Com isso ocorre a propagação da trilha de resíduos de carbono e por fim a ruptura completa da superfície do material, de maneira que o volume restante é incapaz de apresentar resistência à tensão elétrica aplicada.

No que se refere ao envelhecimento e desgaste do dielétrico, os principais fatores responsáveis por esses fenômenos são citados a seguir. A incidência de energia solar, luminosa ou destrutiva (tipo radioativa ou similar), o calor, a frequência, a umidade, a salinidade e os gases venenosos, o tempo prolongado de aplicação de uma diferença de potencial elevada, impulsos de tensão e porosidade do dielétrico.

Os principais problemas de nível estrutural que podem ser encontrados nos isoladores de porcelana, por exemplo, são perfurações devido a fissurações na porcelana (pela expansão da camada cimentante entre o isolante e a ferragem), rachaduras na camada de cimento, desgaste do pino e corrosão das ferragens. No caso dos isoladores poliméricos os principais problemas que podem ser encontrados, por exemplo, são os vazios entre o núcleo e as saias e entre as saias moldadas individualmente que aumentam a probabilidade de falha. A fratura do

núcleo de fibra de vidro e a má aderência da selagem permitindo o contato do núcleo com poluentes atmosféricos e a umidade.

No caso dos isoladores poliméricos ocorre ainda um fenômeno bastante prejudicial à sua estrutura física. É o fenômeno da hidrólise. A hidrólise é um fenômeno de despolimerização resultante da reação química entre íons da água ou vapor e as extremidades livres das cadeias de polímeros. Esse fenômeno causa degradação elétrica e/ou mecânica dos isoladores compostos (são formados por duas partes isolantes), ocorrendo nos seus materiais componentes (revestimento e resina do núcleo).

A contaminação dos isoladores com agentes poluentes pode gerar uma série de problemas sérios para o sistema elétrico. A atmosfera poluída favorece a formação de uma camada constituída por substâncias que, dissolvidas em água, produzem soluções condutoras sobre a superfície do isolador. Enquanto a camada se mantém seca não há alteração no comportamento dielétrico, no entanto, durante um processo de umidificação onde os sais contidos na camada não sejam removidos, podem ocorrer descargas parciais sobre a superfície iniciando um processo que pode chegar a uma descarga disruptiva. As descargas disruptivas também geram ozônio que é um agente oxidante e causador da corrosão elétrica nos isoladores, agravando o problema. O grau de contaminação superficial dos isoladores pode reduzir significativamente a tensão na qual se produz a descarga disruptiva, a qual além do problema da corrosão já citado, pode tirar de serviço uma linha de transmissão ou distribuição, conduzindo a cortes de energia não planejados e diminuindo a confiabilidade do sistema [16]. Esses problemas podem ser diminuídos e até evitados com a manutenção dos isoladores. Um dos principais tipos de manutenção realizada, que apresenta bons resultados e que é usado em todo o mundo, é a lavagem dos isoladores, como já abordado no capítulo 1.

2.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer deste capítulo foram vistos os principais pontos relacionados aos isoladores usados na rede elétrica, tais como os principais materiais empregados em sua fabricação e algumas propriedades relacionadas e as principais causas e conseqüências de falhas decorrentes nesse equipamento. Com isso pode-

se mostrar a importância deste componente para o sistema elétrico como um todo e da necessidade de sua manutenção.

CAPÍTULO 3

ENSAIOS LABORATORIAIS

A seguir será explicado detalhadamente todo o procedimento de ensaios laboratoriais. Os métodos de poluição artificial utilizados, os testes de limpeza a seco (primeiramente considerando a pressão como principal variável de controle e depois a vazão) das cadeias de isoladores que é a proposição deste trabalho e os testes elétricos de medição de corrente de fuga feitos nas cadeias de isoladores utilizadas nos experimentos para a comprovação deste novo método.

3.1 - MÉTODOS DE POLUIÇÃO ARTIFICIAL

Há uma grande dificuldade em se obter cadeias de isoladores poluídas da rede elétrica, para que sejam feitos os testes de corrente de fuga e em seguida aplicar-se o método de limpeza proposto. Isto ocorre principalmente devido às chuvas que lavam os isoladores e também pela necessidade de desligamento do sistema para a retirada das cadeias de isoladores. Para que os testes pudessem ser feitos com mais rapidez e em tempo hábil, foram utilizados métodos de poluição artificial. Nesses métodos foi utilizada como substância poluidora uma solução salina. Essa escolha se deve ao fato de o sal ser um dos agentes poluidores mais agressivos e prejudiciais às cadeias de isoladores. Ele ataca as partes metálicas dos isoladores e na presença da umidade forma caminhos condutores pela superfície dos isoladores ocasionando descargas parciais e conseqüentemente podendo ocasionar *flashover*.

Antes da primeira salinização, foi medida a corrente de fuga dos isoladores novos, para usar essas medidas como referência. Os testes de medição de corrente de fuga foram feitos no laboratório de ensaios elétricos da B & Q Eletrificação LTDA localizada no município do Euzébio. Dois métodos de poluição artificial foram utilizados nos experimentos. O primeiro deles foi o método da Câmara de Névoa Salina e o segundo foi o Método Manual. Os dois métodos são descritos a seguir.

3.1.1 Método da Câmara de Névoa Salina

Devido à grande dificuldade em se retirar cadeias de isoladores poluídas da própria rede elétrica, foi usado como alternativa, métodos de poluição artificial. O primeiro método utilizado foi o da câmara de névoa salina. A câmara em questão pode ser vista na figura 3.1 de frente e na figura 3.2 no seu interior.



Figura 3.1 - Imagem frontal da câmara de névoa salina (foto do autor).



Figura 3.2 - Imagem do interior da câmara de névoa salina (foto do autor).

A quase totalidade dos testes realizados foram feitos em cadeias com 3 isoladores, sendo os isoladores de porcelana do tipo disco. Os ensaios com a câmara de névoa salina foram feitos na divisão de química do NUTEC (Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará). A câmara de névoa salina tem como sua principal aplicação testes de corrosão em materiais metálicos.

As cadeias de isoladores a serem testadas são colocadas no interior da câmara e ficam penduradas por bastões de fibra, que podem ser vistos na figura 3.2, que passam pela campânula da cadeia.

Segundo a norma ASTM B117, [30], a salinidade da solução usada na câmara de névoa salina, cloreto de sódio (NaCl), para testes de corrosão deve ser de 5% e o tempo de permanência do material na câmara de 24 a 5000 horas, sendo o tempo adotado para os testes incrementado de 24 horas. Já na norma NBR 10621, [12], a salinidade recomendada fica no intervalo de 2,5 a 224 kg/m³ ou de 0,25 a 22,4 % e quanto ao tempo de permanência na câmara não é citado nessa norma. Como não há menção nas normas de valores de salinidade específicas para ensaios de poluição artificial utilizou-se inicialmente o valor de 5%. No caso do tempo de duração do ensaio para essa aplicação também não há menção específica nas normas então adotou-se o tempo de 6 horas que é um valor bem abaixo do valor mínimo utilizado em ensaios de corrosão. Para termos de comparação, a água do mar de todo o mundo tem salinidade média de 3,5%.

Foi observado que o nível da salinização dos isoladores, quando submetido a uma inspeção visual, não parecia suficientemente agressivo. Para se saber o nível de poluição da cadeia de isoladores é realizada a medição da corrente de fuga dessa cadeia, poluída na câmara de névoa salina, e comparada com a corrente de fuga medida em uma cadeia de isoladores limpa com água ou nova. Outra forma de avaliar o nível de poluição em cadeias de isoladores é a medição da Densidade de Depósito de Sal Equivalente (DDSE), que estima a quantidade de sal depositada na superfície do isolador. A unidade de medida da DDSE é mg/cm² (miligramas por centímetro quadrado).

Com o intuito de conseguir um nível de poluição maior nas cadeias, outras configurações de ensaios foram utilizadas. As escolhas das concentrações e dos tempos foram empíricas, feitas para a verificação do nível de poluição nos isoladores com a mudança desses parâmetros. Manteve-se a concentração da

solução salina em 5% e aumentou-se o tempo de permanência das cadeias na câmara para 24 horas em vez de apenas 6 horas. Outra configuração para o teste foi aumentar a concentração da solução para 10% e manter as cadeias de isoladores na câmara por 6 horas. Na tabela 3.1 é feita uma comparação entre as 3 configurações utilizadas nos ensaios. É dado na tabela o valor da concentração da solução salina utilizada, o tempo de permanência das cadeias de isoladores na câmara, a quantidade de sal aderida (em gramas) e a DDSE, que como dito anteriormente, mede a quantidade de sal em uma determinada área do isolador.

Tabela 3.1 - Comparação do nível de poluição entre 3 configurações de ensaio.

Salinização em Câmara de névoa Salina				
	Concentração (%)	Tempo (h)	Quantidade de NaCl (g)	DDSE (mg/cm ²)
Salinização I	5	6	0.043	0.2086
Salinização II	5	24	0.064	0.3105
Salinização III	10	6	0.127	0.6162

O ensaio para a obtenção do valor da densidade de depósito de sal equivalente foi feito com apenas 1 isolador da cadeia. A DDSE foi obtida da seguinte maneira: Após a retirada do isolador da câmara de névoa salina e a secagem deste, o isolador é lavado com água destilada e a água desta lavagem é acumulada em um recipiente. Em seguida é feita a titulação desta solução obtendo-se assim a quantidade de sal em gramas. Calcula-se então a DDSE dividindo-se o valor da quantidade de sal obtido pela área do isolador. A área do isolador é 206.09 cm². O modelo do isolador testado é mostrado na figura 3.3.

Para se saber qual o nível de poluição, utiliza-se os valores de DDSE mostrados na tabela 3.1, e observa-se baseado na classificação da tabela 3.2 em que nível está a poluição, conforme [3].

Na salinização I, com a concentração da solução salina em 5% e o tempo de permanência na câmara em 6 horas, foi obtida uma DDSE de 0,2086 mg/cm² o que equivale dizer que o nível de poluição pode ser classificado como Forte,

conforme tabela 3.2. Na salinização II, foi mantida a mesma concentração e foi aumentado o tempo de permanência do isolador na câmara para 24 horas, obtendo-se uma DDSE de 0,3105 mg/cm² e a classificação como poluição Muito Forte. Na salinização III aumentou-se a concentração da solução para 10% e manteve-se o tempo de permanência na câmara em 6 horas, obtendo-se uma DDSE de 0,6162 mg/cm² e a classificação como poluição Excepcional.



Figura 3.3 - Isolador de porcelana tipo disco (foto do autor).

Tabela 3.2 - Classificação da poluição [3].

Níveis de poluição	DDSE (mg/cm ²)
Insignificante	< 0,015
Muito Fraco	0,015 a 0,03
Fraco	0,03 a 0,06
Moderado	0,06 a 0,12
Forte	0,12 a 0,24
Muito Forte	0,24 a 0,48
Excepcional	> 0,48

Pode-se notar que da salinização I para a salinização II houve um aumento da DDSE devido a um tempo de permanência maior do isolador no interior da câmara. Da salinização I para a salinização III o aumento na DDSE foi bem maior e significativo, concluindo-se que o aumento da concentração da solução salina tem uma maior influência no nível de poluição do que o tempo em que o isolador fica submetido à névoa salina.

Alguns ensaios na câmara de névoa salina foram feitos com uma maior concentração da solução salina (30%), com o objetivo de tornar a poluição sobre a superfície do isolador mais intensa ainda. O que foi observado é que não houve um aumento significativo da concentração de sal sobre a superfície do isolador em relação ao teste feito com 10%. Isso devido à grande umidade no interior da câmara, condensação da névoa salina, que não permite o acúmulo de sal na superfície do isolador mesmo com essa alta concentração de sal.

A seguir é abordado outro método de poluição artificial, chamado de método manual. O método será descrito e uma comparação entre os dois métodos será feita, mostrando as principais vantagens e a comparação das correntes de fuga dos dois métodos.

3.1.2 Método Manual

Com o intuito de se encontrar o método mais adequado e eficaz para a poluição artificial das cadeias de isoladores em laboratório, desenvolveu-se outra forma de poluir artificialmente as cadeias de isoladores (diferente do já conhecido método da câmara de névoa salina), denominado método manual.

A concentração de sal utilizada na solução foi de 35%, buscando-se um valor próximo da condição de saturação de NaCl na água, que é de aproximadamente 35,8%.

Como o próprio nome do método sugere, ele é feito de modo manual, através de um borrifador. O borrifador pode ser visto na figura 3.4.

Foi utilizada uma solução salina com concentração de 35% de forma a maximizar o nível de poluição. Isso foi possível devido à facilidade e curto tempo de

aplicação da solução sobre as cadeias de isoladores que permitiu uma maior aderência do sal na superfície dos isoladores.



Figura 3.4 - Borrifador da solução salina pelo método manual (foto do autor).

O procedimento para a aplicação da solução salina nos isoladores pelo método manual é simples e rápido. Os isoladores ficam suspensos por ganchos que fazem parte de uma estrutura de madeira utilizada para o transporte e sustentação das cadeias de isoladores a serem testadas e que é mostrada na figura 3.5. Nessa figura pode-se observar os isoladores após a aplicação do método manual (da borrifação).



Figura 3.5 - Estrutura de sustentação e transporte das cadeias de isoladores (foto do autor).

Com a cadeia fixada em um suporte, é utilizado o borrifador. Ele contém a solução salina de 35%, que é aplicada duas ou três vezes sobre cada isolador da cadeia. Após a primeira aplicação a cadeia é colocada ao sol para secar. Em caso de tempo chuvoso ou clima muito úmido utiliza-se um secador elétrico. Ele é mantido a uma determinada distância tal que o arraste da solução salina que está sobre o isolador seja mínimo. Em seguida outra aplicação da solução é feita, assim como na primeira aplicação. O processo de secagem é feito da mesma forma. A forma de aplicação da solução salina pode ser vista na figura 3.6.



Figura 3.6 - Aplicação da solução salina nos isoladores pelo método manual (foto do autor).

Comparando a poluição artificial aderida ao isolador pelo método da câmara de névoa salina e pelo método manual, pode-se dizer apenas pela análise visual da figura 3.7, que a superfície do isolador reteve uma maior quantidade de sal com a utilização do método manual. Na comparação da figura 3.7, a cadeia submetida ao método da câmara de névoa salina foi poluída por uma solução com concentração de 30% enquanto que a cadeia submetida ao método manual foi poluída por uma solução com concentração de 35%.

Para o método manual não foi medida a quantidade de sal no isolador e como consequência não foi calculada a DDSE. Sendo assim não se pode classificar o nível de poluição, de acordo com a tabela 3.2, para o método manual e nem fazer comparações da DDSE deste método com o método da câmara de névoa salina. Apesar de a DDSE ser um parâmetro que permite a classificação do nível de contaminação do método de poluição artificial utilizado e a comparação do nível de poluição entre ambos os métodos adotados, conforme a tabela 3.2, esta classificação se limita a um parâmetro químico e que não permite uma análise mais precisa da condição do isolador. Para uma análise mais significativa da condição do isolador utilizou-se a medição da corrente de fuga.

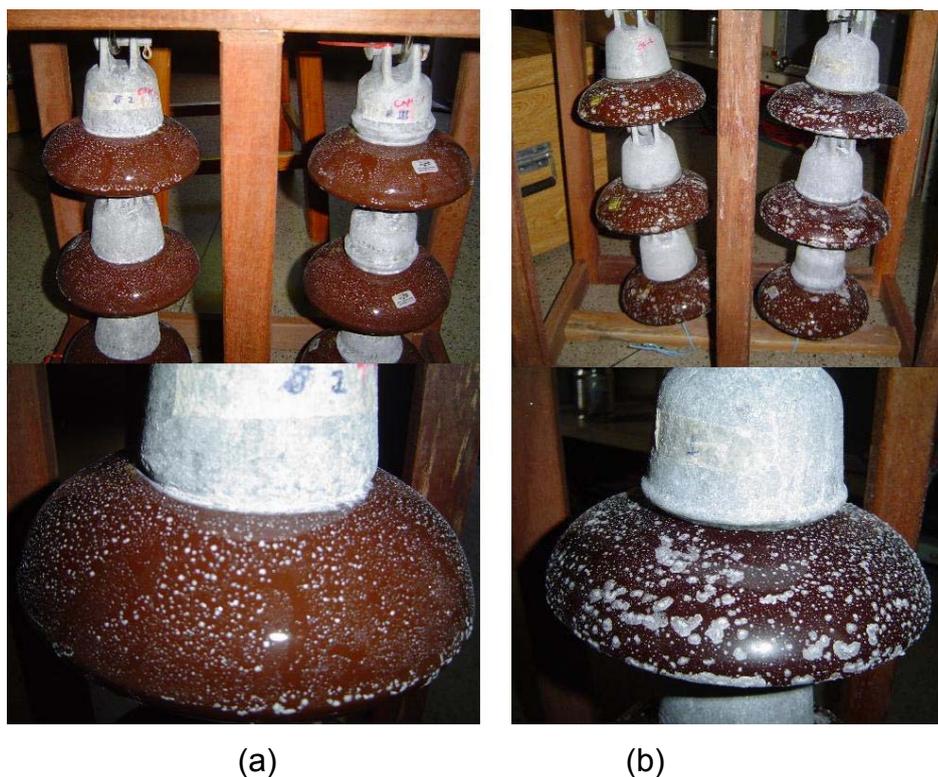


Figura 3.7 - Comparação visual entre o (a) método da câmara de névoa salina e o (b) método manual (foto do autor)

Os testes de corrente de fuga são relativamente rápidos e ainda é possível saber a condição da cadeia de isoladores através de um parâmetro elétrico. Em seguida serão comparadas as correntes de fuga dos isoladores poluídos artificialmente pelos 2 métodos.

Para que os testes com a nova técnica de limpeza proposta seja posto em prática é necessária a escolha de um dos dois métodos de poluição artificial aqui expostos. A técnica de poluição artificial adotada é o método manual. Esse método é mais vantajoso por diversos aspectos. Essas vantagens são descritas a seguir.

1 - O tempo para se salinizar o isolador. Enquanto na câmara de névoa salina o tempo mínimo para se realizar a salinização é de 6 horas, no método manual é necessário em média 20 minutos. O tempo nesses testes é uma variável preciosíssima. Sendo o teste de poluição artificial de 6 horas em alguns casos os ensaios de corrente de fuga só poderiam ser feitos no outro dia, que devido ao clima chuvoso e a alta umidade poderia descaracterizar a condição de poluição do isolador.

2 – A praticidade na aplicação da poluição artificial. Na câmara de névoa salina toda vez que se vai aplicar o método certa quantidade de solução tem que ser preparada. Com o outro método só há a necessidade de preparar a solução uma vez e esta poderá ser usada por um longo período de tempo. A aplicação pode ser feita a qualquer momento e em praticamente qualquer lugar, sendo necessário apenas o borrifador. Esse fato é fundamental no processo como um todo. O laboratório de ensaios elétricos utilizados nos testes se localiza no município do Euzébio - CE. Se os testes de poluição artificial das cadeias de isoladores fossem feitos na câmara de névoa salina, essa distância seria uma grande dificuldade. O ideal é que após as cadeias de isoladores serem poluídas e secadas adequadamente, sejam levadas imediatamente para os testes de corrente de fuga, para que a umidade do ar atmosférico não interfira na condição dos isoladores. Como no método da câmara de névoa salina leva-se 6 horas, no mínimo, para a cadeia ficar poluída, torna-se inviável o transporte imediato para o local dos testes de corrente de fuga. O método manual é aplicado sobre as cadeias de isoladores no próprio local onde vai ser realizado o teste de corrente de fuga. Sendo assim esse método torna-se mais viável.

3 – A eficiência do método. Pela comparação dos dois métodos de poluição artificial mostrados na figura 3.7, a retenção de sal na superfície do isolador pelo método manual é maior. Isso pode ser reforçado pelo teste de corrente de fuga realizado em cadeias poluídas por ambos os métodos. Nas tabelas 3.3 e 3.4 são mostradas as correntes de fuga de uma cadeia de isoladores poluída pelo método da câmara de névoa salina (30%) e pelo método manual (35%) respectivamente.

Para se ter uma melhor visão da diferença entre os valores de corrente de fuga entre os dois métodos de poluição artificial utilizados, foi traçado um gráfico a partir dos valores das tabelas 3.3 e 3.4 que é mostrado na figura 3.8.

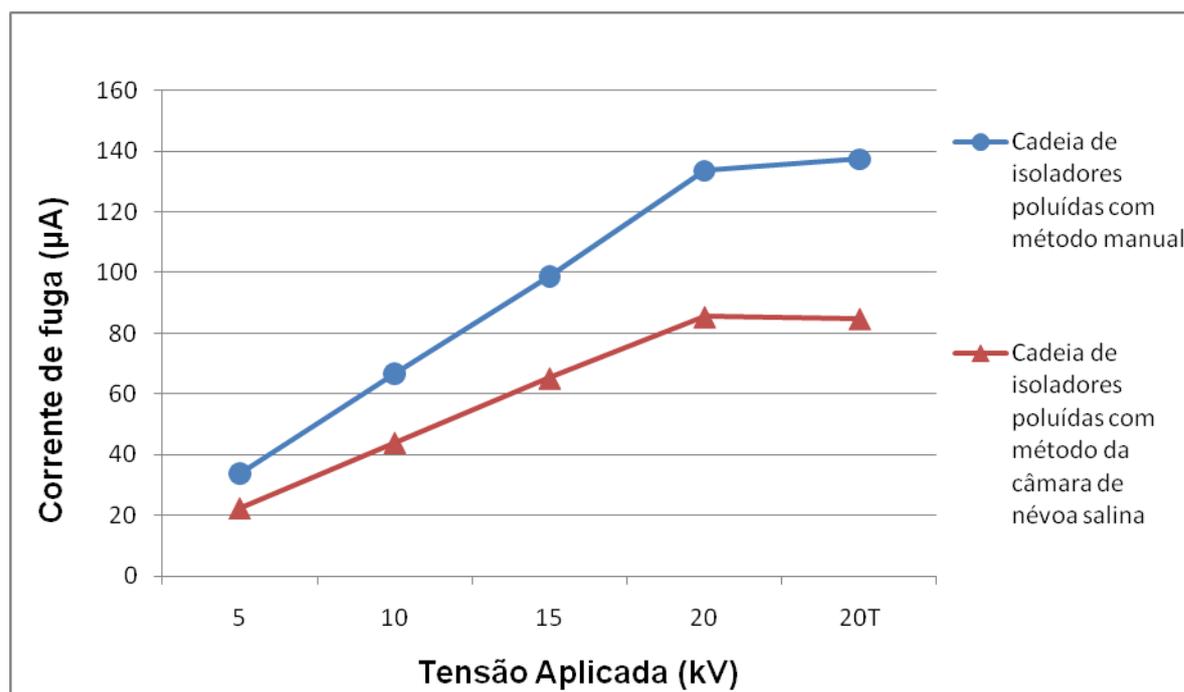


Figura 3.8 – Comparação gráfica entre correntes de fuga de cadeias de isoladores poluídas artificialmente pelos dois métodos citados.

A curva superior na figura (marcação circular) representa os valores de corrente de fuga pela tensão aplicada na cadeia de isoladores poluída pelo método manual e a curva inferior (marcação triangular) a corrente de fuga pela tensão aplicada na cadeia poluída pelo método da câmara de névoa salina.

O método manual apresenta apenas uma pequena desvantagem em relação ao método da câmara de névoa salina, e se refere à uniformidade da salinização das cadeias de isoladores. O método manual não é uniforme, devido à aplicação da solução salina ser feita com um borrifador manual. A quantidade de solução aplicada em uma determinada região do isolador não será a mesma em toda aplicação e nem em todas as regiões igualmente, porém é o que ocorre na prática.

Com o método da câmara de névoa salina há uma uniformidade. A cadeia de isoladores fica confinada dentro da câmara (que fica totalmente vedada) e a névoa salina ocupa todo o volume da câmara, atingindo todas as partes do isolador com maior uniformidade. Essa pequena desvantagem do método manual não tem uma influência significativa, pois a uniformidade não tem grande relevância nesse processo e suas vantagens têm maior relevância para a poluição artificial das

cadeias de isoladores. Sendo assim, pelas vantagens descritas anteriormente para o método manual, este passou a ser utilizado nesta dissertação.

Tabela 3.3 - Cadeia de isoladores poluída pelo método da câmara de névoa salina.

Condição	Tensão Aplicada (kV)	Corrente de Fuga (μ A)	Tempo de Aplicação (Minutos)
Salinizado	5	22.5	-
	10	44.1	-
	15	65.3	-
	20	85.5	-
	20T*	84.9	3

Tabela 3.4 - Cadeia de isoladores poluída pelo método manual.

Condição	Tensão Aplicada (kV)	Corrente de Fuga (μ A)	Tempo de Aplicação (Minutos)
Salinizado	5	33.7	-
	10	66.7	-
	15	98.6	-
	20	133.5	-
	20T*	137.3	3

*Tensão de 20 kV aplicada durante 3 minutos

3.2 - MÉTODOS DE VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DO ISOLADOR ELETRICAMENTE

Para ser comprovada a eficácia da nova técnica de limpeza com os testes em laboratório, deve-se saber qual o estado em que a cadeia de isoladores se encontra quando poluída e qual o estado da cadeia de isoladores após a limpeza com a nova técnica. Também é importante saber qual o estado de uma cadeia de isoladores limpa com água ou nova, para que possa ser feita as devidas

comparações. Isso é feito a partir de determinados parâmetros, que podem ser elétricos ou químicos.

Na seção anterior foi abordado em detalhe um parâmetro químico na classificação do estado poluente do isolador, a DDSE, que poderia ser utilizada também após a limpeza das cadeias de isoladores para saber se houve ou não diminuição do nível de poluição e qual nível atingiram.

Os parâmetros elétricos que foram usados para verificação da condição das cadeias de isoladores foram corrente de fuga e rigidez dielétrica. Esses parâmetros serão comentados a seguir.

3.2.1 Rigidez Dielétrica

A rigidez dielétrica de um dado material é um valor limite de tensão aplicada sobre a espessura deste e a partir do valor limite de tensão, os átomos que compõem o material se ionizam e o material dielétrico deixa de funcionar como um isolante. O valor da rigidez dielétrica depende de diversos fatores sendo os principais: temperatura, espessura do dielétrico e tempo de aplicação da tensão sobre o dielétrico. A rigidez dielétrica é representada pela unidade kV/mm.

Alguns testes foram feitos utilizando a rigidez dielétrica como parâmetro para análise da condição dos isoladores, mas os resultados não mostraram a certeza necessária para o teste. Utilizou-se um megômetro para a medição da resistência das cadeias de isoladores nas condições: limpa com água e poluída artificialmente. Mas várias medições de resistência realizadas na mesma cadeia de isoladores, em ambas as condições, mostrou diferenças discrepantes, sendo esse método descartado para tal análise.

3.2.2 Corrente de Fuga

O método da corrente de fuga é aceito por todas as concessionárias como forma de avaliar as condições de limpeza dos isoladores. A corrente de fuga pode ser definida como um fluxo de corrente anormal ou indesejada em um circuito elétrico (nesse caso a cadeia de isoladores) devido geralmente a um curto-circuito ou a um caminho anormal de baixa impedância.

Um dos fatores que aumenta a intensidade da corrente de fuga é o acúmulo de poluente, principalmente sais condutores, na superfície do isolador formando camadas e caminhos condutores que resultam, em caso de não ser feita a limpeza do isolador, em *flashover*. Com a medição dessa corrente de fuga que percorre o isolador pode-se saber em que estado o isolador se encontra.

As correntes de fuga foram medidas em uma cadeia de isoladores limpa com água para se ter a referência, em cadeias de isoladores poluídas artificialmente, e em cadeias de isoladores limpas com o método de limpeza a seco. Os resultados desses testes serão mostrados em uma seção posterior.

Os procedimentos e o processo de medição da corrente de fuga são realizados da seguinte maneira:

1 – A cadeia de isoladores a ter sua corrente de fuga medida é colocada em uma haste metálica que por sua vez é colocada em um suporte isolado, como mostrado na figura 3.9.



Figura 3.9 - Fixação da cadeia de isoladores para o teste de corrente de fuga (foto do autor).

2 – Para realização do teste, conforme a norma NBR 5038: 1984, [13], vários níveis de tensão são aplicados à cadeia. Essa tensão é fornecida por um transformador de potência (elevador de tensão) com tensão de saída máxima de 70 kV. A tensão de saída deste transformador é controlada através de um variador de alta tensão e monitorada por voltímetros.

3 – Após colocar o isolador como mostrado na figura 3.9, é feita a conexão para aplicação das tensões de ensaio. A conexão é feita através de um

conector tipo garra jacaré que vem do barramento alimentado pelo transformador. Esse conector é colocado diretamente na campânula do isolador superior ou na haste metálica que passa pela campânula. Na parte inferior do isolador é colocado um conector para referência (terra) e o conector que será responsável por conduzir a corrente de fuga até a sua medição na bancada. A medição é feita em um multímetro digital com escala para microampère (μA).

4 – Após toda essa preparação, a aplicação da tensão é feita. Essa aplicação é feita de maneira gradual. Como apresentado nas tabelas 3.3 e 3.4 os níveis de tensão aplicados são 5, 10, 15, 20 kV mantidos por cerca de 10 segundos sobre o isolador e em seguida medindo-se a corrente de fuga e 20 kV durante 3 minutos (simbolizado nas tabelas por 20T) com a medição ao término deste tempo. A medição da corrente de fuga para os níveis de tensão mais baixos, 5 e 10 kV, não é significativa em termos numéricos. Estes valores de tensão são aplicados por questão de segurança. Mesmo sabendo-se que uma cadeia com 2 isoladores tipo disco suporta nominalmente cerca de 15 kV e uma cadeia com 3 isoladores até 25 kV (conforme Apêndice A) há um grande risco, principalmente com o isolador poluído, de ocorrer um *flashover* com a aplicação direta da tensão nominal ou maior do que ela.

Os equipamentos de medição utilizados são especificados a seguir. Foi utilizado um voltímetro digital Tanacas modelo 9696 de 0 a 300 V, calibrado pelo certificado EL01001-09 para a verificação da tensão de alimentação do primário do transformador. Voltímetro digital Tanacas modelo 9696 de 115 a 75 kV, calibrado pelo certificado EL01003-09 para a verificação da tensão de saída, secundário do transformador. Multímetro digital Amprobe, modelo 38XR-A, calibrado pelo certificado R2039/2008 para a medição da corrente de fuga, com a função de micro amperímetro. Temporizador digital COEL, modelo HWE, calibrado pelo certificado R2036/2008 para a medição do tempo de manutenção da tensão de 20 kV nos testes de corrente de fuga.

Este método foi escolhido como parâmetro de análise visto que a medição da corrente de fuga para a análise da condição do isolador mostra-se conveniente e eficaz para o fim desejado, ou seja, com este parâmetro é possível verificar-se eletricamente e de forma segura como está a cadeia de isoladores antes e depois da lavagem a seco verificando assim a eficácia ou não do método proposto.

3.3 - MÉTODOS DE LIMPEZA A SECO

O método de limpeza a seco das cadeias de isoladores da rede de distribuição tem o objetivo de substituir o atual método de limpeza que utiliza água no processo.

Quando se fala em limpeza a seco trata-se da idéia de efetuar a limpeza das cadeias de isoladores com a utilização de ar comprimido. Isto é feito com a utilização de compressores de ar. Na limpeza de isoladores feita atualmente, a água é pressurizada por uma bomba hidráulica com pressões de 500 a 1200 psi (*pound square inch* - ou libra por polegada quadrada – lb/pol²), que em bar é de 34,5 a 82,7, e vazão de 80 litros por minuto ou aproximadamente 2,8 cfm (*cubic feet per minute* – ou pés cúbicos por minuto – ft³/min), conforme [9], [10], [11]. Tem ainda a facilidade no arraste da sujeira devido à propriedade de solvente que possui esse fluido. Essas informações levam a crer que há a necessidade de que a pressão do ar fornecido pelo compressor para a limpeza deva ser bem mais alta do que a pressão utilizada para a limpeza com água em decorrência do ar não ter a mesma propriedade de solvente da água.

A técnica de lavagem a seco de isoladores aqui proposta é uma completa inovação tecnológica. Nos locais onde se realiza a limpeza das cadeias de isoladores utiliza-se somente a água (em todos os trabalhos onde se aborda a limpeza de isoladores tratam da limpeza com a utilização da água). Devido a esse fato não se tem um ponto de partida e nem referências diretas a seguir. Sendo assim buscou-se a utilização de compressores industriais para os primeiros testes a fim de observar o comportamento do ar como fluido de limpeza e tornar esse o ponto de partida. Foi também utilizada uma ferramenta computacional para a estimação do comportamento do fluido gasoso sobre a superfície do isolador, que é mostrada no Apêndice B.

A seguir será feita uma breve descrição dos compressores industriais, enfatizando mais os tipos utilizados nos testes de limpeza e também será feita uma descrição dos métodos de limpeza a seco testados durante o decorrer da pesquisa. A limpeza foi executada primeiramente com a utilização de compressores industriais, em seguida cilindros de gás nitrogênio pressurizado foram usados e por fim compressores de alta vazão.

3.3.1 Compressores Industriais

Os compressores são utilizados para proporcionar a elevação da pressão de um gás ou escoamento gasoso. Nos processos industriais a elevação de pressão requerida pode variar desde cerca de 1 bar, unidade de pressão equivalente a 14,5 psi ou 100 kPa (quilopascal), até centenas ou milhares de bars [14].

Os compressores podem ser classificados, quanto ao princípio físico de operação, em duas categorias nas quais se fundamentam todas as espécies de compressores de uso industrial: volumétrico ou de deslocamento positivo e dinâmico ou turbocompressores. A figura 3.10 retrata bem a divisão dos compressores por princípio físico de operação, conforme [14] e [15].

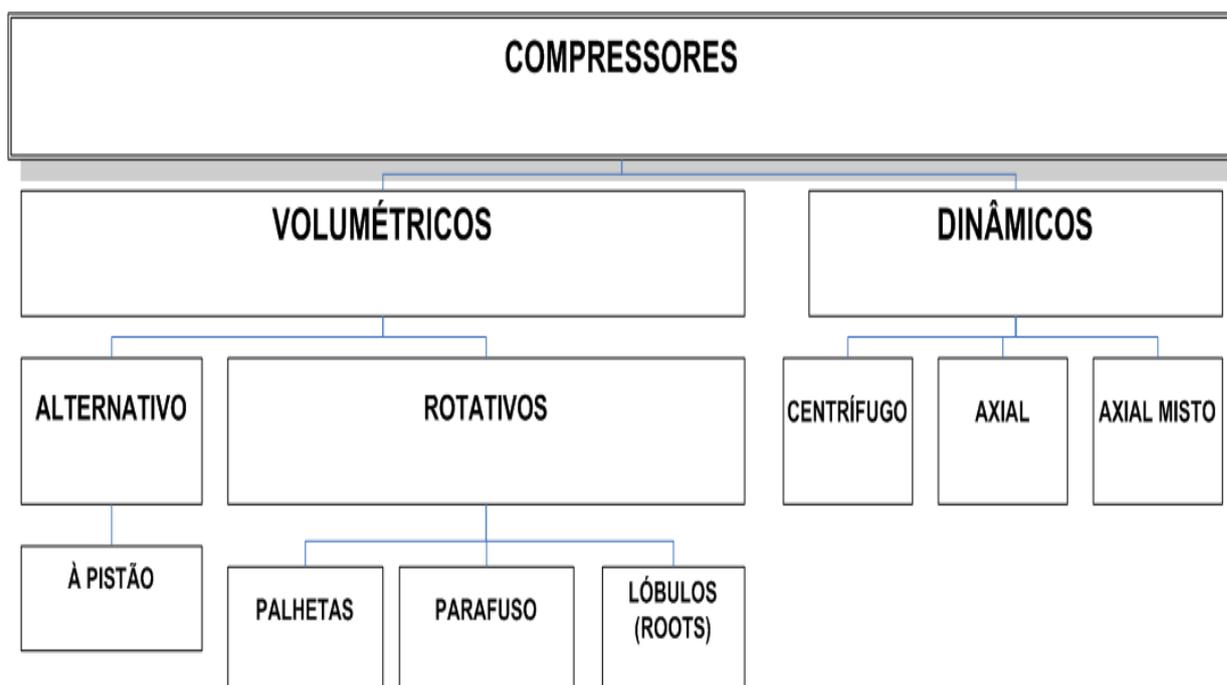


Figura 3.10 - Classificação dos compressores quanto ao princípio físico de operação [15].

Os compressores volumétricos realizam a elevação de pressão através da redução de volume ocupado pelo gás. Determinada quantidade de gás é admitida no interior de uma câmara de compressão que então é cerrada e sofre redução de volume. A câmara é aberta e o gás é liberado para consumo. Trata-se de um processo intermitente no qual a compressão é realizada em ambiente fechado [14].

Os compressores dinâmicos possuem dois órgãos principais: impelidor e difusor. O impelidor é um órgão rotativo munido de pás que transfere ao gás a energia recebida de um acionador. O difusor promove a transformação da energia cinética do gás em entalpia, com conseqüente ganho de pressão. Os compressores dinâmicos efetuam o processo de compressão de maneira contínua [14]. Os compressores dinâmicos não serão discutidos neste trabalho.

Os compressores industriais utilizados para os primeiros testes de limpeza foram os do tipo volumétrico por sua simplicidade, popularidade, por possuir faixas de pressão e vazão consideravelmente amplas e pela sua disponibilidade e fácil acesso para realização de testes laboratoriais. Esses critérios de escolha foram utilizados devido a não se ter parâmetros suficientes para uma avaliação mais precisa em termos das variáveis pressão e vazão. Os testes com esse tipo de compressor são importantes para as primeiras observações desse novo processo e contribuirá para a especificação gradativa do compressor mais adequado para a limpeza das cadeias de isoladores. Dentre os compressores volumétricos foram utilizados compressores rotativo de parafuso e alternativo a pistão.

3.3.1.1 Compressor Rotativo de Parafuso

Os compressores rotativos de parafuso são basicamente constituídos por dois rotores helicoidais. Os rotores interagem entre si, seja por contato direto ou sem contato. Os rotores giram em sentido contrário, e em velocidades angulares diferentes (diferentes números de filetes), e entre os rotores, nas folgas, localizam-se as cavidades que funcionam como câmaras de compressão. Devido à diferença nas velocidades angulares, o volume é reduzido continuamente, e conseqüentemente, a pressão daquele volume de ar é elevada [15].

Conforme [15], outra característica importante do compressor parafuso é que essa forma de aumento de pressão ocasiona um fluxo contínuo de ar e livre de pulsações além de não produzir vibrações nocivas ao sistema. A figura 3.11 apresenta a câmara de compressão de um compressor parafuso imerso em óleo. O rotor fêmea localiza-se à esquerda na figura e o rotor macho à direita.

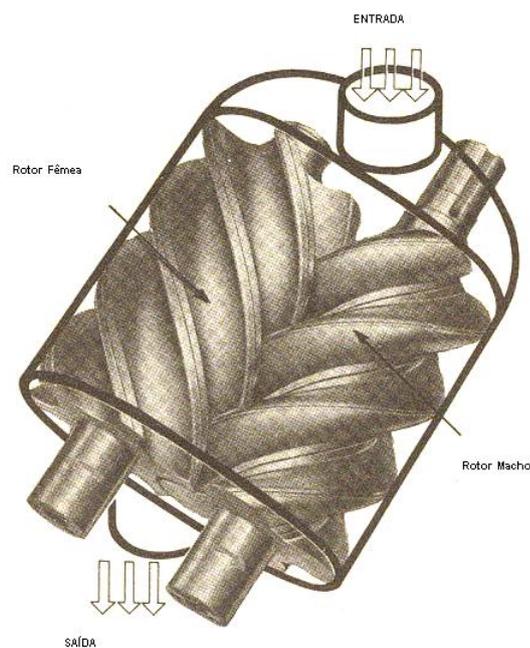


Figura 3.11 – Representação de um compressor rotativo de parafuso [15].

Os compressores rotativos de parafuso são compressores que atingem pressões não muito altas de operação, numa faixa até 5000 kPa (50 bars), conforme [14]. A construção de compressores rotativos de parafuso para operar em pressões mais elevadas resultaria em uma máquina muito grande, devido ao tamanho do parafuso necessário para tal feito. Em termos de vazão o compressor rotativo de parafuso opera em médias e grandes vazões.

O compressor de parafuso utilizado no testes iniciais de limpeza tem pressão máxima de 10 bars (145 psi - não recomendado atingir esse nível por risco de superaquecimento), pressão máxima de trabalho de 7,5 bars (108,8 psi) e vazão de 339 litros por minuto (aproximadamente 12 cfm). Esse compressor, figura 3.12, faz parte da planta industrial do LAMOTRIZ (Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes Industriais) da UFC (Universidade Federal do Ceará). A pressão atingida nos testes com esse compressor foi de aproximadamente 6 bars (87 psi). O sistema possui um reservatório de ar, tipo vertical, com capacidade para 300 litros. Na figura 3.13 é mostrado o reservatório de ar. Com esse reservatório conseguiu-se manter a pressão constante em 6 bars e efetuar os testes necessários.



Figura 3.12 - Compressor de parafuso com pressão máxima de trabalho de 7,5 bars e vazão de 339 litros por minuto (foto do autor).



Figura 3.13 - Reservatório de ar com capacidade para 300 litros (foto do autor).

3.3.1.2 Compressor Alternativo a Pistão

Os compressores alternativos a pistão são caracterizados por um princípio físico de compressão, composto pelo movimento oscilatório de um êmbolo (pistão) e contato direto com o ar a ser comprimido. Este tipo de compressor converte o movimento rotativo do motor de indução trifásico (MIT) em movimento linear de um pistão por um sistema mecânico de transformação de movimento, denominado biela-manivela conforme figura 3.14 [15].

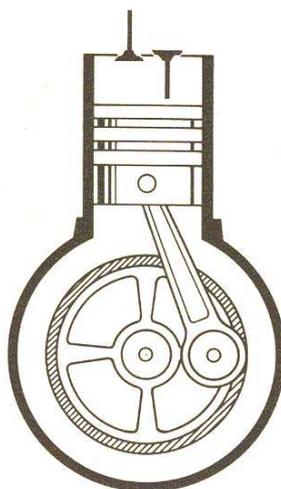


Figura 3.14 - Representação do compressor alternativo a pistão [15].

Os compressores a pistão possuem 4 etapas de operação sendo elas: admissão, compressão, descarga e expansão.

Os compressores alternativos são compressores que atingem altas pressões de operação numa faixa até 250000 kPa (2500 bars). Projetar um cilindro para operação em altas pressões é bastante complicado e para isso adota-se uma construção em múltiplos estágios. Os compressores alternativos produzem vazões irregulares. Dentre os problemas gerados pelo uso dos compressores alternativos, pode ser citado como os principais: grande peso e dimensões da máquina, alto nível de vibrações, pelo movimento alternativo e necessidade freqüente de manutenção devido ao número de componentes submetidos a esforços mecânicos contínuos [14].

O compressor alternativo utilizado na limpeza atinge pressão máxima de 21 bars (304,6 psi - não recomendável), pressão máxima de trabalho 12,1 bars (175

psi) e vazão de 577 litros por minuto (20,4 cfm). Esse compressor pertence ao setor de manutenção do Centro de Tecnologia da UFC e pode ser visto na figura 3.15. A pressão média atingida nos testes com esse compressor foi de aproximadamente 10 bars (145 psi). Buscou-se atingir a pressão máxima de trabalho com a utilização desse compressor para superar a pressão atingida com o compressor anterior e assim verificar se houve alguma melhora significativa em relação ao outro teste. O compressor entrava em carga com pressão de 9 bars (130,5 psi) e alívio em 12 bars. Como o volume interno tem capacidade apenas para 365 litros, um pequeno volume de armazenamento para esse nível de pressão, não foi possível manter a pressão de 12 bars constante por um período de tempo mais adequado para os testes.



Figura 3.15 - Compressor a pistão com pressão máxima de trabalho de 12,1 bars e vazão de 577 litros por minuto (foto do autor).

3.3.2 Resultados dos Testes com Compressores Industriais

Os testes foram feitos de maneira bem empírica e sem muitos detalhes. Não houve medição das correntes de fuga, dos isoladores testados, antes e depois da limpeza para verificação dos resultados, apenas uma análise visual do processo para a observação do comportamento do ar sobre a superfície do isolador e das possíveis dificuldades a serem encontradas. A aplicação do ar sobre o isolador foi feita através de um bico-pistola acoplado a uma mangueira industrial trançada com fio de poliéster, com 3/8 de polegada de diâmetro e pressão máxima suportada de

250 psi (17,2 bars) que são mostrados respectivamente nas figuras 3.16 e 3.17. Alguns isoladores foram poluídos artificialmente e em seguida fixados para a aplicação do ar comprimido em sua superfície. A aplicação foi feita a curta distância, bem próximo do isolador.



Figura 3.16 - Bico-pistola utilizado para a aplicação do ar sobre o isolador (foto do autor).



Figura 3.17 – Mangueira trançada utilizada nos testes (foto do autor).

Os testes mostraram que o ar tem capacidade de arrastar a poluição do isolador, mas com as condições dos compressores utilizados, tais como a não manutenção de uma pressão constante devido a um “pulmão” pequeno, fazendo com que o compressor entrasse em condição de carga-alívio, a limpeza não é eficaz.

3.3.3 Cilindros de Gás Nitrogênio em Alta Pressão

Os compressores industriais utilizados nos testes preliminares não mostraram um bom desempenho no arraste da poluição. Dessa forma, pensou-se em utilizar um compressor de alta pressão. Esses compressores de alta pressão vão de 20 até 500 bars. Os compressores de alta pressão são aplicados em diversas

áreas como energia elétrica, siderurgia, energia nuclear, plataformas de petróleo, sopros de garrafas PET, sopros de latas de alumínio etc. Esses compressores são de elevado custo, dependendo da pressão tem que ser feito por encomenda, fora do estado ou mesmo do país (que acarreta uma perda de tempo muito grande no andamento da pesquisa), com pouca ou nenhuma disponibilidade para aluguel (para serem testados diversos níveis de pressão). O grande problema nesses fatos citados é que esses compressores possuem uma gama grande de pressões para se trabalhar. Como não se tem um ponto de partida não seria viável comprar um compressor com um custo tão elevado sem antes se ter noção de pelo menos um intervalo menor de valores de pressão, adequados para a limpeza dos isoladores. E ainda a necessidade de ter que se fabricar um compressor sob encomenda e ter que trazê-lo de outro estado ou país é um problema crucial, já que o prazo se torna uma variável importante. Para isso seria de grande importância e de muita praticidade a locação de uma unidade compressora de alta pressão para testes laboratoriais.

Em função da dificuldade de locação e da inviabilidade da compra de compressores de alta pressão, pelos motivos já citados, uma alteração na bancada de testes para a padronização do processo de lavagem a seco foi sugerida. A proposta foi a utilização de gás nitrogênio em alta pressão. O uso do gás nitrogênio na limpeza será necessário até que seja encontrado um nível adequado de pressão para a limpeza dos isoladores ou outra solução mais viável.

Existe no mercado local comércio de gases industriais (entre eles o nitrogênio) que são distribuídos em cilindros de 10 m³ e carregados com pressão de aproximadamente 200 bars. Com essa alternativa, propõe-se montar uma bancada suprida por gás nitrogênio (sabendo-se que o ar atmosférico é composto por aproximadamente 78% de nitrogênio) através de seis cilindros em série para a realização de testes de limpeza dos isoladores. Os cilindros de gás nitrogênio são mostrados na figura 3.18. Este sistema facilitará e adiantará os procedimentos laboratoriais, evitando desta forma a aquisição de um compressor apenas para testes, pois teremos o suprimento de "ar" numa pressão elevada, permitindo-nos maior condição na análise dos resultados experimentais.



Figura 3.18 - Cilindros de gás nitrogênio para os testes de limpeza das cadeias de isoladores (foto do autor).

3.3.3.1 Aspectos Construtivos do Sistema e Procedimentos

Será utilizada uma central “*MANIFOLD*” modelo 3+3, com disponibilidade para a utilização simultânea de até seis cilindros de nitrogênio. Essa central servirá de pulmão para os testes, com uma válvula reguladora de pressão na saída e uma serpentina flexível em aço inox que servirá para o direcionamento do jato nos isoladores.

A instalação dos cilindros de nitrogênio foi feita em uma determinada área do Laboratório de Ensaio de Materiais da Engenharia Mecânica na UFC. Foi feito o planejamento e análise do posicionamento dos cilindros e a fixação da serpentina flexível que servirá para direcionar o jato de nitrogênio. Bem como toda a estrutura de fixação para os isoladores a serem submetidos à limpeza e um suporte para apoiar e posicionar o conjunto serpentina/bico de limpeza de forma mais adequada e confiável para a aplicação do processo de limpeza sobre as cadeias de isoladores.

Devem-se definir estruturas com elevada resistência mecânica para suportar bem as condições de operação em alta pressão que o gás será submetido.

Esses testes têm por objetivo, verificar a capacidade de limpeza do ar (nesse caso o nitrogênio) para diferentes níveis de pressão em laboratório, contribuindo assim para a especificação do equipamento a ser utilizado em campo. A pressão adequada para a limpeza dos isoladores deve ser minuciosamente estudada a fim de evitar pressões demasiadamente altas e que possam causar dano e/ou defeitos do isolante ou de partes integrantes do sistema.

A seguir serão mostrados os aspectos construtivos do sistema de limpeza utilizando gás nitrogênio em alta pressão.

Na figura 3.19, é mostrado o sistema de regulação da pressão dos cilindros de gás nitrogênio, que possui manômetro (medidor de pressão), uma válvula manual e dois pontos de conexão (um para conectar o *MANIFOLD* e o outro para conectar a tubulação que vai levar o nitrogênio até o seu destino final). O material usado na construção dessa peça é o latão forjado.



Figura 3.19 - Sistema de regulação da pressão dos cilindros de gás nitrogênio.

A serpentina de cobre e a serpentina flexível, feita em aço inox, são mostradas na figura 3.20.



Figura 3.20 - Serpentina de cobre e serpentina flexível.

A serpentina de cobre tem a função de conectar o cilindro de gás nitrogênio a uma das entradas do *MANIFOLD*. Como serão conectados seis cilindros ao *MANIFOLD*, seis serpentinas serão utilizadas. O *MANIFOLD* é responsável pela interconexão de todos os cilindros, para uma possível liberação do gás dos seis cilindros ao mesmo tempo para a saída principal. Essa conexão pode ser vista nas figuras 3.21 e 3.22. Na primeira tem-se uma visão lateral da conexão, na outra se tem uma vista superior do sistema.



Figura 3.21 - Vista lateral da conexão entre os cilindros e o *MANIFOLD* (foto do autor).



Figura 3.22 - Vista superior da conexão entre os cilindros e o *MANIFOLD* (foto do autor).

A serpentina flexível de aço inox tem a função de conduzir e aplicar o nitrogênio sobre a superfície do isolador. Ela é uma espécie de mangueira construída para suportar altas pressões. Sua fixação é feita em uma barra metálica (que funciona com um braço mecânico), por meio de abraçadeiras e através de alças metálicas que faz parte da serpentina (ver figura 3.20), para facilitar o manuseio. A fixação da mangueira pode ser vista na figura 3.23. É através desse

braço mecânico que é feito o controle manual do direcionamento do jato de gás nitrogênio. O braço onde é fixada a serpentina faz parte de uma base metálica (parecida com uma mesa). Sobre essa base há um mecanismo giratório ao qual está atrelado o braço de fixação da serpentina flexível. Na figura 3.23 é possível perceber todas as partes integrantes desse sistema. Esse mecanismo giratório permite movimento lateral sobre o plano da base. Só para dar uma noção do movimento do sistema, se o braço for deslocado para a esquerda provoca um movimento do mecanismo no sentido horário e o bico da serpentina tende a apontar para a direita. O braço mecânico por sua vez se movimenta para cima e para baixo em torno do eixo do mecanismo giratório. O movimento do braço de fixação da serpentina flexível pode ser percebido através da figura 3.24. A mangueira fica presa na lateral da barra metálica de forma que esta possa se movimentar lateralmente e para cima e para baixo e para que o jato de nitrogênio atinja a maior parte da superfície dos isoladores.



Figura 3.23 - Fixação da serpentina à barra metálica (foto do autor).



Figura 3.24 - Movimentação vertical da barra de fixação da serpentina flexível (foto do autor).

Para melhor aproximação com a situação de campo, as cadeias de isoladores, a serem testadas, devem ser posicionadas como as cadeias normalmente ficam nas linhas de distribuição, verticalmente ou horizontalmente conforme pode ser visto no Apêndice A. Por questões de praticidade nos testes, a cadeia foi posicionada verticalmente. Isto é feito com a utilização de uma morsa e um suporte metálico, de formato cilíndrico. A cadeia de isoladores a ser testada foi adaptada em um sistema de sustentação com capacidade para girar 360°, com o objetivo de se aplicar o gás na pressão adequada em toda a superfície do isolador fazendo com que o experimento seja o mais uniforme possível. O suporte de sustentação da cadeia de isoladores é um cilindro aberto formado por um anel superior e um anel inferior, que possui três hastes no sentido radial, partindo do centro dos anéis. De um anel a outro, no sentido longitudinal, mais três hastes. O suporte metálico é preso à bancada por meio de uma morsa. Ele fica posicionado à frente da estrutura de limpeza dos isoladores. A cadeia fica no interior do suporte, que é aberto para que o nitrogênio possa atingir os isoladores. A cadeia é formada por três isoladores. A cadeia é fixada no anel superior do suporte, através do garfo do isolador superior por um pequeno anel metálico soldado no centro do anel superior, e travado pela cupilha. Na parte inferior do suporte, a fixação é feita de

forma semelhante, através do olhal do isolador inferior, a um pequeno anel metálico soldado no centro do anel inferior do suporte e travado por uma cupilha (para mais detalhes das partes integrantes dos isoladores tipo disco, ver Apêndice A). O suporte metálico tem um pequeno eixo no anel inferior, em torno do qual ele pode girar. Assim, há a possibilidade de girar o suporte, e como consequência a cadeia de isoladores, facilitando o acesso a toda a superfície do isolador para a realização dos testes. Esse procedimento é feito apenas em laboratório para suprir a limitação dos movimentos do sistema de direcionamento do nitrogênio.

Esse dispositivo de sustentação da cadeia de isoladores pode ser visto na figura 3.25. Esses ensaios foram feitos em cadeias de isoladores de vidro para se obter uma operação segura e precisa.



Figura 3.25 - Estrutura de sustentação para a cadeia de isoladores (foto do autor).

O sistema de gás nitrogênio alimenta o bico de limpeza através de um circuito de canos metálicos sem costura. Esse circuito de canos (figura 3.26), que são feitos de aço galvanizado, é utilizado como prolongamento para a serpentina flexível.



Figura 3.26 – Circuito de canos que conecta a saída do cilindro com a serpentina flexível (foto do autor).

Devido à limitação de movimento e pela própria constituição do sistema de direcionamento do gás nitrogênio, que foi improvisado para os testes, as distâncias do bico de limpeza à superfície de cada isolador são distintas. A distância média do bico de limpeza para a superfície do isolador superior da cadeia é de 9 cm. Em relação ao isolador central da cadeia a distância é de 10 cm e ao isolador inferior a distância é de 16 cm. Outro problema é com relação ao ângulo de ataque do bico de limpeza. A estrutura limita a uma pequena variação da angulação do bico de limpeza em cada isolador da cadeia. Dependendo do isolador da cadeia a ser jateado, têm-se determinados ângulos possíveis de serem atingidos e esses ângulos diferem razoavelmente de isolador para isolador. Não é uma configuração ideal, pois deveria haver a mesma distância do bico de limpeza para a superfície de cada isolador, assim como os mesmos ângulos de ataque.

Outro procedimento a ser levado em conta é o tempo de limpeza de cada isolador. Não há um tempo definido como adequado para a limpeza. A limpeza foi

realizada duas vezes, adotando-se estratégias diferentes em relação ao tempo de limpeza.

O suporte metálico da cadeia de isoladores é dividido em três regiões devido às hastes longitudinais, como dito anteriormente. Na primeira limpeza cada uma dessas regiões do isolador foi jateada por cerca de um minuto e meio, em um total de quatro minutos e meio por isolador.

Na segunda limpeza cada isolador foi jateado por cerca de dois minutos, sem dividir o tempo igualmente por cada região. Foi jateado onde havia visualmente mais poluição, mas passando pelas três regiões.

No método atual de lavagem dos isoladores, feito com água, o tempo de limpeza de cada isolador não segue uma regra específica. O tempo de limpeza depende da condição (em nível de poluição) de cada isolador. A limpeza acaba quando o isolador está visualmente limpo (por decisão do operador).

No caso da limpeza com o gás nitrogênio feita em laboratório adotou-se para o procedimento o padrão da segunda limpeza efetuada. Ele tem uma semelhança com o procedimento adotado para a lavagem com água, entretanto na limpeza com gás nitrogênio não é possível ter como parâmetro de encerramento do processo a percepção visual de limpeza.

Não há a necessidade de manter uma precisão no tempo de limpeza. O importante é atingir todos os pontos da superfície do isolador por algum tempo, para que os possíveis caminhos de condução sejam eliminados.

3.3.3.2 Resultados da Limpeza com Gás Nitrogênio

O fato de o gás nitrogênio ou qualquer outro fluido gasoso não conseguir deixar o isolador com aspecto visível totalmente limpo após o processo, não significa que o procedimento seja ineficaz. Isso pode ser comprovado com a medição dos níveis de corrente de fuga de uma determinada cadeia de isoladores após a limpeza com gás nitrogênio. Se houver a redução dos níveis de corrente de fuga dessa cadeia, para valores próximos aos níveis de referência (cadeia limpa com água), comprova-se a eficácia independente da condição visual. Pode-se observar pela figura 3.27 que após a limpeza com gás nitrogênio poucas mudanças aparentes

ocorreram. A imagem do isolador à esquerda na figura 3.27 mostra a condição dele antes da limpeza e a imagem do isolador à direita mostra a condição após a limpeza com gás nitrogênio.

O procedimento para as medições de correntes de fuga necessárias para a verificação da condição da cadeia de isoladores após a aplicação do método de limpeza proposto é descrito a seguir. Tomou-se os valores de corrente de fuga medidos das cadeias de isoladores limpas com água como referência. Essas cadeias foram poluídas artificialmente e suas correntes de fuga foram medidas. Em seguida foi utilizado o método de limpeza com gás nitrogênio e após a limpeza foram medidos os níveis de corrente de fuga dessa cadeia.



Figura 3.27 - Comparação da condição do isolador antes e após a limpeza com gás nitrogênio (foto do autor).

Nas tabelas 3.3 e 3.4 são mostrados os resultados das correntes de fuga nas cadeias de isoladores poluídas artificialmente pelos métodos da câmara de névoa salina e manual respectivamente. Os valores de corrente dessas tabelas serão utilizados posteriormente para traçar gráficos de comparação com as correntes de fuga medidas nas cadeias limpas com gás nitrogênio.

Nas tabelas 3.5 e 3.6 são mostrados os resultados das medições de corrente de fuga em cadeias de isoladores limpas com água denominadas respectivamente por cadeia 1 e 2. Esses resultados são as referências para a comparação com as medições de corrente de fuga feitas após a limpeza com nitrogênio em alta pressão.

Tabela 3.5 - Cadeia de isoladores limpa com água – cadeia 1.

Condição	Tensão Aplicada (kV)	Corrente de Fuga (μ A)	Tempo de Aplicação (Minutos)
Limpa com água	5	12.8	-
	10	30.5	-
	15	48.3	-
	20	66.1	-
	20T	70.1	3

Tabela 3.6 - Cadeia de isoladores limpa com água – cadeia 2.

Condição	Tensão Aplicada (kV)	Corrente de Fuga (μ A)	Tempo de Aplicação (Minutos)
Limpa com água	5	12.8	-
	10	28.7	-
	15	46.3	-
	20	64,0	-
	20T	61.9	3

Nas tabelas 3.7 e 3.8, têm-se os resultados para as medições de corrente de fuga nas cadeias de isoladores 1 e 2, respectivamente, após a limpeza com gás nitrogênio.

Tabela 3.7 - Cadeia de isoladores limpa com gás nitrogênio – cadeia 1.

Condição	Tensão Aplicada (kV)	Corrente de Fuga (μ A)	Tempo de Aplicação (Minutos)
Limpa com nitrogênio	5	16,0	-
	10	33,0	-
	15	52,0	-
	20	70,0	-
	20T	69,0	3

Tabela 3.8 - Cadeia de isoladores limpa com gás nitrogênio – cadeia 2.

Condição	Tensão Aplicada (kV)	Corrente de Fuga (μ A)	Tempo de Aplicação (Minutos)
Limpa com nitrogênio	5	15,0	-
	10	31,0	-
	15	48,0	-
	20	64,0	-
	20T	64,0	3

Para se ter uma forma de comparação mais precisa e que seja possível analisar melhor os resultados, utilizou-se de gráficos. Os dados das tabelas 3.5 e 3.7 foram plotados na figura 3.28 para a comparação das correntes de fuga da cadeia de isoladores 1, limpa com água, com as correntes de fuga da cadeia de isoladores 1 limpa com gás nitrogênio. A cadeia 1 foi poluída pelo método manual.

Da mesma forma foi feito com os dados das tabelas 3.6 e 3.8, que geraram gráficos (mostrado na figura 3.29) comparando as medições feitas na cadeia de isoladores 2, limpa com água e limpa com gás nitrogênio. A cadeia 2 foi poluída pelo método da câmara de névoa salina.

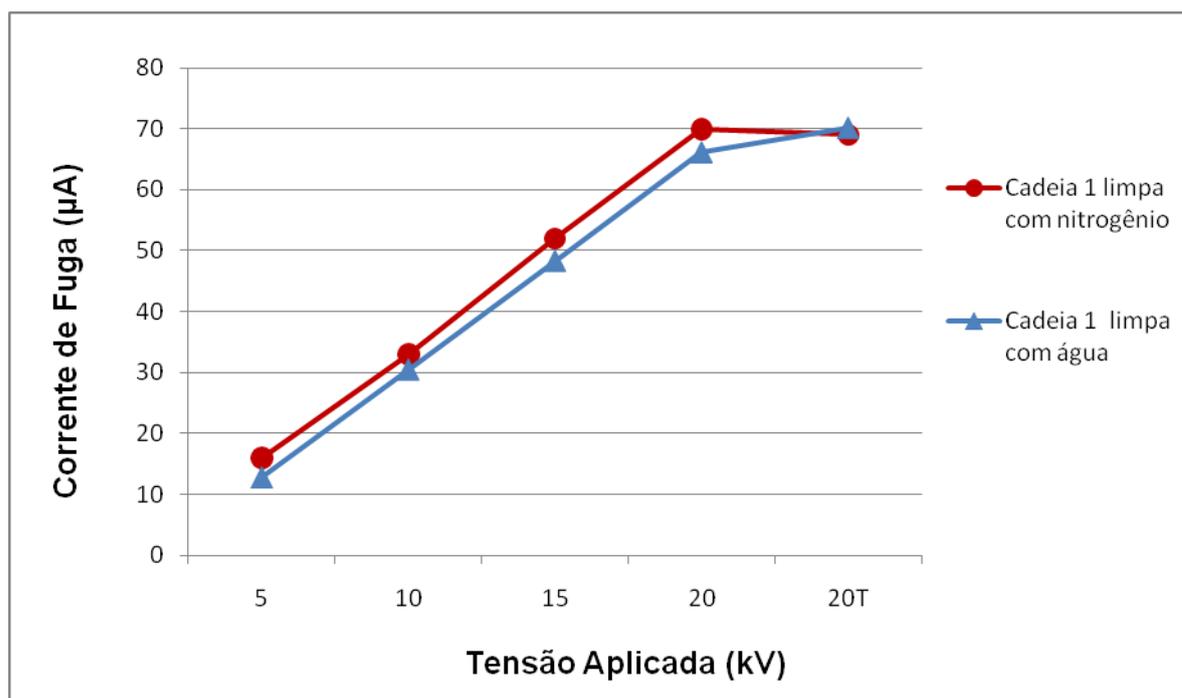


Figura 3.28 - Gráfico das correntes de fuga da cadeia de isoladores 1 limpa com água e das correntes de fuga da cadeia de isoladores 1 limpa com gás nitrogênio.

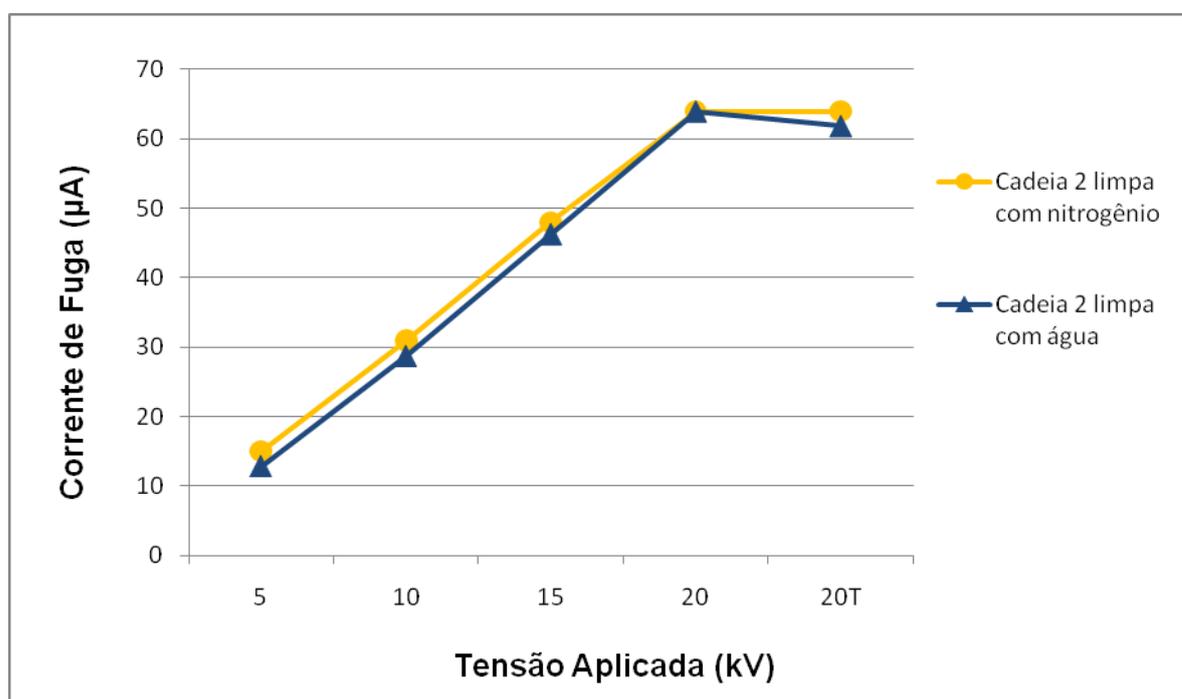


Figura 3.29 - Gráfico das correntes de fuga da cadeia de isoladores 2 limpa com água e das correntes de fuga da cadeia de isoladores 2 limpa com gás nitrogênio.

Como pode ser observado pelos gráficos mostrados nas figuras 3.28 e 3.29, as correntes de fuga após a limpeza com nitrogênio ficam bem próximas das correntes de referência. Para o isolador 1 totalmente limpo, o nível de corrente de

fuga em 20 kV é de 66,1 μA (conforme tabela 3.5), essa mesma cadeia de isoladores poluída pelo método manual possui uma corrente em 20 kV de 133,5 μA (conforme tabela 3.4, página 36) e após a limpeza com o gás nitrogênio a corrente de fuga é de 70 μA (conforme tabela 3.7), praticamente se aproximando do valor de referência.

Na figura 3.30 tem-se o gráfico das correntes de fuga da cadeia de isoladores 1 poluída pelo método manual (conforme tabela 3.4) contra as correntes de fuga dessa mesma cadeia 1 limpa com gás nitrogênio. Neste gráfico pode se observar bem o decréscimo das correntes de fuga após a aplicação da limpeza.

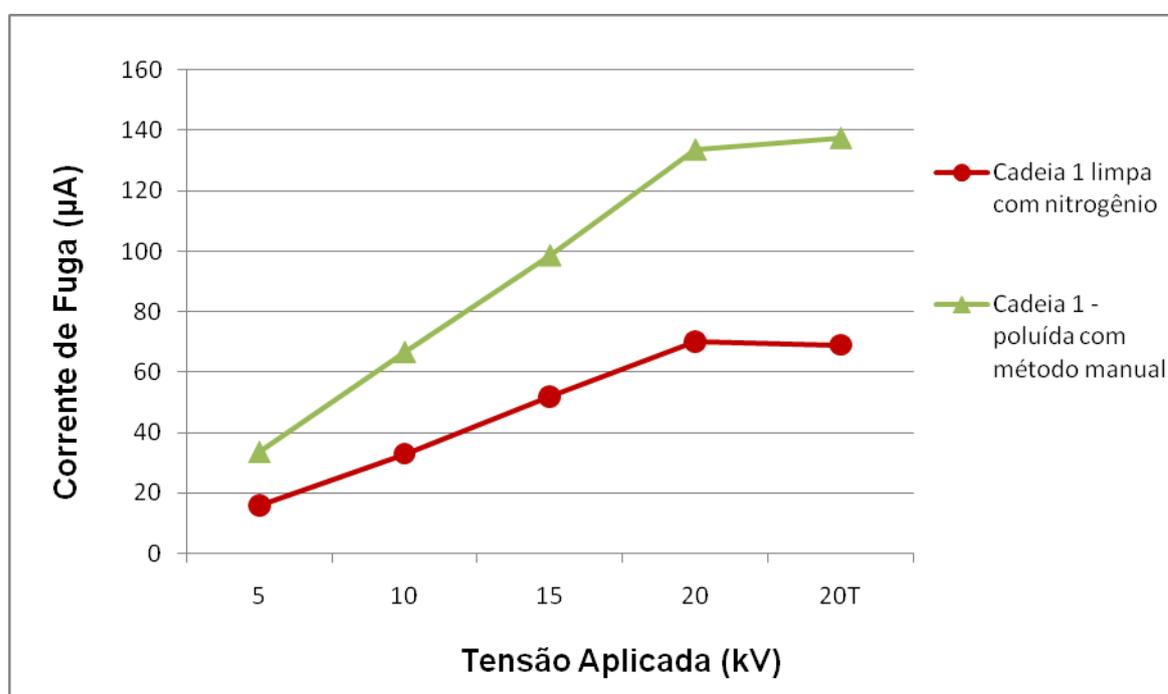


Figura 3.30 - Gráfico das correntes de fuga da cadeia de isoladores 1 poluída pelo método manual e das correntes de fuga da cadeia de isoladores 1 limpa com gás nitrogênio.

Na figura 3.31 tem-se o gráfico das correntes de fuga da cadeia de isoladores 2 poluída pelo método da câmara de névoa salina (conforme tabela 3.3, página 36) contra as correntes de fuga dessa mesma cadeia 2 limpa com gás nitrogênio. Neste gráfico pode se observar que também houve um decréscimo das correntes de fuga após a aplicação da limpeza, mas foi de menor intensidade devido ao nível de corrente de fuga atingido com o método de poluição artificial utilizado. Mas os níveis de corrente de fuga atingidos após a limpeza com gás nitrogênio em ambos os casos, cadeias 1 e 2, foram satisfatórios, pois os níveis de corrente

dessas cadeias se aproximaram muito dos níveis de referência (cadeias limpa com água).

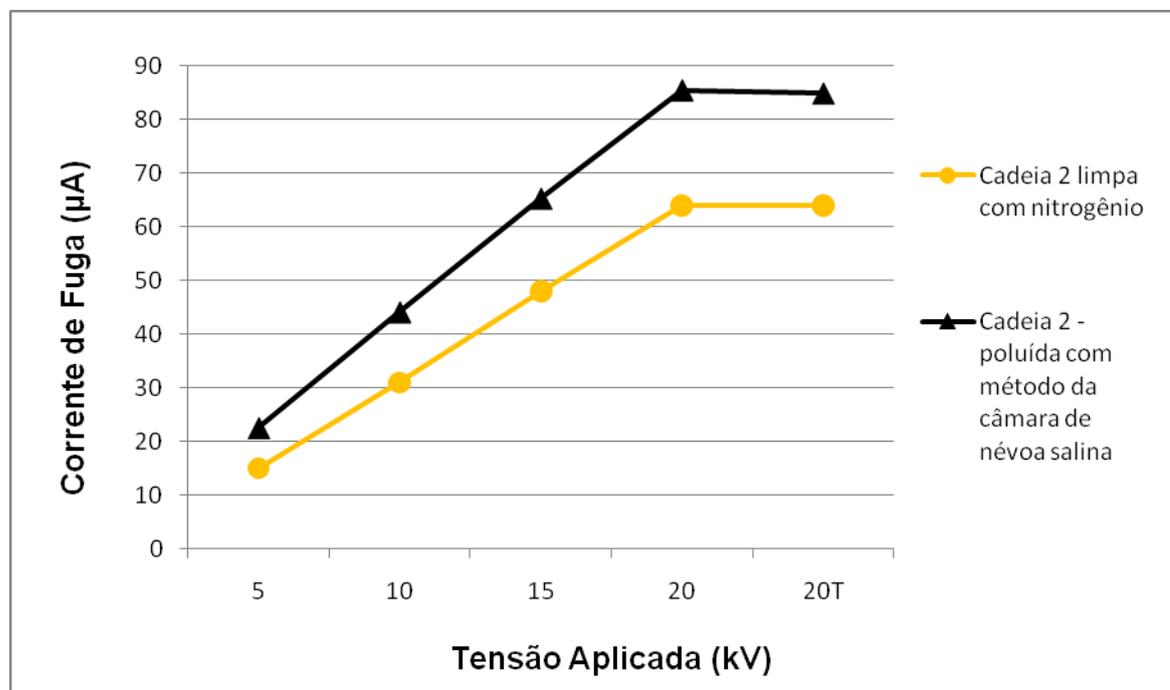


Figura 3.31 - Gráfico das correntes de fuga da cadeia de isoladores 2 poluída pelo método da câmara de névoa salina e das correntes de fuga da cadeia de isoladores 2 limpa com gás nitrogênio.

Durante o ensaio não foi possível manter um determinado nível de pressão constante por tempo suficiente e assim observar o comportamento do processo de limpeza para as diversas pressões desejadas. A pressão máxima atingida nos testes foi 30 bars. Na maior parte do tempo se trabalhou com pressões da ordem de 20 bars. Um dos motivos desse fato é a rápida descarga de gás nitrogênio. Nos testes não eram abertas todas as válvulas dos cilindros de uma só vez. Poucos testes em seqüência eram feitos devido à necessidade de substituição dos cilindros vazios por cilindros carregados. Isso causava uma perda de tempo razoável no andamento dos ensaios. A vazão do gás era baixa.

Mesmo com as dificuldades e algumas limitações encontradas, os testes realizados com o gás nitrogênio foram muito importantes. Com os resultados obtidos pode-se comprovar a capacidade de limpeza do método utilizando gás nitrogênio em alta pressão, e conseqüentemente que é possível limpar os isoladores com a utilização do ar.

Com a observação do comportamento do fluido em alta pressão nos testes realizados e com a experiência de profissionais da área de compressores, chegou-se a conclusão de que não havia a necessidade de uma pressão alta e sim de uma alta vazão. Uma vazão maior e contínua pode tornar o processo mais eficaz. Além desse fato é mais fácil de encontrar no mercado compressores de alta vazão tanto para aluguel quanto para compra.

3.3.4 Compressores de Alta Vazão

A observação minuciosa dos ensaios com os cilindros de gás nitrogênio levou à constatação que uma alta vazão poderia tornar a limpeza mais eficaz. Com isto a variável vazão passou a ser a principal grandeza na análise da força de arraste da poluição depositada sobre a superfície dos isoladores.

Os resultados mostraram que a limpeza é possível, porém com qualidade baixa, aumentando o tempo de limpeza e principalmente encurtando a distância de aplicação dificultando o processo em campo com a linha de distribuição energizada, onde a distância será um fator primordial. Deve-se efetuar a limpeza de uma distância tal que não haja possibilidade de abertura de *flashovers*. Com a utilização de um compressor de alta vazão é possível que a distância de limpeza possa ser aumentada, de forma a realizar testes um pouco mais próximos da realidade.

Os experimentos foram divididos em duas etapas. A primeira etapa tem como objetivo melhorar a limpeza feita com gás nitrogênio em alta pressão usando um compressor de alta vazão. Além da tentativa de melhoria na qualidade da limpeza das cadeias de isoladores em relação ao método anterior, buscou-se auxílio na especificação do compressor mais adequado para a limpeza dos isoladores, que será usado na segunda etapa. Sua especificação foi baseada nas observações e análises dos resultados obtidos nos testes realizados. A especificação do compressor para os testes laboratoriais definitivos, também depende de sua disponibilidade no mercado, possibilidade de adaptação em um veículo mais compacto e autonomia no que diz respeito ao seu acionamento, propiciando um processo de inovação tecnológica com sustentabilidade prático-financeira. No atual processo de limpeza com água é utilizado como veículo um caminhão tanque. O tamanho do caminhão torna difícil o acesso a certos locais e regiões onde a lavagem

dos isoladores é necessária. Esse problema pode ser resolvido com a redução do tamanho do veículo que fará a limpeza em campo, que também é um dos objetivos dessa pesquisa de lavagem a seco, e para isso o tamanho do compressor é fundamental.

Na segunda etapa foram feitos os testes definitivos e conclusivos de laboratório, com o compressor especificado com os testes da etapa 1, para em seguida partir para os testes em campo (que serão abordados no capítulo 4).

3.3.4.1 Etapa 1 - Compressor GA 37

Com a constatação de que uma vazão elevada poderia tornar a limpeza mais eficaz, um compressor com essa característica foi alugado para que testes de limpeza fossem realizados.

O compressor de alta vazão utilizado nesta etapa foi especificado de forma empírica. Nessa especificação as variáveis mais significativas foram a alta vazão e a disponibilidade imediata para locação, não sendo levado em consideração nesse momento sua pressão, o tamanho e a forma como o compressor deva ser acionado. O compressor é acionado por um motor elétrico e as principais características do conjunto motor-compressor podem ser vistas na tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Características do compressor GA 37.

Tipo	Pressão máxima		Vazão máxima		Potência do motor		Rotação (rpm)
	bar	psi	cfm	m ³ /min	cv	kW	
GA37	7.4	107.3	246.0	7.0	50.0	36.8	3546

Com a característica operacional deste compressor não há necessidade de “pulmão” (reservatório de ar), devido a sua grande vazão. Como resultado da lubrificação interna ele possui uma pequena liberação de óleo na saída de ar. Isso foi solucionado usando-se um filtro de óleo. Em um primeiro momento utilizou-se um secador de ar para o processo de limpeza, entretanto foi este descartado devido à

limitação da vazão. Além dessa limitação de vazão imposta pelo o secador, observou-se que não há necessidade de um ar completamente seco no processo de limpeza. Isso porque um pouco de umidade no ar facilita a retirada da poluição da cadeia de isoladores. O compressor GA 37 junto com o secador é mostrado na figura 3.32.



Figura 3.32 - Compressor GA 37 e secador de ar (foto do autor).

Para os testes com esse compressor, foi necessário alocar um espaço fora da universidade para a instalação do equipamento, devido à alta potência do motor. A imagem do compressor ilustrada na figura 3.32, mostra apenas o abrigo onde ficam o compressor e suas partes acessórias como filtros e o reservatório, motor e o sistema responsável pela partida do motor. As figuras 3.33, 3.34, 3.35 e 3.36, mostram respectivamente o reservatório e o filtro de ar do compressor, o elemento compressor, o motor e o sistema responsável pela partida do motor.



Figura 3.33 - Reservatório e filtro de ar do compressor GA 37 (foto do autor).



Figura 3.34 - Elemento compressor do GA 37 (foto do autor).



Figura 3.35 - Motor de acionamento do compressor GA 37 (foto do autor).

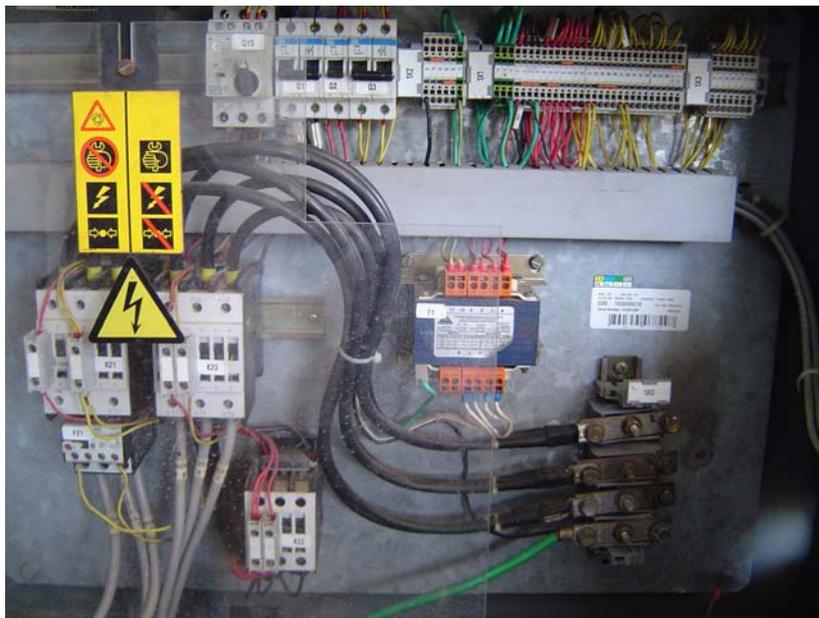


Figura 3.36 - Quadro de comando para a partida do motor (foto do autor).

A especificação dos cabos de alimentação foi feita conforme descrito no manual da Atlas Copco do Brasil para o compressor GA 37, sendo um cabo com seção de 50 mm^2 para as fases e outro de 25 mm^2 para o cabo de terra. O disjuntor usado foi um termo-magnético tripolar de 125 A. Fusíveis NH de 125 A foram usados para cada fase. O quadro montado para a alimentação do motor é mostrado na figura 3.37.



Figura 3.37 - Quadro de força para a alimentação do motor (foto do autor).

Os primeiros testes feitos com este compressor foram realizados utilizando mangueiras *wingfoot* de 3/4, 1/2 e 1 polegada. A mangueira é composta de PVC e possui reforço de cordões de fibra sintética, suporta temperaturas de 5° a 50° C e pressão de até 300 psi (20.7 bars). A mangueira de 1 polegada foi a que apresentou os melhores resultados por comparação visual, pois não produzia restrição da vazão. A mangueira de 3/4 de polegada pode ser vista na figura 3.38. A mangueira de 1 polegada adotada para os ensaios é idêntica à mangueira mostrada na figura 3.38.

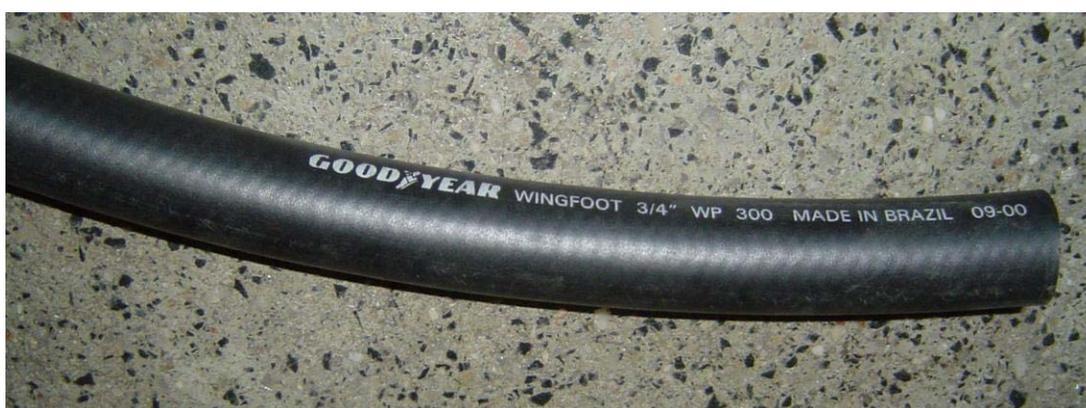


Figura 3.38 – Uma das mangueira de PVC *wingfoot* utilizadas na limpeza (foto do autor).

Foi desenvolvido um sistema de fixação para a mangueira e para direcionar o jato de ar com melhorias em relação ao utilizado nos testes com gás

nitrogênio em alta pressão. Uma estrutura em forma de mesa de aproximadamente 85 cm de altura foi desenvolvida para dar suporte à mangueira e bico de ataque. Possui um trilho que percorre o plano da mesa para a aproximação do bico de limpeza da cadeia de isoladores, e que é dotado de uma barra vertical onde o braço mecânico, em que a mangueira é fixada para o jateamento, está acoplado. A barra vertical possui aproximadamente 55 cm de altura. A altura em que o braço mecânico deve ser posicionado pode ser ajustada ao longo da barra vertical e possui uma trava para mantê-lo na altura desejada. O braço mecânico é dividido em três articulações, podendo ser feita uma analogia como os membros superiores do ser humano. Equivalente, de uma forma grosseira e bem mais limitada, ao punho, ao antebraço e ao braço. Há duas barras unidas através de uma peça rosqueável que torna esse ponto uma articulação (como o cotovelo), possibilitando a movimentação do “antebraço” assim como o seu travamento. Na extremidade do “antebraço” há uma peça onde a ponta da mangueira é fixada e através da qual se direciona o jato de ar, movendo-a para a esquerda-direita e para cima e para baixo. Como o movimento, de forma bem mais limitada, do punho humano. Essa estrutura pode ser vista com mais detalhes nas figuras 3.39 e 3.40.



Figura 3.39 - Estrutura mecânica para o teste de limpeza das cadeias de isoladores (foto do autor).

A mangueira é fixada à estrutura através de abraçadeiras, como se observa na figura 3.40. A operação da estrutura é feita de modo manual.



Figura 3.40 - Estrutura mecânica para o teste de limpeza das cadeias de isoladores com a mangueira fixada (foto do autor).

Também foi desenvolvida uma estrutura de sustentação para a cadeia de isoladores submetida à limpeza com ar comprimido. Ela tem aproximadamente 1,50 m de altura. É composta de barras paralelas verticais soldadas em uma barra horizontal. Outra barra horizontal, paralela à barra superior, é presa às barras verticais de tal modo que ela possa ser movida ao longo do eixo vertical e se ajustar ao tamanho da cadeia de isoladores a ser testada. A parte superior da cadeia de isoladores é fixada encaixando-se a campânula em um gancho que fica na parte inferior da barra horizontal fixa. A parte inferior é fixada por um pino que trava o olhal do último isolador da cadeia em um encaixe apropriado na parte de cima da barra horizontal móvel. A estrutura assim como a forma de fixação da cadeia de isoladores na estrutura podem ser vista na figura 3.41.



Figura 3.41 - Estrutura para a sustentação das cadeias de isoladores (foto do autor).

Após toda esta preparação iniciou-se os testes de limpeza, com um estudo da aproximação e direcionamento do jato de ar, com o objetivo de verificar a melhor condição de ataque na cadeia.

Como preparação do ensaio é feita uma salinização artificial na cadeia de isoladores, a partir de uma solução salina e uma imediata secagem artificial. Em seguida é realizado o procedimento de limpeza, levando em consideração a distância e o ângulo de ataque na superfície do isolador. A distância adotada nos ensaios foi de 30 cm aproximadamente. Essa distância foi adotada apenas para efeito de testes em laboratório. A posição de ataque adotada foi colocar a saída de ar da mangueira posicionada um pouco acima da linha da superfície do isolador a ser limpo para que o jato de ar incida na superfície de cima para baixo. São feitos movimentos, com o direcionador do ar, da esquerda para a direita, da direita para a esquerda, de cima para baixo e de baixo para cima. Este procedimento pode ser considerado empírico, mas apresentou bons resultados. A figura 3.42 ilustra o posicionamento para ataque do ar sobre a superfície do isolador. Após vários e demorados ensaios é feita uma comparação por inspeção visual, o que não permite grande precisão, entretanto em face da experiência adquirida nesta fase da

pesquisa, pode-se afirmar que foi um bom resultado. Essa comparação visual é mostrada na figura 3.43. À esquerda observa-se o isolador poluído artificialmente e à direita o isolador após a limpeza com ar comprimido.



Figura 3.42 – Posicionamento para ataque de ar sobre a superfície do isolador (foto do autor).



Figura 3.43 - Isoladores antes e depois da limpeza com ar comprimido (foto do autor).

Esse bom resultado visual se deveu à umidade gerada no processo de compressão do ar (algumas gotículas de água no ar comprimido, no início do

processo) e à umidade do próprio ambiente que ajudaram na dissolução do poluente que em seguida foi arrastado com mais facilidade.

Para uma confirmação científica do experimento deve-se medir a corrente de fuga antes e após o processo de limpeza a seco e compará-la com os dados de referência. Entretanto nesta fase da pesquisa o quadro chuvoso no estado do Ceará no período em que esses ensaios deveriam ser realizados, estava muito forte dificultando a validação do processo pelo ensaio de corrente de fuga. Vale lembrar que os ensaios de corrente de fuga são realizados em um laboratório que fica distante do local onde o sistema de limpeza está montado, portanto a necessidade de transporte das cadeias até o local do ensaio e o fator umidade podem descaracterizar a condição do isolador após os testes de limpeza. Pode-se ter uma grande variação na medição da corrente de fuga, isto é, os seus valores medidos antes e depois da limpeza não permitem uma real comparação. Isso torna as medições duvidosas. Desta forma os resultados por inspeção visual podem ser considerados satisfatórios por hora, tendo ainda muitos ensaios a serem realizados com medição da corrente de fuga, que é o parâmetro de verificação da eficácia da limpeza. Entretanto esta confirmação só poderá ocorrer durante o período seco, ou seja, após o período de chuva quando a umidade atmosférica voltar ao seu padrão normal.

Com o desenrolar dos ensaios detectou-se, por observação, a faixa de variação da pressão e vazão, para uma especificação mais definitiva do compressor a ser usado na próxima etapa, cujo objetivo seria a comprovação experimental da eficácia da proposta de lavagem a seco. O tamanho, a disponibilidade no mercado local e a autonomia em relação ao acionamento do compressor também foram levadas em consideração nessa especificação.

A pressão e a vazão do compressor GA 37, como pode ser observado na tabela 3.9 são respectivamente de 7,4 bars e 246 cfm. A pressão atingida nos testes foi de 4,5 bars em média. Esse foi o valor limite mantido para que o compressor não entrasse em carga-alívio e conseqüentemente perdesse a continuidade do fluxo de ar. O nível de vazão foi considerado bom para a limpeza, mas foi decidido aumentar de 30 a 50% a vazão a fim de que a distância de limpeza pudesse ser aumentada e mesmo assim um bom nível de limpeza das cadeias de isoladores fosse mantido.

Levando em consideração todos os fatores citados em relação à especificação do compressor para a etapa definitiva de ensaios em laboratório chegou-se ao compressor XATS 176 que será descrito na próxima seção, e também serão mostrados os resultados dos testes realizados.

3.3.4.2 Etapa 2 - Compressor XATS 176

Devido à experiência obtida com o grande número de ensaios realizados na etapa anterior, chegou-se à especificação de um novo compressor com maior pressão e maior vazão. Também indicadores como peso e volume, autonomia de operação em campo (portabilidade) e possibilidade de oferta no mercado local foram observados.

As idéias como redução do peso e volume, autonomia de operação em campo desta nova especificação já levam em consideração a possibilidade da adaptação deste protótipo em um veículo utilitário leve.

As principais características do compressor XATS 176 estão descritas na tabela 3.10. A carroceria que comporta o compressor e o motor de combustão interna (MCI) que o aciona é mostrada na figura 3.44.

Tabela 3.10 - Características do compressor XATS 176.

Tipo	Pressão máxima		Vazão máxima		Potência do MCI		Rotação (rpm)	
	bar	psi	cfm	min	cv	kW	min	max
XATS 176	10.0	145.0	360.0	10.2	121.0	89.0	1400	2600



Figura 3.44 - Carroceria que comporta motor e compressor (foto do autor).

Com relação ao tamanho, a carroceria para abrigo e transporte do compressor é razoavelmente compacta. Suas medidas com rodas e o engate são 3850 mm de comprimento, da extremidade traseira da carroceria à ponta do engate, 1884 mm de altura, da parte inferior da roda ao tubo de exaustão, e 1818 mm de largura, da extremidade exterior de uma roda à outra. A ilustração da carroceria do compressor com suas medidas pode ser vista na figura 3.45. O peso total chega a 1590 kg sem combustível.

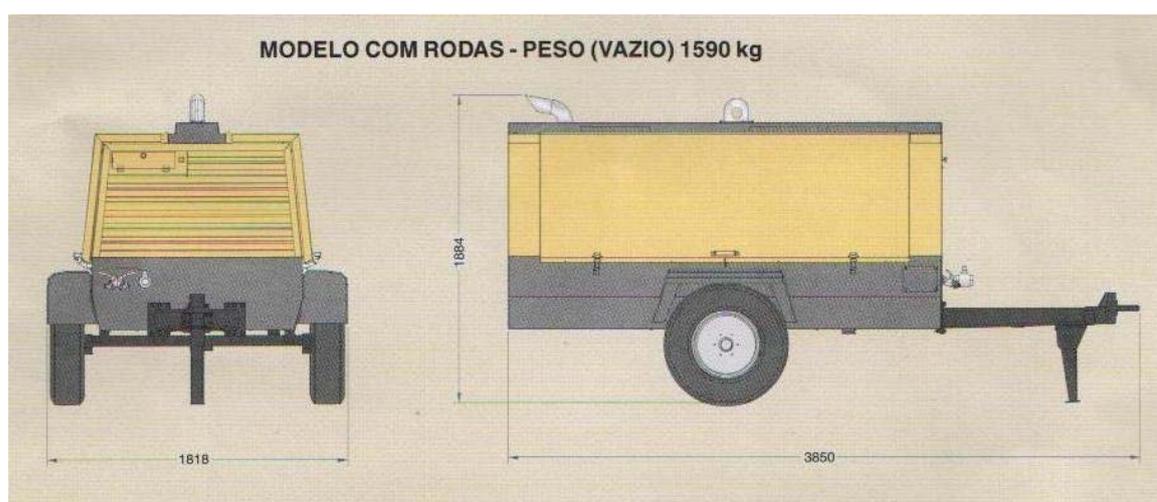


Figura 3.45 - Figura que ilustra as medidas da carroceria do compressor com rodas e engate.

A forma como se apresenta a carroceria do compressor, com engate e com as rodas, é a forma como ele foi utilizado nos testes de laboratórios e nos

testes em campo (capítulo 4). Para uma futura adaptação em um veículo utilitário leve, essas dimensões podem ser consideravelmente reduzidas tornando a carroceria mais compacta.

Na carroceria do compressor há um painel de instrumentos, onde se faz o acionamento do MCI e do compressor. O painel possui um horímetro (P1) para a verificação do tempo de uso da máquina, um manômetro (PG) para verificação da pressão de trabalho, a válvula de carga do compressor (LV), interruptor liga/desliga (S1). Botão de partida (S2), botão de reset (S3), indicador do descarregamento da bateria (H1), indicador de alta temperatura do compressor (H2), indicador de alta temperatura do motor (H3) e botão de emergência (BE). O painel e suas funções estão ilustrados na figura 3.46.

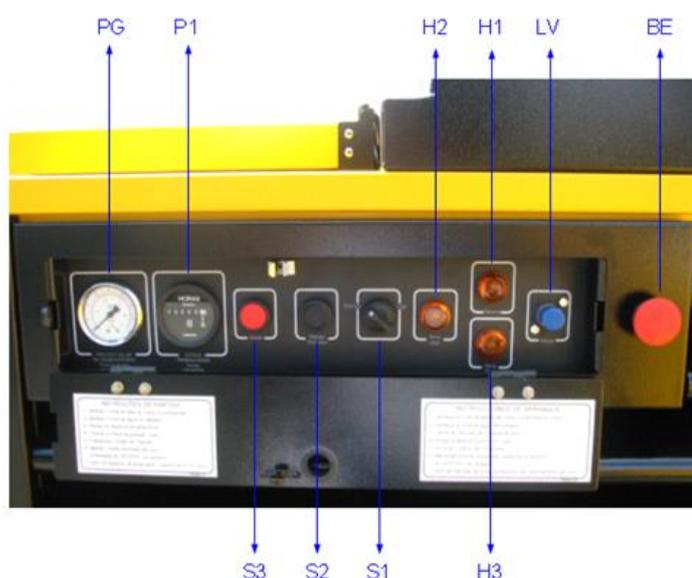


Figura 3.46 - Painel de instrumentos (foto do autor).

Quanto à autonomia em relação ao acionamento, o compressor é acionado por um motor de combustão interna alimentado por óleo diesel. O motor tem potência máxima de 121 cv (89 kW), possui 4 cilindros, rotação mínima de 1400 rpm (rotações por minuto) e rotação máxima de 2600 rpm, resfriamento através de água, bateria de 12 V e 63 Ah (ampère-hora) e tanque de combustível com capacidade para 150 litros. O motor de combustão interna usado no acionamento do compressor é mostrado na figura 3.47.

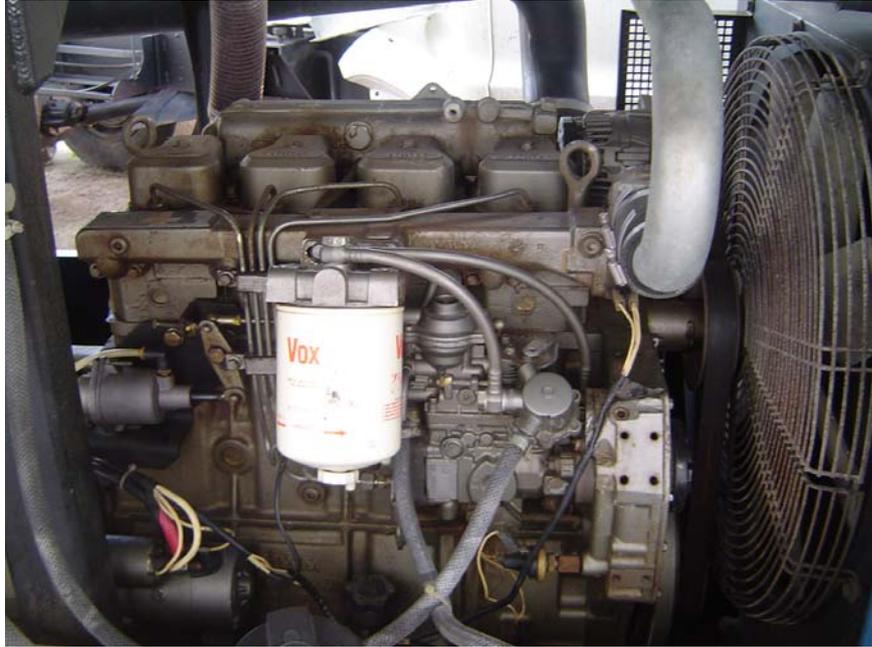


Figura 3.47 - Motor de combustão interna (foto do autor).

Nas figuras 3.48 e 3.49 são mostrados, respectivamente, o elemento compressor e o reservatório de ar do compressor.

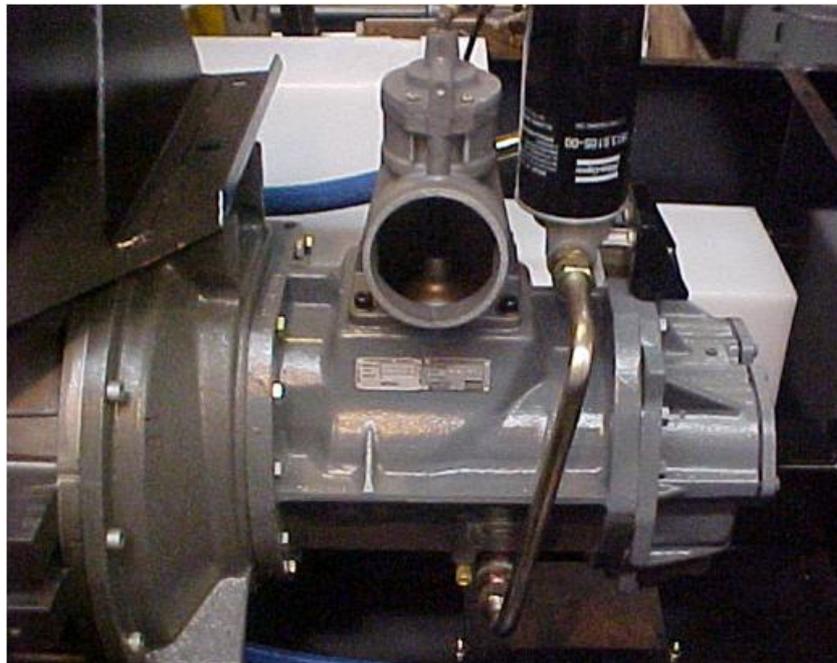


Figura 3.48 - Elemento compressor do XATS 176 (foto do autor).



Figura 3.49 - Reservatório de ar do XATS 176 (foto do autor).

Na figura 3.50 é mostrado o sistema com todas as suas principais partes integrante, tais como elemento compressor, motor, filtro de ar, bateria e tanque de combustível.



Figura 3.50 - Visão geral da parte interna da carroceria (foto do autor).

Na filtragem do ar são utilizados três processos: centrifugação, gravidade e papel filtrante.

A mangueira utilizada nos testes laboratoriais com o compressor XATS 176 é a mesma que foi utilizada para o compressor GA 37, mangueira *wingfoot* de 1 polegada de diâmetro, de PVC com reforço de cordões de fibra sintética. Suporta temperaturas de 5° a 50° C e pressão de até 300 psi (20.7 bars).

O bico utilizado nos testes pode ser visto na figura 3.51. Ele é feito em latão e possui 3/4 de polegadas de diâmetro. Este foi o bico que apresentou um comportamento mais adequado entre os bicos testados (ver Apêndice C).



Figura 3.51 - Bico utilizado nos testes de limpeza laboratoriais com o compressor XATS 176 (foto do autor).

Após toda a descrição e apresentação dos equipamentos e componentes integrantes que foram utilizados nos testes laboratoriais de limpeza a seco, será dado início à parte relacionada aos resultados obtidos com esses testes.

Durante a primeira fase dos ensaios com o compressor GA 37, como já comentado, o compressor e estruturas de ensaios estavam montadas em uma área a uma distância de mais de 20 km do local (laboratório) onde seriam realizados os ensaios de corrente de fuga. Como as condições meteorológicas no período dos ensaios eram bastante rigorosas (muita chuva), o transporte das cadeias de isoladores até o local onde seriam ensaiadas, para verificação das correntes de fuga, muitas vezes não garantia as exatas condições pós-limpeza a seco.

Para evitar problemas dessa ordem na etapa 2, o sistema de testes (compressor, suporte para a cadeia de isoladores, sistema de fixação da mangueira e direcionamento do jato de ar e borrifador da solução salina) foi alocado no próprio laboratório de ensaios elétricos da B&Q eletrificação, onde foram realizadas as medições de corrente de fuga. Não houve necessidade de alteração na parte física nem na parte elétrica do laboratório de ensaios elétricos com a chegada do sistema de testes. Com exceção de um pequeno orifício feito na base da parede para a passagem da mangueira para o interior do laboratório. O compressor ficou do lado de fora enquanto que o restante do sistema de testes ficou no interior do laboratório. O fato de o compressor ser acionado por um motor de combustão interna foi um fator fundamental para que o sistema pudesse permanecer no laboratório.

Quando um ensaio é terminado, seja ele de poluição artificial ou de limpeza, a cadeia de isoladores ensaiada é imediatamente preparada para ter sua corrente de fuga medida no mesmo ambiente. Uma visão geral do laboratório é mostrada na figura 3.52. Esse procedimento evita que haja qualquer alteração das condições pós-ensaio da cadeia de isoladores.



Figura 3.52 - Visão geral do laboratório de ensaios elétricos (foto do autor).

Uma cadeia de isoladores foi retirada da rede elétrica para testes mais reais, para que essa cadeia da própria rede fosse testada em laboratório. A cadeia

de isoladores retirada da rede de distribuição, para os testes, estava em uma região litorânea, na praia do Porto das Dunas na cidade de Aquiraz no estado do Ceará.

No método de poluição artificial utiliza-se apenas uma solução salina como poluente, devido o sal ser um dos agentes poluidores mais agressivos. Em relação à aderência da poluição sobre a superfície do isolador, o isolador naturalmente exposto ao ambiente tem maiores chances de agregar poluentes devido à umidade noturna e outras intempéries. Durante o dia, o sol seca essa poluição aderida durante a noite formando camadas e esse ciclo se repete. O aumento dessas camadas cria caminhos que causam o aumento das correntes de fuga gerando pequenas descargas locais conhecidas como descargas parciais ou superficiais (como visto no capítulo 2) e em consequência disso pode ocorrer um *flashover*. No método de poluição artificial utilizou-se de um procedimento de aplicação e secagem do poluente (como citado na subseção correspondente ao método manual de poluição artificial) que se assemelha ao processo descrito anteriormente neste parágrafo para um isolador exposto ao ambiente. Mesmo com essa diferença na deposição do poluente sobre a superfície do isolador entre um isolador naturalmente e um artificialmente poluído, pode-se dizer que a aderência do sal no método artificial é considerável.

Deve ser levado em consideração que o tipo de poluente encontrado em isoladores da rede (poluição natural) é diferente do poluente utilizado artificialmente. Na exposição natural do isolador o tipo de poluente depende muito da região onde o isolador se encontra. Em áreas próximas ao litoral o sal predomina, já nos centros urbanos há a poluição dos carros, fábricas, indústrias entre outras e nas áreas rurais, outro tipo de poluição se apresenta, por exemplo, a poeira das vias sem pavimentação.

Conforme [1], a severidade do nível de contaminação depende diretamente tanto do clima quanto do tipo de poluente da região. No México, por exemplo, há diferentes tipos e níveis de poluição, devido à formação do relevo, das montanhas e diversidade climática. Por estas razões e de acordo com as estatísticas de falhas, a poluição é a segunda causa de falta nas linhas de transmissão no México.

Em Xangai, China, a condição de contaminação industrial é muito severa e a lavagem periódica dos isoladores é realizada não apenas em subestações, mas também nas linhas de transmissão [2].

Os diferentes níveis de poluição em isoladores elétricos podem ser caracterizados em quatro níveis, associados a determinadas condições ambientais, conforme visto na tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Classes de contaminação e caracterização ambiental [16].

Classe de contaminação	Caracterização ambiental
I Baixo nível de Contaminação	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas sem instalações industriais. • Áreas agrícolas ou montanhosas. • Áreas distantes 10 km a 20 km do mar, não sujeitas à névoa salina.
II Médio nível de contaminação	<ul style="list-style-type: none"> • Área com indústrias que não emitem poluentes atmosféricos ou áreas com média densidade populacional e industrial. • Áreas com alta densidade populacional e/ou alta densidade de instalações industriais, freqüentemente expostas ao vento e/ou chuva. • Áreas distantes da costa (alguns quilômetros) e expostas a ventos marinhos.
III Alto nível de Contaminação	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas com desenvolvimento industrial, alta densidade demográfica ou grande cidades. • Áreas marinhas, ou não, expostas a tempestades relativamente fortes.
IV Muito alto nível de Contaminação	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas expostas à intensa emissão industrial (poeira condutora ou fumaça). • Áreas próximas a costa marinha sujeitas a névoa salina e ventos marinhos fortes. • Áreas desérticas com extenso período sem chuva expostos a tempestades de areia, névoa salina e condensação regular.

Os isoladores submetidos a tempestades fortes, por exemplo, em área com desenvolvimento industrial ou alta densidade demográfica são de classe III [16].

Para se mostrar a diferença entre essa cadeia de isoladores que foi retirada da rede de distribuição com uma cadeia de isoladores submetida à poluição artificial, mediu-se a corrente de fuga de ambas. Na figura 3.53 tem-se a amostra de um isolador da cadeia naturalmente poluída. Foram realizadas cinco medidas de corrente de fuga em cada cadeia de isoladores testada e obtida a média dos

resultados. Os resultados podem ser vistos nas tabelas 3.12 e 3.13 e melhor comparados e analisados pelo gráfico mostrado na figura 3.54.



Figura 3.53 - Cadeia de isoladores tirada da rede de distribuição (foto do autor).

Tabela 3.12 - Correntes de fuga de uma cadeia de isoladores poluída naturalmente.

Condição da cadeia	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Tensão Aplicada (kV)	Corrente de Fuga (μA)	Tempo de Aplicação (Minutos)
Naturalmente poluída	30,4	63,3	5	32,7	-
			10	75,1	-
			15	112,8	-
			20	146,5	-
			20T	146,5	3

Tabela 3.13 - Correntes de fuga de cadeia de isoladores poluída artificialmente (método manual).

Condição da cadeia	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Tensão Aplicada (kV)	Corrente de Fuga (μA)	Tempo de Aplicação (Minutos)
Artificialmente poluída	30,2	62,6	5	22,1	-
			10	54,8	-
			15	94,7	-
			20	122,6	-
			20T	132,0	3

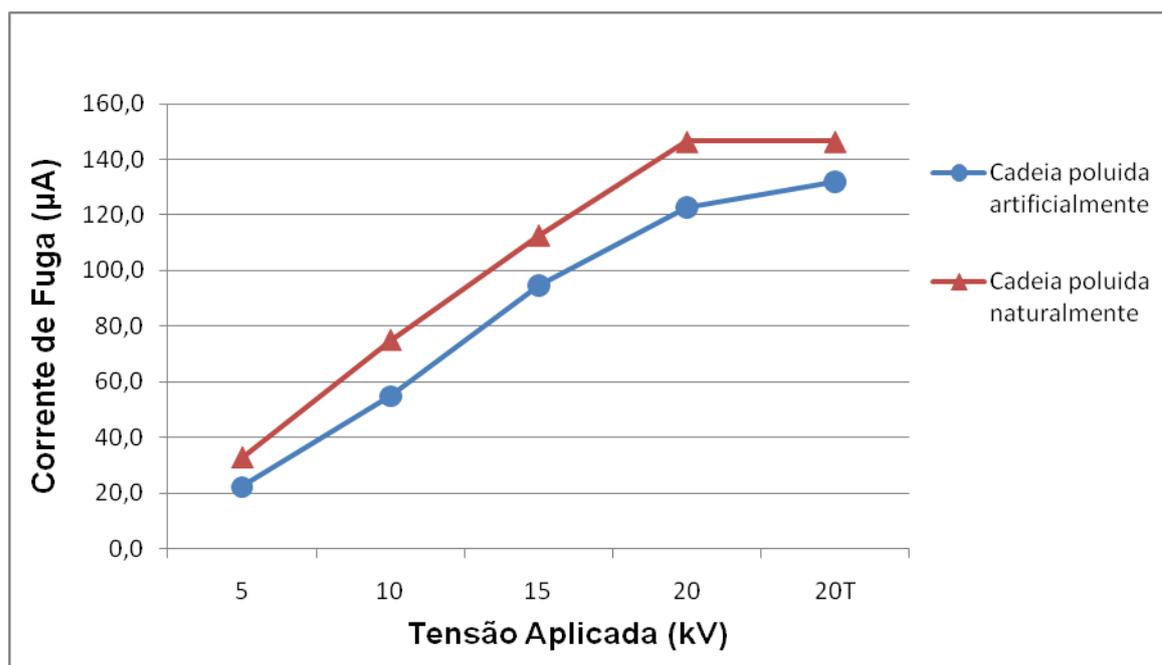


Figura 3.54 - Gráfico de comparação entre correntes de fuga de cadeias de isoladores poluídas naturalmente e artificialmente.

Como pode ser visto pelo gráfico há uma pequena diferença entre as correntes de fuga das duas cadeias, sendo que a corrente da cadeia naturalmente poluída é mais alta que a da cadeia artificialmente poluída. Apesar das diferenças entre as cadeias de isoladores poluídas artificialmente e das cadeias poluídas naturalmente, pode-se dizer que o método de poluição artificial é uma boa aproximação da realidade.

O próximo passo foi a limpeza do isolador poluído naturalmente com a utilização do compressor XATS 176. Após a limpeza do isolador, foi medida a corrente de fuga e comparada com a medida de corrente de fuga de um isolador limpo com água (referência). As medidas de corrente de fuga do isolador limpo com ar comprimido e do isolador limpo com água estão respectivamente nas tabelas 3.14 e 3.15. O gráfico de comparação entre as correntes de fuga da cadeia de isoladores limpa com água e as correntes de fuga da cadeia poluída naturalmente e limpa com ar comprimido é mostrado na figura 3.55.

Tabela 3.14 - Correntes de fuga de uma cadeia de isoladores poluída naturalmente e limpa com ar comprimido.

Condição da cadeia	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Tensão Aplicada (kV)	Corrente de Fuga (μA)	Tempo de Teste (Minutos)
Limpa com ar comprimido	30,4	55,7	5	20,5	-
			10	45,0	-
			15	77,2	-
			20	98,7	-
			20T	101,3	3

Tabela 3.15 - Correntes de fuga de uma cadeia de isoladores limpa com água.

Condição da cadeia	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Tensão Aplicada (kV)	Corrente de Fuga (μA)	Tempo de Teste (Minutos)
Limpa com água	30,4	60,4	5	19,8	-
			10	49,9	-
			15	75,7	-
			20	96,9	-
			20T	92,3	3

Na figura 3.55, pode-se notar que as correntes de fuga da cadeia limpa com ar comprimido atingiram praticamente os valores de referência, que são as correntes de fuga da cadeia de isoladores limpa com água. Para mostrar os valores de corrente de fuga antes e depois da limpeza, recorre-se ao gráfico da figura 3.56. Através dele pode-se observar a magnitude da diminuição na corrente de fuga do isolador poluído naturalmente após a limpeza com ar comprimido. Pode-se dizer que a diminuição foi muito significativa e satisfatória, levando em conta que a diminuição foi do nível máximo a praticamente o nível mínimo.

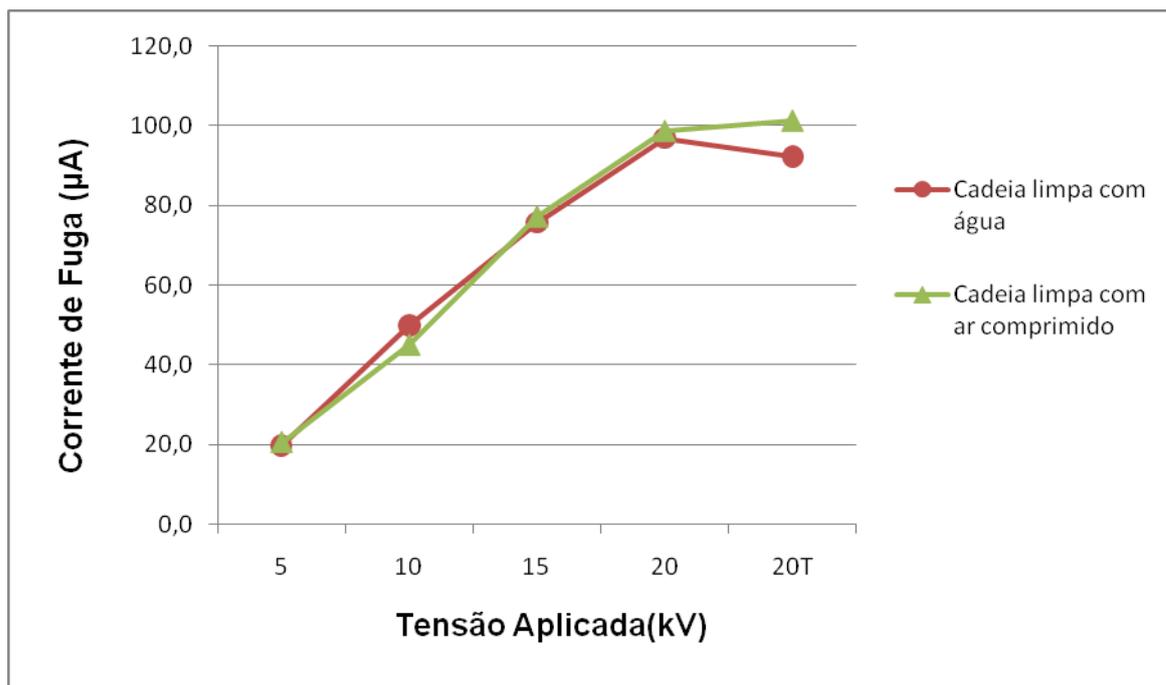


Figura 3.55 - O gráfico de comparação entre as correntes de fuga da cadeia de isoladores limpa com água e da cadeia poluída naturalmente e limpa com ar comprimido.

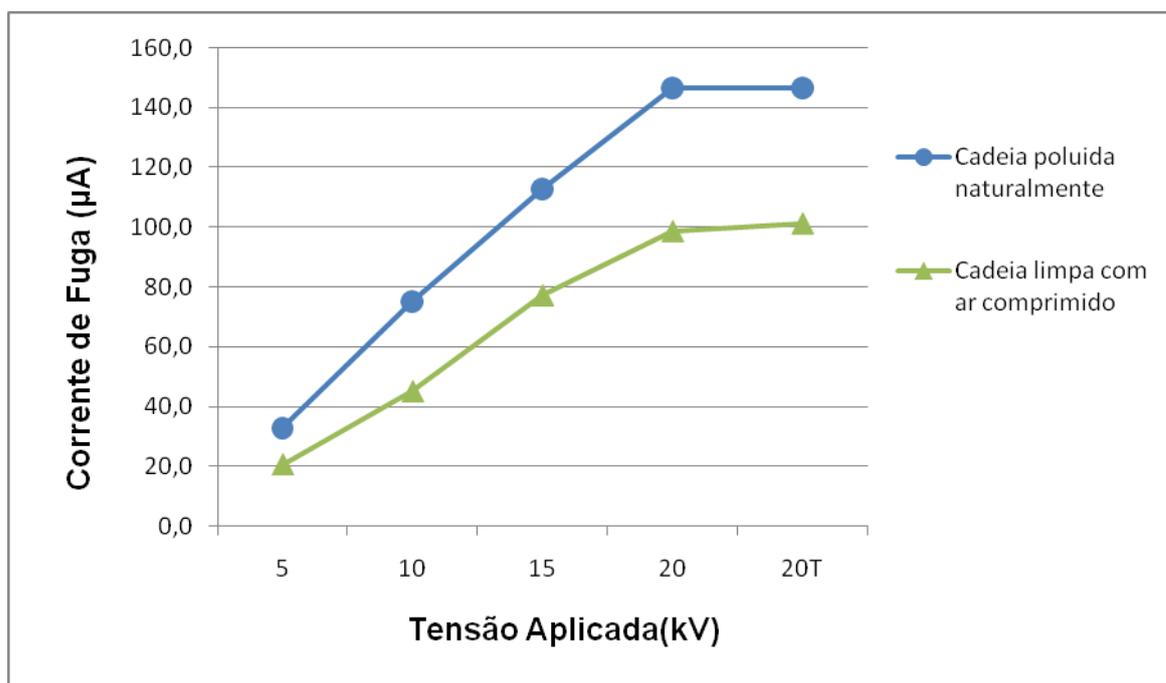


Figura 3.56 - O gráfico de comparação entre as correntes de fuga da cadeia de isoladores poluída naturalmente e da cadeia limpa com ar comprimido.

Pela figura 3.57 pode ser observado que visualmente houve pouca mudança em relação ao estado do isolador antes da limpeza. As duas imagens de isoladores da parte superior da figura é o isolador naturalmente poluído antes de se

efetuar a limpeza e as imagens inferiores do isolador após a limpeza. Como já foi dito, visualmente as alterações foram pouco ou nada perceptíveis, mas quando as correntes de fuga dessas cadeias são comparadas a diferença é bem nítida.

Um isolador que, aparentemente, não tem ou tem pouco poluente aderido em sua superfície, não necessariamente significa que sua condição elétrica seja adequada. Da mesma forma um isolador visualmente muito poluído não significa necessariamente que sua condição elétrica seja crítica. Na cadeia de isoladores naturalmente poluída onde um isolador da cadeia é mostrado na figura 3.53, pode-se observar que o grau de poluição, analisando-se visualmente, não parece ser significativo. Para exemplificar de forma mais clara, uma comparação pode ser feita entre a cadeia de isoladores poluída naturalmente e a cadeia poluída artificialmente (método manual). Primeiramente é feita uma comparação visual entre os isoladores da cadeia naturalmente poluída e da cadeia artificialmente poluída, que pode ser visto na figura 3.58. Como se pode observar o isolador artificialmente poluído (à esquerda na figura) parece ter uma poluição mais agressiva, levando-se em conta o aspecto visual, do que o isolador naturalmente poluído (à direita na figura). Quando as correntes de fuga de ambas as cadeias são comparadas (conforme as tabelas 3.12 e 3.13 e o gráfico da figura 3.54), verifica-se claramente que a cadeia de isoladores poluída naturalmente apresenta uma condição elétrica mais crítica que a cadeia poluída artificialmente. Embora a condição visual pareça induzir um sentimento contrário.

Esta análise reforça que o verdadeiro parâmetro de comparação entre isoladores sujos e limpos é a corrente de fuga. Verificou-se também que o tipo de poluição contribui fortemente para o aumento da corrente de fuga, principalmente aqueles poluentes que são constituídos de substâncias cristalinas iônicas.



Figura 3.57 - Comparação visual de isoladores naturalmente poluídos antes e após a limpeza com ar comprimido (foto do autor).



Figura 3.58 - Comparação visual entre um isolador poluído artificialmente e um isolador naturalmente poluído (foto do autor).

3.4 - PROCEDIMENTO ALTERNATIVO DE LIMPEZA

O procedimento de limpeza utilizando ar comprimido, feito em laboratório, se mostrou eficaz. Há a redução da corrente de fuga a um ponto consideravelmente seguro, mesmo sem estar totalmente limpo visualmente. Mas como observado, a percepção de limpeza sobre a superfície não é completamente conseguida devido à menor densidade do ar e por ele não ser um solvente como a água. Como uma forma alternativa no auxílio à remoção da sujeira restante na superfície do isolador, e como uma maneira de melhorar a percepção visual da limpeza (condicionando-se uma maior satisfação do usuário), criou-se o procedimento que é descrito a seguir.

Esse procedimento alternativo consiste de uma micro pulverização de água (MPA) destilada diretamente no jato de ar comprimido para facilitar a remoção da camada de sujeira que ainda esteja sobre a superfície do isolador, criando um brilho no isolador como o que ocorre com a lavagem com água. Testes utilizando esse procedimento alternativo foram feitos ainda na fase laboratorial como uma forma de avaliar sua viabilidade técnica e ambiental. Na figura 3.59 pode ser vista a cadeia de isoladores antes de se usar o método de limpeza a seco junto com o processo MPA. À esquerda na figura 3.59 tem-se a cadeia de isoladores mostrada por completo e à direita é mostrado cada isolador da cadeia separadamente, cujo grau de salinização pode ser observado com mais detalhes. Essa cadeia foi poluída artificialmente pelo método manual. Na figura 3.60 o procedimento MPA é mostrado.

Após a aplicação do método de limpeza com o procedimento MPA a cadeia de isoladores ficou como mostrada na figura 3.61.



Figura 3.59 - Cadeia de isoladores poluída artificialmente antes do teste com o procedimento alternativo (foto do autor).



Figura 3.60 - Limpeza da cadeia de isoladores com ar comprimido e uso do procedimento alternativo em laboratório (foto do autor).



Figura 3.61 - Cadeia de isoladores após a limpeza com ar comprimido e aplicação do procedimento MPA (foto do autor).

A partir da figura 3.61, observa-se que a cadeia de isoladores ficou completamente limpa com o procedimento MPA, o que se caracteriza como uma melhoria técnica da limpeza. Quanto à parte ambiental, ou seja, o uso de água no processo pode-se dizer que a quantidade de água usada é irrisória. A água utilizada no processo MPA fica em um pequeno reservatório de aproximadamente 5 litros. O recipiente utilizado no processo MPA para armazenar a água é mostrado na figura 3.62. As correntes de fuga medidas após a aplicação do procedimento MPA sobre a cadeia de isoladores mostrada na figura 3.61 praticamente não mudaram em relação às correntes de fuga medidas após a limpeza apenas com ar comprimido.



Figura 3.62 - Recipiente que armazena a água usada no processo MPA (foto do autor).

Mais detalhes do princípio de funcionamento e da montagem do procedimento MPA, assim como os principais componentes utilizados será mostrado no capítulo seguinte.

3.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Concluiu-se que a limpeza com ar comprimido produz os mesmos resultados que a lavagem convencional com água. Essa afirmação é comprovada por uma longa seqüência de procedimentos realizados. Entre esses procedimentos estão as medições das correntes de fuga de cadeias de isoladores poluídas artificialmente, poluídas naturalmente (retirada da operação de redes elétricas da concessionária), limpas com ar comprimido e das cadeias limpas com água (referência). Com a comparação entre as correntes das cadeias limpas com o método proposto (tanto poluída artificialmente quanto naturalmente) com as correntes da cadeia limpa com água, observou-se uma semelhança entre tais valores, o que valida a afirmação feita.

Como os testes foram realizados em um ambiente de laboratório, relativamente controlado, deve-se experimentar o protótipo em condições reais de campo, que será apresentado no capítulo 4.

CAPÍTULO 4

TESTES EM CAMPO

A natureza desta pesquisa tem um forte conteúdo experimental, e obviamente os testes em campo tornam-se de especial atenção

A seguir será feita uma explanação detalhada dos testes de limpeza realizados em campo. Esses testes foram divididos em duas etapas. A primeira etapa foram os testes realizados em um local que simula uma rede elétrica utilizado para treinamento de eletricitistas, portanto reproduzindo bem as condições reais. A segunda etapa foi realizada nas redes de distribuição da própria concessionária no caso a COELCE.

4.1 - ETAPA 1 – TESTES NO CENTRO DE TREINAMENTO

Após a comprovação dos testes de limpeza feitos em laboratório, o próximo passo foi realizar os testes em campo, ou seja, partir para testes de limpeza que se aproximem mais da forma como deve ser aplicada na prática a nova técnica proposta.

Antes de se efetuar os testes na rede de distribuição da concessionária, utilizou-se do centro de treinamento da B&Q eletrificação LTDA, para os testes preliminares em ambiente aberto. Esse centro de treinamento é utilizado pela referida empresa para o treinamento e capacitação de turmas especializadas em manutenção em linha viva (manutenção com a rede energizada). Esse centro de treinamento é composto por diversos postes dispostos de forma semelhante à encontrada nas ruas. Os postes variam de tamanho. Há postes de tamanho reduzidos com aproximadamente 1,6 m de altura, para treinamento em solo, e alguns com altura bem próxima à dos postes da rede de distribuição da concessionária.

Os primeiros testes foram feitos nos postes de tamanho reduzido (figura 4.1), neste caso não houve necessidade da mangueira ser elevada para que os testes fossem realizados. As cadeias de isoladores nos postes mais baixos do

centro de treinamento são de porcelana e vidro, tipo disco, cadeias com 2 isoladores. São usadas em amarração, ou seja, na horizontal e tracionadas por cabos. Essa configuração do isolador também pode ser vista na figura 4.1. Há também isoladores tipo pino multicorpo de vidro e isoladores tipo suporte de porcelana. Os testes de limpeza foram concentrados principalmente nas cadeias de isoladores tipo disco, por serem as mais comuns na rede de distribuição, mas também foram realizados alguns testes nos isoladores tipo pino. Estes testes preliminares tiveram como objetivo a observação do real posicionamento do bico, o ângulo de ataque, distância adequada; e verificação da influência do vento do ambiente no processo.



Figura 4.1 - Postes de altura reduzida do centro de treinamento da B&Q Eletrificação (foto do autor).

O compressor usado continuou sendo o mesmo da etapa laboratorial, XATS 176. A mangueira utilizada nesta etapa não foi a mesma utilizada na etapa anterior. A anterior, feita em PVC, possui reforço de cordonéis de fibra sintética e suporta temperaturas até 50° C. Notou-se nos testes laboratoriais que a mangueira de PVC *wingfoot* estava com uma temperatura relativamente alta. E com isso percebeu-se também que a mangueira estava sofrendo uma dilatação considerável

e mudando a sua consistência, tornando-se mole, devido ao aumento de temperatura. Para constatar se a temperatura da mangueira estava dentro do permitido mediu-se sua temperatura em operação. Para a medição da temperatura utilizou-se de um termômetro infravermelho Minipa, modelo MT-350, medindo temperaturas que vão de -30°C a 550°C com precisão de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ em -30°C a 100°C . As temperaturas medidas ao longo da mangueira foram superiores ao limite máximo recomendado de 50°C , levando a um processo com restrições de segurança.

Com base nessas medições de temperatura e observações foi especificada uma nova mangueira que suporta uma temperatura maior e que possui maior resistência mecânica. É a mangueira pneumática MANTEX da Atlas Copco[®]. Ela é utilizada em sistemas de ar comprimido para perfuração de poços de água ou outras aplicações. A mangueira pode ser vista na figura 4.2.



Figura 4.2 - Mangueira MANTEX (foto do autor).

A mangueira MANTEX é bem leve e de fácil manuseio o que facilita bastante a aplicação em campo. É composta por uma cobertura dupla com tecido reforçado de elevada resistência a rasgos e cortes (revestida interior e exteriormente com poliuretano resistente ao óleo). Sua pressão de serviço é de 30 bars e pressão de ruptura 150 bars. Suporta temperaturas que vão de -30°C a 100°C . Para a aplicação do procedimento de limpeza nas cadeias fixadas nos postes mais baixos, utilizou-se uma mangueira com o diâmetro de $3/4$ de polegada e apenas 6 metros de comprimento, tamanho suficiente para os primeiros ensaios.

4.1.1 Procedimento Alternativo de Limpeza em Postes de Altura Reduzida

No processo MPA não é utilizado um jato contínuo sobre o ar comprimido. Na parte superior da figura 4.3 é mostrado o momento exato em que a MPA atinge o jato de ar comprimido e na parte inferior o momento posterior à incidência da MPA. Como pode ser visto na parte inferior da figura 4.3, o ar espalha a água pela superfície do isolador e com isso facilita a remoção da sujeira. A MPA é acionada após todo o processo de limpeza a seco e em intervalos aleatórios, podendo ser usada mais de uma vez. Nessa fase dos ensaios o acionamento da MPA é feito de forma manual. Enquanto um operador fica responsável por segurar e controlar a mangueira para a limpeza outro operador fica responsável por acionar a MPA, que se mantém por poucos segundos.

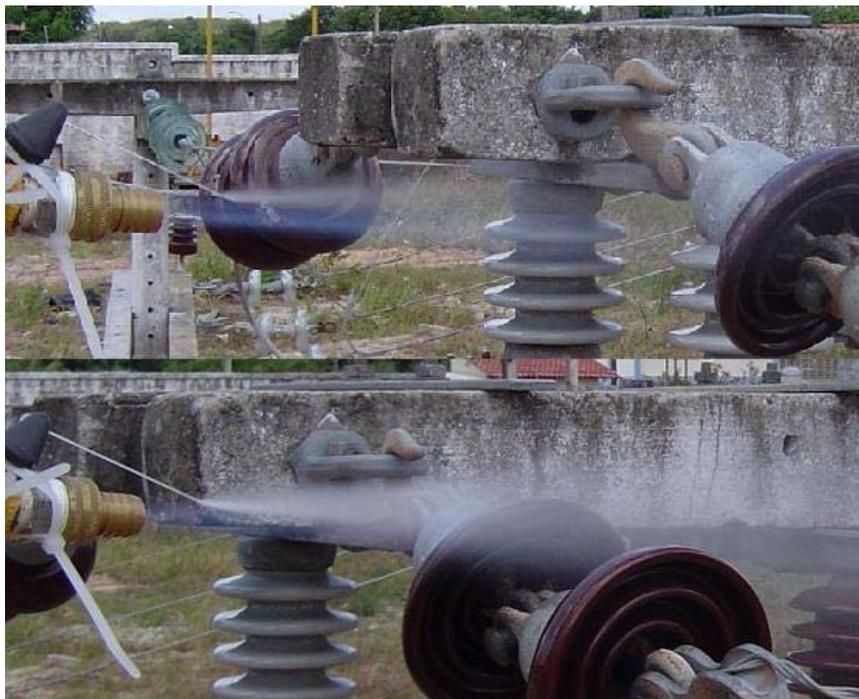


Figura 4.3 - Imagem do momento em que MPA atinge o jato de ar comprimido e o momento posterior (foto do autor).

Uma eletrobomba automotiva, VTO BF12, foi usada para bombear a água do reservatório até o bico que realiza o procedimento MPA. Essa eletrobomba é mostrada na figura 4.4. A eletrobomba é alimentada com 12 V e possui vazão de aproximadamente 22 mililitros por segundo (ml/s).



Figura 4.4 - Eletrobomba automotiva (foto do autor).

Uma mangueira de 5 mm de diâmetro foi usada para o transporte da água até o bico injetor que proporciona o processo MPA (figura 4.5).



Figura 4.5 - Bico injetor (foto do autor).

Para garantir que haja um mínimo gasto de água com a aplicação do processo MPA, foi utilizado um sistema de acionamento remoto microcontrolado, já existente no mercado, que tem a função de manter o jato de água do procedimento MPA ativo por determinado tempo. O acionamento foi feito por um receptor de 2 canais microcontrolado, RX-MC2 plus da MOREY, que teve a função de um sistema de chaveamento remoto. Em linhas gerais o sistema é composto por uma placa receptora, por um transmissor (controle remoto) que aciona 2 relés (que serão

responsáveis por acionar a eletrobomba) que podem ser configurados em normalmente aberto (NA) ou normalmente fechado (NF). Nessa aplicação foi necessário o uso de apenas 1 relé. O sistema de transmissão-recepção opera com frequência de 434 MHz. Há um circuito de temporização utilizando o microcontrolador MC68HRC705KJ, que pode ser configurado de dois modos. A primeira configuração é o modo de retenção que fecha (ou abre) o contato dos relés apertando-se um botão no controle remoto (o relé é mantido alimentado) e só muda de estado apertando-se novamente o botão (a alimentação do relé é retirada). A segunda configuração, que foi a utilizada na aplicação em questão, é o modo pulso que fecha (ou abre) o contato dos relés também apertando-se o botão do controle remoto, mas só mantém esse estado por um período de tempo pré-configurado (o microcontrolador envia um pulso com determinado período de tempo que mantém o relé alimentado por esse período de tempo). Na figura 4.6 pode ser vista a configuração dos jumpers para o correspondente tempo mínimo de duração do pulso de acionamento. As configurações mostradas na Figura 4.6 são para que os dois relés atuem no modo de pulso. E para isso os jumpers JP3 e JP4 também devem ser removidos. A título de conhecimento, os relés também podem atuar de duas outras formas. Os dois relés atuando no modo de retenção (os jumpers JP3 e JP4 devem ser inseridos). E um relé operando no modo de retenção e o outro no modo de pulso (deve ser inserido o jumper JP3 e removido o jumper JP4).

<i>Configuração dos jumpers</i>	<i>Tempo mínimo de pulso</i>
JP5  JP6 	0,5 segundo
JP5  JP6 	1 segundo
JP5  JP6 	2 segundos
JP5  JP6 	3 segundos

Figura 4.6 - Configuração dos jumpers para o correspondente tempo mínimo de pulso.

No procedimento MPA a duração desse pulso indica o tempo que a eletrobomba deve permanecer bombeando água para o bico injetor. Para essa aplicação o relé foi configurado em normalmente aberto e a duração do pulso gerado

pelo microcontrolador indica quanto tempo o contato do relé deve permanecer fechado. A configuração de tempo do pulso utilizada foi para 2 segundos. Vale salientar que ao configurar os jumpers JP5 e JP6 para o tempo desejado, ao pressionar um botão do controle remoto durante um tempo menor que o selecionado, a duração do pulso será correspondente ao tempo mínimo configurado, ou seja, o contato do relé se mantém fechado por 2 segundos. Se o botão do controle remoto for pressionado por um tempo maior que o selecionado, a duração do pulso será correspondente ao tempo em que o botão estiver pressionado. Sendo assim o contato do relé se mantém fechado durante esse tempo e ao soltá-lo o pulso cessa e o relé volta ao estado inicial (nesse caso normalmente aberto).

Na figura 4.7, é mostrado os principais componentes do receptor, tais como os relés RL1 e RL2, os jumpers para a configuração dos relés em NA e NF (JP1 e JP2), os jumpers para a configuração do modo de temporização (JP3, JP4, JP5 e JP6) e os bornes para a conexão da alimentação, neutro e conexão do sistema ao relé.

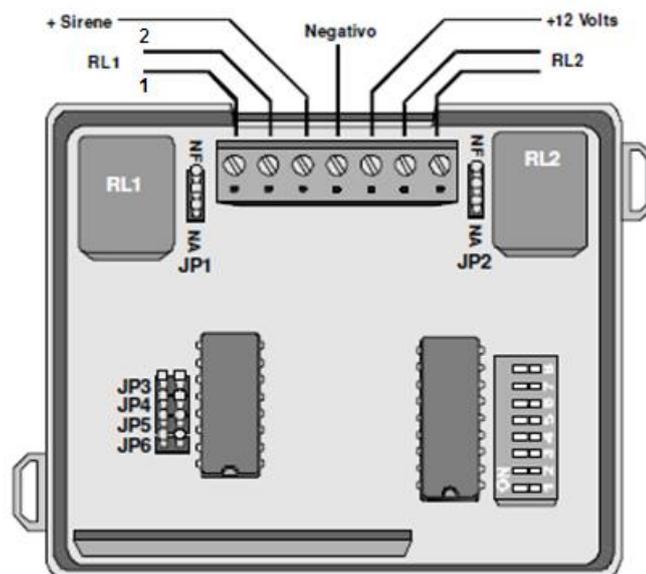


Figura 4.7 - Pontos de conexão e de configuração do receptor RX-MC2.

As ligações desse sistema são descritas a seguir. O terminal positivo da eletrobomba é conectada ao terminal 2 do relé 1 que é o contato NA, e pode ser visto na figura 4.7 no borne. O sistema é alimentado pela própria bateria do motor de acionamento do compressor que é de 12 V. O terminal positivo da bateria se

conecta ao terminal 1 do relé, que é o contato comum, e ao terminal de alimentação da placa que é o +12 V do borne. O terminal negativo da bateria é conectado ao negativo da eletrobomba e ao terminal negativo do borne, para a referência da placa.

A bobina do relé fica em um terminal conectada aos 12 V da bateria e no outro terminal é conectada ao sistema de temporização do microcontrolador. Quando o controle remoto é acionado, já com a configuração de temporização escolhida, o pulso aciona a bobina pelo período pré-programado e fecha o contato NA do relé acionando a eletrobomba e em consequência gerando o jato de água necessário para o procedimento MPA na limpeza das cadeias de isoladores.

A aplicação do procedimento MPA em cadeias de isoladores de porcelana tipo disco, feito nos postes de altura reduzida do centro de treinamento, é mostrada na figura 4.8.

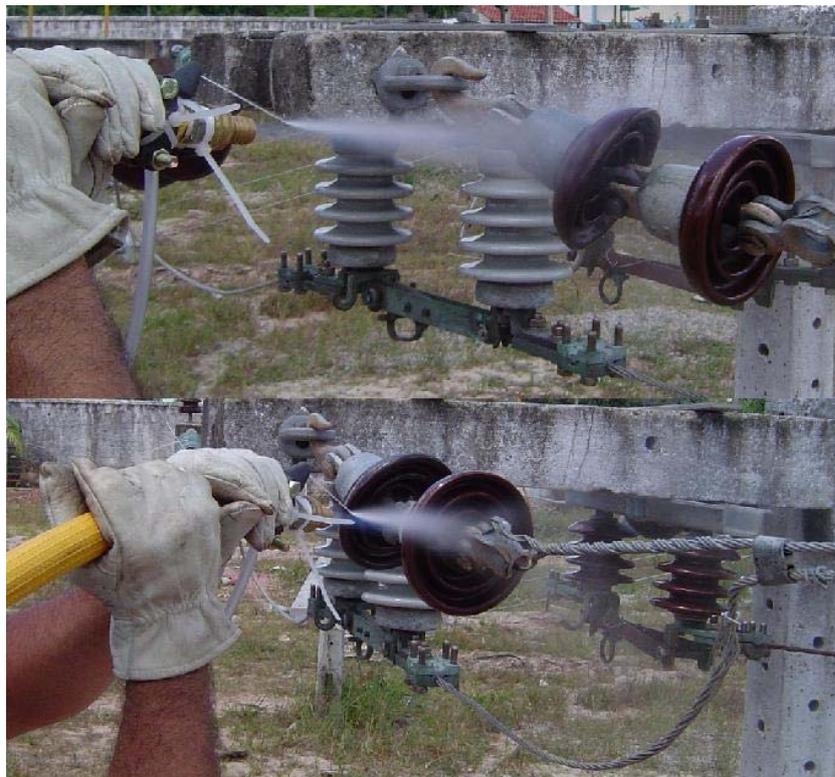


Figura 4.8 - Aplicação do procedimento alternativo no centro de treinamento (postes de altura reduzida) (foto do autor).

4.1.2 Procedimento MPA de Limpeza em Postes de Real Grandeza

Nesta seção serão mostrados os testes de limpeza feitos nos postes de real grandeza ainda no centro de treinamento.

O procedimento MPA de limpeza foi aplicado utilizando-se a mangueira MANTEX de 1 polegada de diâmetro. Para que a limpeza pudesse ser feita nos postes de real grandeza, houve a necessidade de utilização de um caminhão munck equipado com cestos (o mesmo tipo utilizado em manutenção de linhas de distribuição). O caminhão munck pode ser visto na figura 4.9.



Figura 4.9 - Caminhão munck (foto do autor).

O compressor XATS 176 teve sua carroceria acoplada ao caminhão munck. Na figura 4.10 é mostrado o detalhe do acoplamento e na figura 4.11 o conjunto acoplado.



Figura 4.10 - Acoplamento entre caminhão munck e carroceria do compressor (foto do autor).



Figura 4.11 - Conjunto caminhão munck e carroceria do compressor acoplados (foto do autor).

O procedimento de limpeza foi realizado manualmente por dois eletricitistas habilitados e autorizados para tal função. Os eletricitistas possuem bastante experiência, pois trabalham com a lavagem convencional utilizando água.

Cada eletricista fica em um dos dois cestos que o caminhão possui na ponta da lança, munidos dos equipamentos de segurança necessários, tais como capacete, luvas, protetor auricular, cintos de segurança, botas e óculos de proteção. O controle da lança é feito de modo manual do próprio cesto pelos eletricistas de forma a posicioná-los de maneira mais adequada para que seja executado o processo de lavagem a seco. Os cestos e o controle da lança podem ser vistos na figura 4.12.



Figura 4.12 - Cesto e controle da lança (foto do autor).

A mangueira é levada para o alto com os eletricistas para a realização do procedimento. Um dos eletricistas fica responsável por segurar a mangueira e efetuar a limpeza, enquanto o outro fica no controle da lança para o melhor posicionamento de limpeza e para dar apoio caso haja necessidade. O eletricista de apoio também fica responsável por acionar o borrifo de água do procedimento MPA, através de um controle remoto, descrito anteriormente. As figuras 4.13 e 4.14 mostram os eletricistas no cesto, posicionados para a subida da lança e realização da limpeza.



Figura 4.13 - Posicionamento dos eletricitistas no cesto (foto do autor).



Figura 4.14 - Lança em processo de subida (foto do autor).

As instalações do centro de treinamento são todas desenergizadas. Os isoladores usados nas linhas do centro de treinamento são do tipo disco, tipo pino (monocorpo e multicorpo) e tipo roldana. Os isoladores tipo disco são dispostos na

configuração de ancoragem ou amarração, formando uma cadeia de dois isoladores de vidro ou porcelana. Os isoladores de pino ficam na parte de cima da cruzeta (estrutura horizontal) do poste. Os isoladores tipo roldana ficam presos por ferragens ao corpo do poste. Todos esses isoladores podem ser vistos na figura 4.15.



Figura 4.15 - Isoladores tipo disco, pino (multicorpo) e roldana no poste do centro de treinamento (foto do autor).

Os isoladores tipo disco são os de maior importância para os testes por serem um dos mais utilizados nas redes de distribuição, mas os isoladores tipo pino multicorpo também foram testados. Os isoladores instalados no centro de treinamento estão expostos às intempéries constantemente. A distância para a limpeza dos isoladores foi de aproximadamente 1,5m, distância que é utilizado no método atual de limpeza para linhas de média tensão, conforme a PEX 008/2006 R-06, [11]. A limpeza foi efetuada em uma cadeia de isoladores de amarração de porcelana tipo disco e com 2 isoladores por cadeia e em isoladores de vidro tipo pino. O procedimento de limpeza pode ser visto nas figuras 4.16, 4.17, 4.18 e 4.19.



Figura 4.16 - Limpeza das cadeias de isoladores tipo disco de porcelana (foto do autor).



Figura 4.17 - Limpeza das cadeias de isoladores tipo disco de porcelana (foto do autor).



Figura 4.18 - Limpeza dos isoladores tipo pino multicorpo de vidro (foto do autor).



Figura 4.19 - Limpeza dos isoladores tipo pino multicorpo de vidro (foto do autor).

Foram feitas medidas de corrente de fuga nos isoladores de vidro tipo pino após a limpeza. Os valores são mostrados nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3.

Tabela 4.1 – Correntes de fuga do isolador de pino 1

Identificação	Tensão Aplicada (kV)	Corrente de Fuga (μA)	Tempo de Aplicação (Minutos)
1	5	92,0	-
	10	91,4	-
	15	83,3	-
	20	78,0	-
	20T	73,1	3

Tabela 4.2 – Correntes de fuga do isolador de pino 2.

Identificação	Tensão Aplicada (kV)	Corrente de Fuga (μA)	Tempo de Aplicação (Minutos)
2	5	89,7	-
	10	88,4	-
	15	81,9	-
	20	72,3	-
	20T	72,6	3

Tabela 4.3 – Correntes de fuga do isolador de pino 3.

Identificação	Tensão Aplicada (kV)	Corrente de Fuga (μA)	Tempo de Aplicação (Minutos)
3	5	87,2	-
	10	91,8	-
	15	83,7	-
	20	75,1	-
	20T	75,1	3

Os três isoladores de pino citados foram submetidos à limpeza a seco. Os isoladores de números 1 e 2 foram limpos a uma distância de aproximadamente 1,5

metros e o isolador de número 3 foi limpo a uma distância menor. Os isoladores 1 e 2 visualmente ainda permaneceram com sujeira na superfície e na parte inferior. O isolador 3 que foi limpo de uma curta distância teve a sujeira removida e aparentemente ficou limpo. As correntes de fuga mostram que a limpeza não é tomada como eficiente apenas pela aparência do isolador. A comparação foi apenas visual visto que não se tinha correntes de fuga de referência para esse tipo de isolador. E como se pode notar, as correntes dos três isoladores são bem próximas. Os isoladores tipo pino 1, 2 e 3 limpos com a técnica proposta são mostrados respectivamente nas figuras 4.20, 4.21 e 4.22.



Figura 4.20 - Isolador de pino multicorpo 1 (foto do autor).



Figura 4.21 - Isolador de pino multicorpo 2 (foto do autor).



Figura 4.22 - Isolador de pino multicorpo 3 (foto do autor).

O objetivo desta etapa dos ensaios foi testar a técnica de aplicação da limpeza a seco em condições reais, analisando distância ideal, tempo de aplicação, ângulo de ataque, condições de vento contrário, posição e conforto dos técnicos para a aplicação desta nova metodologia.

Essa etapa se mostrou muito importante para a pesquisa, pois se conseguiu definir alguns padrões mínimos para se chegar à aplicação na rede de distribuição da concessionária.

4.2 - ETAPA 2 – TESTES NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Esta etapa mostra os testes realizados nas linhas de distribuição da concessionária, COELCE. Primeiro foi feito o teste em linhas de distribuição de 69 kV no Mucuripe. E o último teste em uma linha de distribuição de 13,8 kV na praia da Sabiaguaba. Todos os testes em linhas desenergizadas.

4.2.1 Procedimento MPA de Limpeza em Linha de 69 kV

Esta seção trata da limpeza das cadeias de isoladores instaladas em uma linha de distribuição de 69 kV, localizada no bairro do Mucuripe em Fortaleza. O trecho escolhido para os testes foi desligado. Os componentes e equipamentos utilizados nesses testes foram os mesmos utilizados nos testes no centro de treinamento nos postes de real grandeza, tais como o caminhão munck, os

equipamentos de proteção individual e o compressor. Foi utilizada uma delimitação para a área de trabalho, com cones de sinalização e cordas zebradas de sinalização, conforme procedimentos de execução da COELCE em [9], [10], [11], por questões de segurança, devido o teste ser realizado em zona urbana. Os testes feitos na linha de 69 kV do Mucuripe foram efetuados pelos mesmos eletricitas responsáveis pelos testes no centro de treinamento. A estrutura tem isoladores tipo disco de vidro na configuração de amarração (com 6 isoladores por cadeia) e também de suspensão (cinco isoladores por cadeia). Na figura 4.23 é mostrada a estrutura submetida à limpeza.

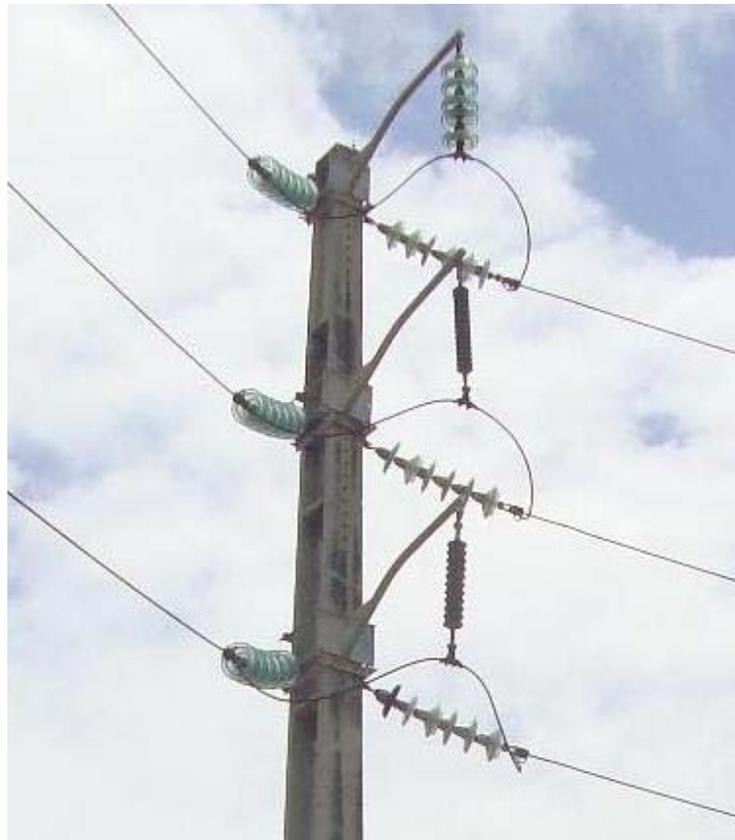


Figura 4.23 - Estrutura de uma linha de distribuição de 69 kV (foto do autor).

A aplicação do método de limpeza proposto pode ser visto nas figuras 4.24, 4.25 e 4.26.



Figura 4.24 - Limpeza de isoladores de uma linha de 69 kV no Mucuripe (foto do autor).



Figura 4.25 - Limpeza de isoladores de uma linha de 69 kV no Mucuripe (foto do autor).



Figura 4.26 - Limpeza de isoladores de uma linha de 69 kV no Mucuripe (foto do autor).

Os testes foram realizados em uma linha de 69 kV no bairro do Mucuripe em Fortaleza, em 19/11/2009 iniciando no horário de 10h30min da manhã. O tempo médio de duração dos testes foi de aproximadamente 1h e 40 minutos. Os testes contaram com a supervisão de uma equipe de engenheiros de manutenção da COELCE, observando os resultados do processo de limpeza e os procedimentos tanto de segurança quanto em relação à limpeza das cadeias de isoladores.

Como os testes foram realizados em um bairro localizado à beira mar, foi possível observar a influência dos fortes ventos na aplicação da limpeza. Mesmo com os ventos contrários os testes foram bem sucedidos.

4.2.2 Procedimento MPA de Limpeza em Linha de 13,8 kV

Esta seção trata da limpeza das cadeias de isoladores instaladas em uma linha de distribuição de 13,8 kV, localizada na praia da Sabiaguaba em Fortaleza em 15/12/2009 tendo início aproximadamente no horário de 11h00min da manhã. O trecho escolhido para os testes foi desligado. Os componentes e equipamentos utilizados nesses testes foram os mesmos utilizados nos testes no centro de

treinamento nos postes de real grandeza e nos testes na linha de 69 kV, tais como o caminhão munck e os equipamentos de proteção individual. Assim como todos os procedimentos adotados. Foi utilizada uma delimitação para a área de trabalho, com cones de sinalização e cordas zebradas de sinalização, conforme [9], [10], [11], por ser um procedimento padrão de segurança. Os testes feitos na linha de 13,8 kV da praia da Sabiaguaba foram efetuados pelos mesmos eletricitistas responsáveis pelos testes no centro de treinamento e na linha de 69 kV. A estrutura tem isoladores tipo disco em porcelana na configuração de amarração (três isoladores por cadeia). Na figura 4.27 é mostrada a estrutura submetida à limpeza.

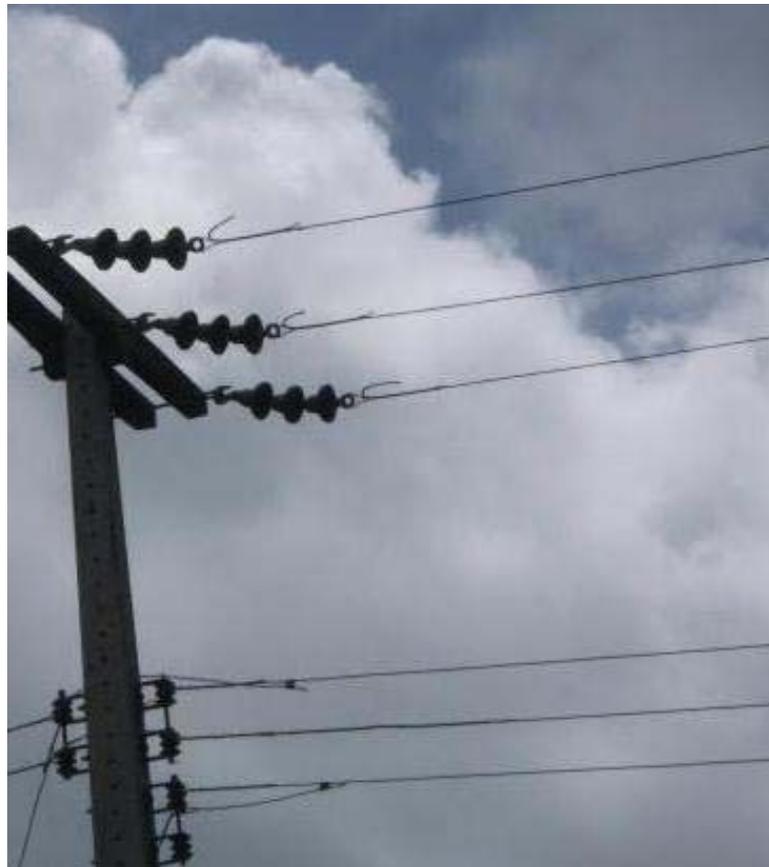


Figura 4.27 – Estrutura de uma linha de distribuição de 13,8 kV (foto do autor).

Nessa etapa é importante que as correntes de fuga das cadeias de isoladores sejam medidas para uma comprovação do método em campo. Para essa comprovação, as cadeias de isoladores devem ter suas correntes de fuga medidas antes e após o processo de limpeza. Para isso haveria a necessidade do desligamento de um trecho de uma determinada linha de distribuição. Esse

desligamento deveria ser feito para a retirada das cadeias de isoladores para a medição da corrente de fuga antes da limpeza e outra cadeia seria colocada no lugar da que foi retirada. Em seguida, após a medição das correntes de fuga a cadeia poluída seria instalada novamente na rede, necessitando outro desligamento, para que o teste de limpeza fosse realizado. As cadeias limpas com o método proposto seriam retiradas novamente para a medição de suas correntes de fuga, necessitando mais uma vez do desligamento do trecho em questão.

Esses sucessivos desligamentos de determinado trecho de uma linha de distribuição, para as retiradas das cadeias para testes, são inconvenientes e de difícil possibilidade de serem realizados, pois causa a interrupção no fornecimento de energia para determinados pontos. Além desse motivo tem-se o fato de que esse constante transporte de um lado para outro pode descaracterizar os testes.

Para superar essas dificuldades, foi traçada uma estratégia para se fazer os ensaios de forma mais simples. De acordo com a disposição das cadeias de isoladores mostradas na figura 4.27, elas são identificadas como a seguir. A cadeia localizada no meio é identificada como 1. A cadeia mais a esquerda é identificada como 3 e a outra cadeia identificada como 2. A estratégia foi a retirada de uma das cadeias de isoladores, mostrada na figura 4.27, para ter sua corrente de fuga medida e servir de parâmetro de cadeia poluída para comparação com as cadeias a serem limpas com o método proposto e assim ser verificado se houve ou não decréscimo dessa corrente de fuga. Essa cadeia retirada como referência de poluição foi a 1. As outras duas cadeias remanescentes foram limpas com o método proposto e após a limpeza foram retiradas para que também tivessem suas correntes de fuga medidas. O procedimento de limpeza dessas cadeias de isoladores pode ser visto nas figuras 4.28 e 4.29.



Figura 4.28 - Limpeza das cadeias de isoladores tipo disco de porcelana em uma linha de distribuição de 13,8 kV na praia da Sabiaguaba (foto do autor).



Figura 4.29 - Limpeza das cadeias de isoladores tipo disco de porcelana em uma linha de distribuição de 13,8 kV na praia da Sabiaguaba (foto do autor).

Nesse caso, foi considerado que as cadeias de isoladores foram sujeitas às mesmas intempéries e condições adversas, por estarem no mesmo ambiente e bem próximas umas das outras, e que o nível de poluição delas, portanto, seria equivalente. Com base nesta consideração, as correntes de fuga das cadeias de isoladores 2 e 3 limpas com o método proposto foram comparadas com as correntes de fuga da cadeia de isoladores 1 que é a poluída. As cadeias de isoladores das extremidades são atingidas de diferentes formas pelas correntes de vento (que trazem a salinidade do mar para o isolador) inclusive variando ao longo do ano devido à sazonalidade dos ventos, podendo a cadeia de uma extremidade ser mais atingida por efeitos poluentes do que a outra. No caso da cadeia central, ela estará submetida às correntes de vento de forma mais uniforme em relação às cadeias da extremidade, por esse motivo a cadeia central foi escolhida como referência de poluição. As cadeias retiradas da linha de distribuição podem ser vistas na figura 4.30. Nas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 têm-se os resultados das medições das correntes de fuga respectivamente das cadeias de isoladores 1, 2 e 3. A figura 4.31 mostra a comparação das correntes de fuga da cadeia 2 com as correntes de fuga da cadeia 1. Na figura 4.32 tem-se a comparação das correntes de fuga da cadeia 3 com as correntes de fuga da cadeia 1.



Figura 4.30 - Cadeias de isoladores retiradas de uma linha de distribuição de 13,8 kV para testes (foto do autor).

Tabela 4.4 - Correntes de fuga da cadeia 1.

Condição da cadeia	Tensão Aplicada (kV)	Corrente de Fuga (μ A)	Tempo de Aplicação (Minutos)
Poluída	5	136,5	-
	10	268,0	-
	15	349,3	-
	20	399,1	-
	20T	305,0	3

Tabela 4.5 - Correntes de fuga da cadeia 2.

Condição da cadeia	Tensão Aplicada (kV)	Corrente de Fuga (μ A)	Tempo de Aplicação (Minutos)
Limpa com ar comprimido	5	30,2	-
	10	70,1	-
	15	109,5	-
	20	157,9	-
	20T	191,8	3

Tabela 4.6 - Correntes de fuga da cadeia 3.

Condição da cadeia	Tensão Aplicada (kV)	Corrente de Fuga (μ A)	Tempo de Aplicação (Minutos)
Limpa com ar comprimido	5	13,5	-
	10	26,7	-
	15	40,6	-
	20	46,0	-
	20T	34,9	3

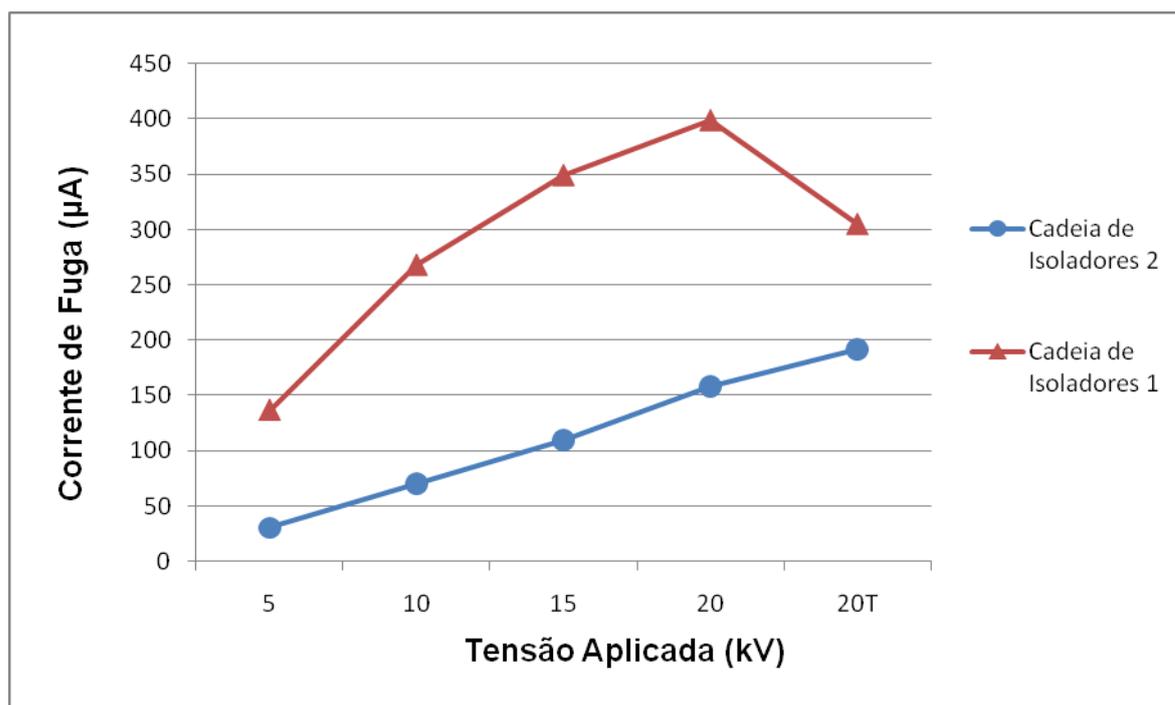


Figura 4.31 - Comparação entre as correntes de fuga da cadeia 1 e as correntes de fuga da cadeia 2 (foto do autor).

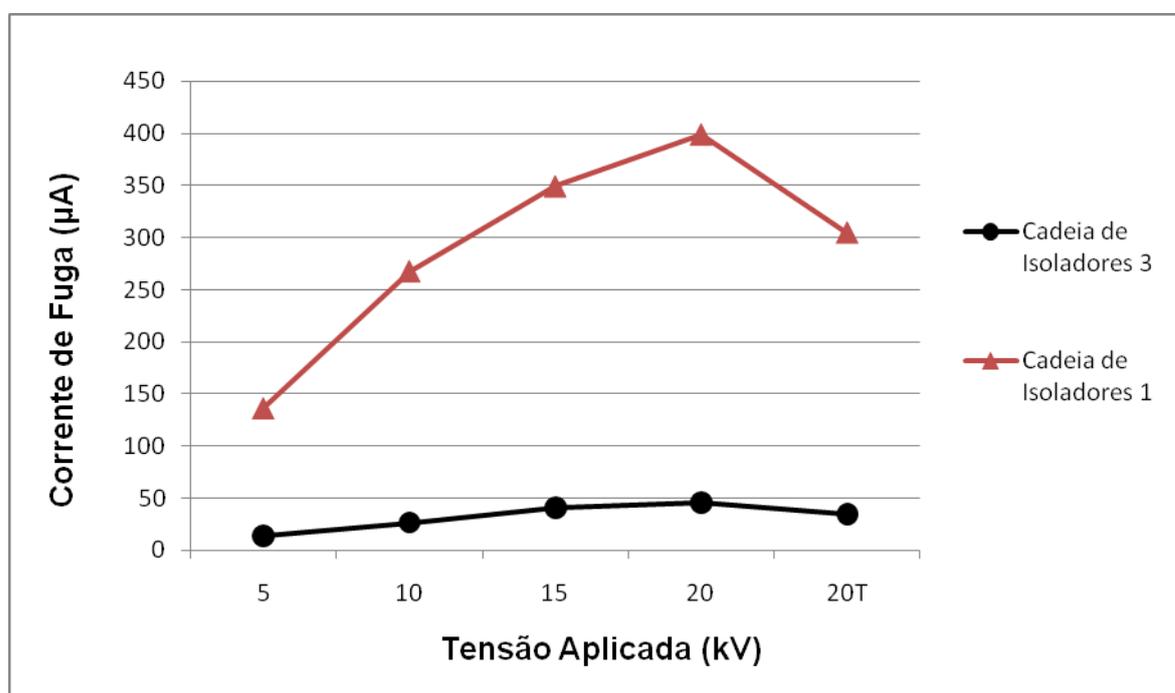


Figura 4.32 - Comparação entre as correntes de fuga da cadeia 1 e as correntes de fuga da cadeia 3 (foto do autor).

Analisando os gráficos da figura 4.31 pode se dizer que houve uma diminuição considerável da corrente de fuga após a limpeza. Na figura 4.32 a

diminuição foi ainda mais acentuada e significativa. A corrente de fuga do isolador limpo com o método proposto atingiu um nível bem abaixo do nível de corrente de fuga do isolador poluído. Isso mostra que a limpeza teve o efeito desejado e que sua eficácia na manutenção preventiva dos isoladores é efetiva.

A diferença razoavelmente alta entre as correntes de fuga dos dois isoladores limpos pela nova metodologia pode ser explicada pelo fato de uma não uniformidade na aplicação do processo. O fato de a posição do caminhão munck favorecer a limpeza de uma cadeia de isoladores em relação à outra. O sentido em que o vento sopra ao longo do ano, ou seja, sua sazonalidade pode poluir as cadeias de isoladores de formas diferentes e, portanto com níveis diferentes de poluição. O sentido em que as correntes de vento sopram no momento da limpeza pode ser mais favorável a uma das cadeias de isoladores. O fato de o tempo de limpeza gasto em cada isolador não ser uniforme, sendo que um tempo de limpeza menor ou igual pode ter sido empregado em uma cadeia que possui maior nível de poluição do que a outra. Além do próprio fato de que por serem cadeias de isoladores distintas isso já faz com que haja uma diferença natural de corrente de fuga entre elas.

Há ainda muito que fazer com relação aos detalhes do procedimento de limpeza, como a avaliação mais precisa do tempo necessário de ataque de ar sobre os isoladores e as posições mais adequadas para a realização da limpeza. Esses detalhes do procedimento de limpeza só podem ser obtidos com uma maior quantidade de ensaios em campo. A verificação da direção do vento com a utilização de uma biruta facilitaria bastante na hora do posicionamento do caminhão munck e na redução do tempo de análise da melhor posição para a aplicação do procedimento de limpeza.

Mas mesmo com todos esses detalhes a serem melhorados, os resultados obtidos nesse teste de campo podem ser considerados excelentes. Houve um decréscimo das correntes de fuga de ambas as cadeias de isoladores o que significa que o método cumpriu com a sua função.

Durante o período dos ensaios observou-se todas as recomendações de segurança e da utilização dos EPI's. Nenhum ensaio com a rede energizada foi realizado.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 - CONCLUSÕES

A lavagem dos isoladores é um processo de manutenção fundamental para o bom funcionamento do sistema elétrico. O ambiente gera poluentes nocivos aos isoladores e o acúmulo desses poluentes na superfície dos isoladores causa uma série de problemas, como por exemplo, redução da capacidade dielétrica dos isoladores, aumentando a corrente de fuga e conseqüentemente provocando a ocorrência de *flashovers*, que causa interrupções no fornecimento de energia. Neste trabalho foi desenvolvida uma técnica de limpeza utilizando ar comprimido. Esta técnica permite uma limpeza ambientalmente correta, não desperdiçando grandes quantidades de água e nem gerando outros poluentes agressivos ao ambiente (devido à reação da água com sais, óxidos e outros elementos presentes na superfície dos isoladores gerando outros compostos), como acontece com a utilização do atual método de limpeza dos isoladores. Para a avaliação inicial desse novo processo de limpeza com ar comprimido foram utilizados compressores industriais de pequeno porte. Os testes com esses compressores não mostraram resultados bastante conclusivos a cerca da eficácia da limpeza devido às condições de operação desses equipamentos não serem suficientemente adequadas (não mantêm pressão constante devido ao reservatório de ar ser limitado, entrando em condição de carga-alívio). Entretanto foi observado que com um maior aprofundamento teórico e experimental, buscando-se condições mais favoráveis aos testes de limpeza, é possível limpar isoladores utilizando ar comprimido.

No processo de lavagem com água, ela é utilizada em alta pressão, de 30 a 83 bars. Isso levou a crer que a pressão do ar teria que ser bem maior, devido a sua densidade menor que a da água e por não ter a propriedade de solvente. Os compressores de alta pressão por terem aspectos construtivos especiais e por

serem utilizados em aplicações específicas, não são fabricados em larga escala geralmente sendo feitos sob encomenda. Devido a essas dificuldades optou-se pelo uso de cilindros de gás nitrogênio em alta pressão. O gás nitrogênio foi pressurizado a 200 bars nos cilindros. A utilização desse gás na limpeza se mostrou importante, pois comprovou a capacidade de limpeza do fluido gasoso e contribuiu para se chegar à conclusão de que naquele momento a variável a ser levada em maior consideração para melhor qualidade no processo de limpeza era a vazão.

A partir dos testes feitos com o gás nitrogênio em alta pressão e a constatação de que a vazão era a variável principal no processo de limpeza substituiu-se o equipamento por um compressor de alta vazão e uma grande quantidade de testes laboratoriais foram realizados a fim de comprovar a maior influência desta variável na limpeza dos isoladores. A corrente de fuga foi o parâmetro a ser analisado para verificar se a limpeza das cadeias de isoladores foi realmente eficaz. Devido à grande dificuldade em se obter cadeias de isoladores poluídas da rede elétrica, para a realização dos testes de corrente de fuga e em seguida a aplicação do método de limpeza proposto, buscou-se meios para que pudesse ser feita a avaliação do processo inicialmente em laboratório. Para isso foram utilizados métodos de poluição artificial. Nesses métodos foi utilizada como substância poluidora uma solução salina. Essa escolha se deveu ao fato de o sal ser um dos agentes poluidores mais agressivos e prejudiciais às cadeias de isoladores. Os métodos utilizados foram dois: o método da câmara de névoa salina e o método manual. No primeiro método o tempo de ensaio é muito grande, cerca de 6 horas enquanto no segundo o tempo médio é de 20 min. O método manual é mais prático na forma de aplicação, utilizando-se de um borrifador que pode ser usado em qualquer lugar necessário. Chegou-se à conclusão através de comparação entre as correntes de fuga medidas em isoladores poluídos pelos dois métodos, que o método manual é o mais adequado para os experimentos em laboratório. Posteriormente uma cadeia de isoladores poluída naturalmente foi tirada da rede de distribuição da concessionária e foi feita a comparação entre as correntes de fuga dessa cadeia com a corrente de fuga de uma cadeia poluída artificialmente. Essa comparação mostrou e reforçou que o método manual de poluição artificial é uma boa alternativa para testes em laboratório.

Com a medição de corrente de fuga de uma cadeia de isoladores limpa com água como referência, a medição da corrente da cadeia poluída artificialmente, a medição da corrente da cadeia poluída naturalmente e a medição da corrente das cadeias após o procedimento de limpeza, foram analisados os diversos resultados obtidos, e eles mostraram uma diminuição da corrente de fuga bem significativa e que pode se concluir que o processo testado em laboratório é adequado e eficaz para a limpeza dos isoladores.

Essa pesquisa teve um caráter fortemente experimental, além de diversas variáveis que não puderam ser levadas em conta em ambientes controlados como nos laboratórios. Dessa realidade surgiu uma série de dificuldades dentre elas de caráter climático, que não podem ser previstas, sendo a principal a chuva. Com a chuva veio o problema da umidade, que mesmo para os testes laboratoriais causou diversas conseqüências inesperadas e indesejáveis. A estação chuvosa do ano de 2009 se estendeu além do esperado, coincidindo justamente com o período de realização dos ensaios laboratoriais. A alta umidade do ar atmosférico, devido às chuvas, dificultou a salinização artificial dos isoladores e não permitiu a realização dos testes de corrente de fuga nesse período.

Com a comprovação da eficácia da limpeza em laboratório o próximo passo foi realizar testes em campo. Os testes em campo foram realizados em um centro de treinamento que apresenta estruturas semelhantes às estruturas reais e também em linhas de distribuição desenergizadas da concessionária. Comparando o procedimento de limpeza realizado em campo com o realizado em laboratório, há diversos fatores que influenciam nos testes em campo que não foram levados em consideração nos testes de laboratório. Entre os principais fatores estão o vento, que influencia na direção do ângulo de ataque do ar, o posicionamento mais adequado para o caminhão munck e o seu acesso principalmente em pequenas ruas ou vielas de alguns bairros de Fortaleza, para que seja possível uma melhor aproximação para a limpeza. Com essas variáveis adicionais no processo de limpeza fica claro que haveria a necessidade de uma grande quantidade de testes em campo, para determinação com mais detalhes dos procedimentos de limpeza dos isoladores. Uma grande quantidade de ensaios em campo deveria ter uma forte integração com a concessionária local, associando seus desligamentos programados para

manutenção ou alguma outra intervenção na rede, aos ensaios a serem realizados, reduzindo assim desligamentos freqüentes da rede específicos para os testes.

Mesmo com esses fatores desfavoráveis, os testes de limpeza em campo apresentaram resultados satisfatórios, mostrando pelas medições de corrente de fuga que o seu valor após a limpeza cai significativamente. Com isso pode-se dizer que a técnica de limpeza de isoladores com ar comprimido é eficaz e possível de se implantar como novo método de limpeza dos isoladores da rede de distribuição, sendo necessária apenas uma maior quantidade de testes para melhoria da definição dos padrões no procedimento de limpeza e algumas adaptações.

O procedimento MPA de limpeza, que utiliza uma pequena quantidade de água borrifada no jato de ar se mostrou bastante viável. Com os testes realizados não foi possível quantificar o volume de água utilizado para um determinado número de estruturas. A vazão da bomba responsável por levar a água do reservatório ao bico injetor é de aproximadamente 22 mililitros por segundo e o reservatório tem capacidade para 5 litros, assim pela quantidade de água utilizada nos testes pode-se afirmar que é baixo o consumo de água. A montagem do sistema de acionamento é bem simples de ser feita e com componentes já existentes no mercado. Este procedimento mostrou ser uma boa alternativa para ser utilizado em conjunto com o método de limpeza com ar comprimido, funcionando como um critério de parada para a limpeza em casos mais críticos de poluição por deixar a superfície do isolador como um aspecto visual limpo e sem que haja agressão ao meio ambiente.

5.2 - PUBLICAÇÕES RELACIONADAS COM A PESQUISA

SOUSA, RAFAEL OLIVEIRA DE, PONTES, R. S. T., AGUIAR, V. P. B., LUNA, ANADITE MARIA DE AND ANDRADE, CÁSSIO TERSANDRO DE CASTRO. "Technique of dry washing of the insulators of the electrical nets of distribution". Artigo apresentado na cidade de Zaragoza - Espanha da ocasião do 11 CHLIE (11º Conferência Espanhola-Lusa de Engenharia Elétrica), Jul., 2009.

RAFAEL OLIVEIRA DE SOUSA, RICARDO SILVA THÉ PONTES, CARLOS ALMIR M. HOLANDA, AND BRUNO O. D. A. DE FIGUEIREDO. "New Strategy for the Dry Washing of the Insulators of the Electrical Nets of Distribution". Artigo apresentado na cidade de Ubatuba - SP da ocasião do 8 CLAGTEE (8º

Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de energia Elétrica), Out., 2009.

RAFAEL OLIVEIRA DE SOUSA, RICARDO SILVA THÉ PONTES, CARLOS ALMIR M. HOLANDA, ANADITE MARIA DE LUNA. “Um Novo Método de Limpeza de Isoladores da Rede Elétrica de Distribuição: Resultados dos Testes em Campo”. Artigo submetido no SENDI/2010 (Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica).

5.3 - PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Como tópicos para estudos futuros pode-se sugerir:

A aplicação dos testes de limpeza com ar comprimido em isoladores poliméricos a fim de observar o comportamento da limpeza e criar referências de testes para esse tipo de isolador, que não podem ser lavados com água;

A realização de testes de limpeza a seco em laboratório, com os isoladores energizados. A partir destes testes determinar com maior precisão a distância mais segura que se pode atingir e os procedimentos para a realização de tais testes em campo com a linha energizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gerardo Montoya-Tena, Ramiro Hernández-Corona, e Isaías Ramírez-Vásquez. “Experiences on Pollution Level Measurement in Mexico”. *Electric Power Systems Research* 76 (2005) p. 58-66.
- [2] X. Lin, Z. Chen, X. Liu, K. Chu, K. Morita, R. Matsuoka e S. Ito. “Natural Insulator Contamination Test Results on Various Shed Shapes in Heavy Industrial Contamination Areas”. 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 1992.
- [3] Darcy R. de Mello, Raimundo Tarcísio D. Costa Jr, José Távora Batista, Marcony E. Melo. “Avaliação do Grau de Poluição em Instalações de Transmissão, Subestações e Distribuição”. 2004.
- [4] Kleber Franke Portella, Fernando Piazza, Paulo Cesar Inone e Sebastião Ribeiro Jr., Mário Seixas Cabussú, Dailton Pedreira Cerqueira e Cleuber Sobreira da Silva Chaves. “Efeitos da Poluição Atmosférica (Litorânea e Industrial) em Isoladores da Rede Elétrica da região Metropolitana de Salvador”. *Quim. Nova*, Vol. 31, Nº 2, 340-348, 2008.
- [5] Rubens Dario Fuchs, *Transmissão de Energia elétrica – Linhas Aéreas*,. 2^o Edição, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1979.
- [6] Hemant Joshi, *Residential, Commercial, Industrial Electrical Systems: Equipment and Selection*, Vol. 1, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
- [7] Isoladores Santa Teresinha. Disponível: <http://www.cst-isoladores.com.br/portugues/produtos/>, acessado em 27 de Dezembro de 2009.
- [8] José Rui Ferreira, *Sistemas Eléctricos de Energia I – Linhas de Transmissão*, 2004.
- [9] COELCE - Procedimento de Execução - PEX – 062/2006 R-01 – Lavagem de Isoladores em Linha de Transmissão e Subestação Desenergizadas, 2006.
- [10] COELCE - Procedimento de Execução - PEX – 028/2006 R-03 – Lavagem de Isoladores em Linha de Transmissão e Subestação Energizadas, 2006.

- [11] COELCE - Procedimento de execução - PEX – 008/2006 R-06 – Procedimento para Execução de Redes de Média Tensão Energizadas, 2006.
- [12] ABNT – NBR 10621: 2005 – Isoladores Utilizados em Sistemas de Alta Tensão em Corrente Alternada – Ensaio de Poluição Artificial.
- [13] ABNT – NBR 5032: 1984 – Isoladores de Porcelana ou Vidro, para Linhas Aéreas e Subestações de Alta e Média Tensão.
- [14] Paulo Sérgio B. Rodrigues, Compressores Industriais, Editora Didática e Científica, 1991.
- [15] Aguiar, V. P.B., Estudo de Eficiência Energética no Acionamento de um Compressor Parafuso em um Sistema de Ar Comprimido. Fortaleza, 2008. Dissertação realizada na Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.
- [16] Cesar Augusto Fontanella, Recobrimentos Hidrofóbicos para Uso em Isoladores Porcelânicos de Alta Tensão. Florianópolis, 2007. Dissertação realizada na Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.
- [17] João Mamede Filho. “Proteção Contra Descargas Atmosféricas Através de Pára-Raios de Haste”. Revista Tecnologia, Junho, 1987.
- [18] Cepel - Imagem retirada do site: http://www.cepel.br/cepel_noticias/noticia.php?id=12 em 22 de dezembro de 2009.
- [19] Shutterstock Images - Imagem retirada do site: <http://www.shutterstock.com/pic-31773010/stock-photo-high-voltage-electrical-insulators-electric-line-against-the-blue-sky-photographed-with.html> em 27 de dezembro de 2009.
- [20] Balestro - Imagem retirada do site: <http://www.balestro.com> em 27 de dezembro de 2009.
- [21] Tyco Electronics - Imagem retirada do site: http://energy.tycoelectronics.com/index.asp?act=page&pag_id=2&pri_id=5&pls_id=28&prf_id=54&pr_id=75 em 27 de dezembro de 2009.

- [22] SMPPO Electric CO. - Imagem retirada do site: <http://www.smppo.com/Infocn.asp?id=98> em 27 de dezembro de 2009.
- [23] Imagem retirada do site: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Pylon.detail.arp.750pix.jpg> em 27 de dezembro de 2009.
- [24] Freefoto - Imagem retirada do site: http://www.freefoto.com/images/13/18/13_18_63---Power-Lines_web.jpg em 28 de dezembro de 2009.
- [25] Supreme & CO. - Imagem retirada do site: http://supremeco.tradeindia.com/Exporters_Suppliers/Exporter15401.304754/-V-AC-Suspension-String.html em 28 de dezembro de 2009.
- [26] Knol - Imagem retirada do site: <http://knol.google.com/k/overhead-line-insulators#> em 28 de dezembro de 2009.
- [27] N. Stosic, I. Smith, A. Kovacevic, Screw Compressors: Mathematical Modeling and Performance Calculation, Londres: Ed. Springer, 2005.
- [28] Royce N. Brown, Compressors: Selection and Sizing, 3º Edição, Ed. Elsevier, 2005.
- [29] Heinz P. Bloch, A Practical Guide to Compressor Technology, 2º Edição, Ed. Wiley, 2006.
- [30] ASTM B117 - 07 – Standard Method for Salt Spray (Fog) Testing, 2007.
- [31] G. Leslie Hill. “Tests and Developments in Connection with Hot-Line Insulator Washing”. AIEE Pacific General Meeting, San Diego, Calif., Vol 66, Aug., 1947.
- [32] D. Perin, A. Pignini, I. Visintainer, Channakeshava, M. Ramamoorthy. “Live-Line Insulator Washing: Experimental Investigation to Assess Safety and Efficiency Requirements”. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, Illinois, April, 1994.
- [33] José Renato Ferreira Barreto. “Lavagem de Isoladores em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Energizadas”. Revista Tecnologia Fortaleza Nº 18 P. 16-19, Dez., 1997.

APÊNDICE A

TIPOS DE ISOLADORES

O presente apêndice visa apresentar informações a cerca dos diversos tipos de isoladores existentes e utilizados nas redes de distribuição e transmissão de energia elétrica, assim como mostrar figuras representativas de alguns desses componentes. Algumas das principais características desses tipos de isoladores serão apresentadas em forma de tabelas a seguir

Quanto à aplicação a que se destinam os isoladores podem ser divididos em isoladores tipo roldana, pino, castanha, disco, bastão, pilar, suporte, pedestal e bucha.

O uso desses diversos tipos de isoladores na rede elétrica leva em conta a que níveis de tensão esses isoladores vão estar submetidos, além de outros fatores como os esforços a serem suportados, peso, tamanho, etc. Os níveis de tensão da rede elétrica são classificados em baixa tensão, média tensão, alta tensão, extra-alta tensão e ultra-alta tensão. A baixa tensão compreende as tensões até 1 kV. Os níveis de tensão usuais são 127/220, 115/230, 220/380 e 440 V. A média tensão compreende as tensões acima de 1 kV até 35 kV. Os níveis de tensão usuais são 3,8, 6,6, 11,9, 13,8 e 34,5 kV. A alta tensão compreende as tensões acima de 35 kV até 230 kV. Os níveis de tensão usuais são 69, 88, 138 e 230 kV. A extra-alta tensão compreende as tensões acima de 230 kV até 750 kV. Os níveis de tensão usuais são 345, 440, 500 e 600 (CC) kV. A ultra-alta tensão compreende as tensões acima de 750 kV. Os níveis de tensão usuais são 765 (Itaipu), 800 (CC) (China), 1000 (Japão) e 1150 kV (Rússia). Essas tensões são também agrupadas (de forma a se ter melhor desempenho) de acordo com a função das linhas que transportam a energia elétrica. As linhas são classificadas em linhas de transmissão (tensões mais usuais no Brasil 138, 230, 345, 440, 500 e 765 kV), de subtransmissão (34,5, 69, 88 e 138 kV), de distribuição primária (valores usuais da média tensão) e de distribuição secundária (valores usuais da baixa tensão). Dependendo das suas características físicas e elétricas, os isoladores são especificados adequadamente para utilização no sistema elétrico

O primeiro tipo de isolador apresentado é o roldana (*spool type*). Esse tipo de isolador, como o próprio nome já indica, tem forma de roldana. Possui um furo axial para passagem de um eixo não integrante, pelo qual é fixado na estrutura de suporte. São utilizados em montagem horizontal (fixados por parafuso nos postes) ou vertical (estruturas com estribos), para uso em redes de distribuição secundária (baixa tensão – residências e indústrias). Sua resistência mecânica à flexão vai desde 1250 daN (decanewton – 10^1 N) até 2670 daN e na tensão nominal de 1,2 kV [7].

Nas figuras A.1, A.2 e A.3 são mostrados alguns modelos de isoladores tipo roldana.



Figura A.1 - Isolador tipo roldana modelo 1101 (conforme [7]).



Figura A.2 - Isolador tipo roldana modelo 1102 (conforme [7]).



Figura A.3 - Isolador tipo roldana modelo 1108 (conforme [7]).

Algumas características dos isoladores tipo roldana são apresentadas nas tabelas A.1, A.2 e A.3.

Tabela A.1 - Características do isolador tipo roldana modelo 1101 (conforme [7]).

Tensão Nominal (kV)	Ruptura à Flexão (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Altura (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Diâmetro do Furo (mm)	Peso (kg)
1,2	900	48	54	57	17,5	0,2

Tabela A.2 - Características do isolador tipo roldana modelo 1102 (conforme [7]).

Tensão Nominal (kV)	Ruptura à Flexão (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Altura (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Diâmetro do Furo (mm)	Peso (kg)
1,2	2000	75	76	105	18	1,15

Tabela A.3 - Características do isolador tipo roldana modelo 1108 (conforme [7]).

Tensão Nominal (kV)	Ruptura à Flexão (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Altura (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Diâmetro do Furo (mm)	Peso (kg)
1,2	1350	71	76	80	18	0,51

Os isoladores tipo pino apresentam entalhe superior e gola lateral para fixação dos cabos aéreos, sendo normalmente amarrados a estes com laços pré-formados. São próprios para montagem rígida vertical em cruzeta ou diretamente no topo do poste. São fixados à estrutura através de um pino de aço. Para tanto, em sua parte interna possuem um furo rosqueado, com rosca de filete redondo. Os pinos de aço forjado possuem, em sua parte superior, uma cabeça de chumbo filetada, sobre a qual se atarraxa o isolador. São normalmente solicitados à compressão e à flexão. Sua resistência à flexão vai desde 1000 daN até 1360 daN. Estão disponíveis para tensões nominais de 7,2 kV até 72,5 kV, podendo ser de cor marrom ou cinza [5], [7].

De acordo com o nível de tensão que o isolador de pino suporta ele pode ser de dois tipos monocorpo e multicorpo. O isolador monocorpo atinge tensões até 25 kV, enquanto que os isoladores multicorpo podem atingir tensões de até 72,5 kV, sendo aplicado em linhas de 69 kV. Os isoladores de pino monocorpo e multicorpo podem ser visto respectivamente nas figuras A.4 e A.5.



Figura A.4 - Isolador de pino monocorpo modelo 1114 (conforme [7]).



Figura A.5 - Isolador de pino multicorpo modelo 23105 (conforme [7]).

Algumas características dos isoladores tipo pino monocorpo e multicorpo são apresentadas respectivamente nas tabelas A.4 e A.5.

Tabela A.4 - Características do isolador tipo pino monocorpo modelo 1114 (conforme [7]).

Tensão Nominal (kV)	Carga Eletromecânica de Ruptura (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Altura (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Peso (kg)
15	1000	230	120	100	1,1

Tabela A.5 - Características do isolador tipo pino multicorpo modelo 23105 (conforme [7]).

Tensão Nominal (kV)	Carga Eletromecânica de Ruptura (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Altura (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Peso (kg)
36,2	1360	530	190	268	6,95

O isolador tipo castanha (*strain type*) é um corpo isolador de forma especial, feito em porcelana, projetados para converter o esforço de tração exercido por um condutor ou estai, em esforço de compressão simétrica no corpo do isolador. São utilizados em estais de postes de distribuição ou em ancoragem (fim de linha) de linhas de distribuição. Sua resistência mecânica à tração vai desde 1800 daN até 9000 daN e estão disponíveis nas tensões de 7 kV até 16 kV, nas cores marrom em cinza [7], [12]. Nas figuras A.6, A.7 e A.8 podem ser visto isoladores tipo castanha de modelos diferentes.



Figura A.6 - Isolador tipo castanha modelo 1176 (conforme [7]).



Figura A.7 - Isolador tipo castanha modelo 1197 (conforme [7]).



Figura A.8 - Isolador tipo castanha modelo 1199 (conforme [7]).

Algumas características dos isoladores tipo castanha são apresentadas nas tabelas A.6, A.7 e A.8.

Tabela A.6 - Características do isolador tipo castanha modelo 1176 (conforme [7]).

Ruptura à Tração (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Comprimento de Batente (mm)	Diâmetro Externo (mm)	Diâmetro do Furo (mm)	Peso (kg)
3400	60	90	85	20	0,55

Tabela A.7 - Características do isolador tipo castanha modelo 1197 (conforme [7]).

Ruptura à Tração (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Comprimento de Batente (mm)	Diâmetro Externo (mm)	Diâmetro do Furo (mm)	Peso (kg)
5300	48	108	73	22	0,6

Tabela A.8 - Características do isolador tipo castanha modelo 1199 (conforme [7]).

Ruptura à Tração (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Comprimento de Batente (mm)	Diâmetro Externo (mm)	Diâmetro do Furo (mm)	Peso (kg)
8900	76	171	89	25,4	1,9

O isolador tipo disco é um isolador de cadeia em forma de disco côncavo-convexo [12], com ferragens integrantes em ambas as faces destinadas a ligá-lo flexivelmente a um suporte, ao condutor ou a outros isoladores, podendo formar assim cadeias de vários elementos. As cadeias formadas por esse tipo de isolador são articuladas nos engates que podem ser do tipo concha-bola, garfo-olhal-redondo e garfo-olhal-quadrado. O corpo dos isoladores tipo disco é em porcelana vitrificada ou vidro temperado.

Segundo [7], com a associação dos isoladores têm-se as tensões nominais de 15 kV para dois isoladores associados, 25 kV para três unidades e 35

kV para 4 unidades. A resistência eletromecânica desse tipo de isolador é da ordem de 4500 daN.

O engate do tipo concha-bola é constituído por uma concha, prolongamento da campânula (parte metálica integrante do isolador localizado na parte superior deste), por uma “bola”, que nada mais é que uma cabeça de pino arredondada localizada na parte inferior do isolador e um dispositivo de travamento (grampo) denominado cupilha. Para a associação de isoladores, por exemplo, a parte inferior do isolador, “bola”, é encaixada na concha e são travados pela cupilha. Esse tipo de engate permite movimento relativo de oscilação e de rotação.

O engate do tipo garfo-olhal é constituído por um garfo, que é um prolongamento da campânula (com forma parecida com a de um garfo, como o próprio nome já sugere), por um olhal, que é um pino com uma extensão arredonda ou retangular na ponta e vazada, localizado na parte inferior do isolador, um pino de articulação e a cupilha. Para a associação de isoladores, por exemplo, a parte inferior do isolador, olhal, é encaixada na abertura do garfo do outro isolador e são atravessados pelo pino de articulação e travados pela cupilha. Esse tipo de engate permite movimento relativo apenas de oscilação segundo um plano.

Ainda há os isoladores de disco conhecidos como anti-poluição. Esse isolador tem o seu perfil externo projetado para utilização em áreas poluídas. Sua melhor eficácia em ambientes poluídos se dá pelo aumento da distância de escoamento.

Os isoladores de disco de porcelana com engate concha-bola, garfo-olhal redondo, garfo-olhal quadrado e anti-poluição podem ser visto respectivamente nas figuras A.9, A.10, A.11 e A.12.



Figura A.9 - Isolador tipo disco com engate concha-bola modelo 24305 (conforme [7]).



Figura A.10 - Isolador tipo disco com engate garfo-olhal redondo modelo 24303 (conforme [7]).



Figura A.11 - Isolador tipo disco com engate garfo-olhal quadrado modelo 24306 (conforme [7]).



Figura A.12 - Isolador tipo disco antipoluição com engate concha-bola modelo 28303 (conforme [7]).

Algumas características dos isoladores tipo disco com engate concha-bola, garfo-olhal redondo, garfo-olhal quadrado e isolador antipoluição com engate concha-bola são apresentadas respectivamente nas tabelas A.9, A.10, A.11 e A.12.

Tabela A.9 - Características do isolador tipo disco engate concha-bola modelo 24305 (conforme [7]).

Carga Eletromecânica de Ruptura (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Passo (mm)	Peso (kg)
7000	210	190	146	3,7

Tabela A.10 - Características do isolador tipo disco engate garfo-olhal redondo modelo 24303 (conforme [7]).

Carga Eletromecânica de Ruptura (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Passo (mm)	Peso (kg)
4500	180	160	140	2,4

Tabela A.11 - Características do isolador tipo disco engate garfo-olhal quadrado modelo 24306 (conforme [7]).

Carga Eletromecânica de Ruptura (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Passo (mm)	Peso (kg)
7000	210	190	146	3,7

Tabela A.12 - Características do isolador tipo disco anti-poluição engate concha-bola modelo 28303 (conforme [7]).

Carga Eletromecânica de Ruptura (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Passo (mm)	Peso (kg)
12000	432	254	146	7,8

Em linhas de transmissão são utilizados isoladores de disco de porcelana que é mostrado individualmente na figura A.13. São associados em série formando longas cadeias dependendo do nível de tensão a suportar. Um isolador tipo disco de vidro também usado em linhas de transmissão é mostrado na figura A.14.



Figura A.13 - Isolador tipo disco com engate concha-bola para linha de transmissão modelo 25102 (conforme [7]).



Figura A.14 - Isolador tipo disco de vidro com engate concha-bola modelo E80Z/146 (conforme [7]).

Algumas características dos isoladores tipo disco, para linhas de transmissão são apresentadas nas tabelas A.13 e A.14.

Tabela A.13 - Características do isolador tipo disco engate concha-bola para linha de transmissão modelo 25102 (conforme [7]).

Carga Eletromecânica de Ruptura (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Passo (mm)	Peso (kg)
7000	292	254	146	4,5

Tabela A.14 - Características do isolador tipo disco de vidro engate concha-bola para linha de transmissão modelo E80Z/146 (conforme [7]).

Carga Eletromecânica de Ruptura (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Passo (mm)	Peso (kg)
8000	320	255	146	3,4

Na figura A.15 pode ser vista uma associação de diversos isoladores tipo disco de vidro com engate concha-bola formando uma cadeia.

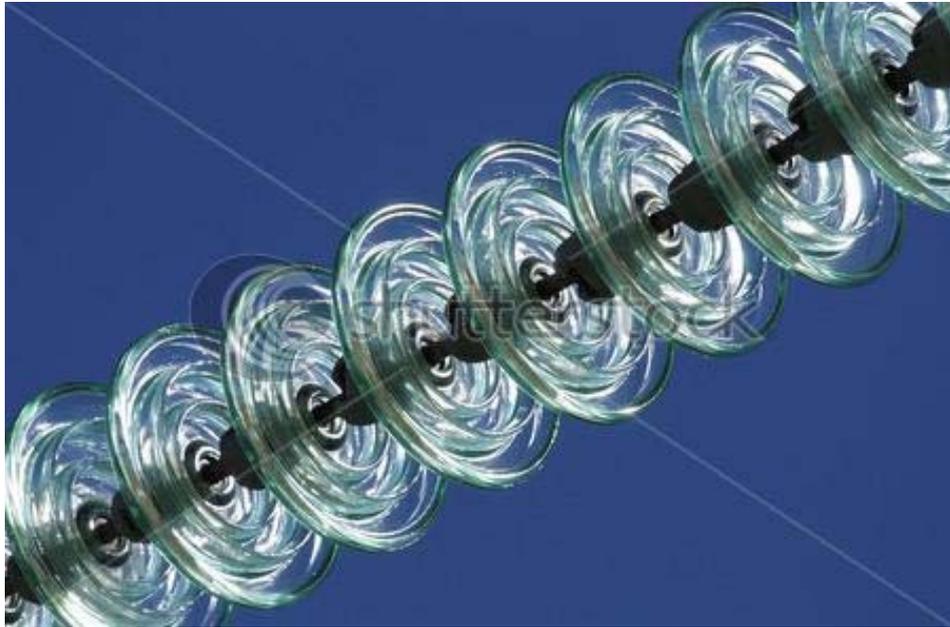


Figura A.15 - Cadeia de isoladores de vidro unidos com engate concha-bola [19].

Os isoladores tipo bastão (*long-rod*) são constituídos de uma única peça de porcelana (também são encontrados em material polimérico) cujo comprimento é de acordo com o nível de isolamento desejado. Para um mesmo nível de isolamento, ele é sempre menor em relação ao das cadeias de isoladores correspondentes, o que pode resultar em considerável redução nas dimensões das estruturas. Possuem engate garfo (campânula) e olhal redondo (pino) semelhante ao dos isoladores de disco. Possuem tensão de radiointerferência reduzida. Isoladores disponíveis nas tensões de 15, 25 e 35 kV. Também podem ser conectados em série para tensões maiores [5], [7].

Nas figuras A.16 e A.17 são mostrados isoladores tipo bastão em porcelana e em material polimérico respectivamente.



Figura A.16 - Isolador tipo bastão em porcelana modelo 41121 (conforma[7]).



Figura A.17 - Isoladores tipo bastão de material polimérico [20].

O primeiro isolador mostrado na figura A.17 é do modelo IPB/NP, conforme catálogo do produto em [20]. É encontrado nas tensões de 15, 24,2 e 36,2 kV. O segundo isolador mostrado na Figura A.17 é do modelo IPB/AP, conforme catálogo do produto em [20]. É encontrado nas tensões de 15, 24,2 e 36,2 kV. O terceiro isolador mostrado na figura A.17 é do modelo IPB/EAP, conforme catálogo do produto em [20]. É encontrado nas tensões de 15, 24,2 e 36,2 kV.

Algumas características do isolador tipo bastão em porcelana são apresentadas na tabela A.15.

Os isoladores tipo bastão em material polimérico possuem as características apresentadas nas tabelas A.16, A.17 e A.18.

Tabela A.15 - Características do isolador tipo bastão em porcelana modelo 41121 (conforme [7]).

Tensão Nominal (kV)	Carga Eletromecânica de Ruptura (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Passo (mm)	Peso (kg)
35	4500	700	120	430	5,8

Tabela A.16 - Características do isolador tipo bastão polimérico modelo IPB 34/NP/8 (conforme [20]).

Tensão Nominal (kV)	Número de Saias	Carga Mecânica Nominal (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Comprimento (mm)	Peso (kg)
36,2	8	5000/7000/8000	810	480	1,5

Tabela A.17 - Características do isolador tipo bastão polimérico modelo IPB 34/AP/9 (conforme [20]).

Tensão Nominal (kV)	Número de Saias	Carga Mecânica Nominal (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Comprimento (mm)	Peso (kg)
36,2	9	5000/7000/8000	920	550	1,9

Tabela A.18 - Características do isolador tipo bastão polimérico modelo IPB 34/EAP/9 (conforme [20]).

Tensão Nominal (kV)	Número de Saias	Carga Mecânica Nominal (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Comprimento (mm)	Peso (kg)
36,2	9	5000/7000/8000	1160	480	2,0

O isolador tipo pilar para linha (*line post*) é um isolador de forma cilíndrica, tendo pequenas saias na superfície externa, apresentando na parte superior entalhe e pescoço e na parte inferior, ferragens para fixação. Estas ferragens constam geralmente de uma base metálica, cimentada na porcelana, e de um pino atarraxado à base metálica. São projetados para serem instalados rigidamente numa estrutura de suporte por meio da base metálica já citada. Dado o seu sistema de fixação, resistem a esforços mecânicos bem mais elevados tanto de compressão como de flexão. Esse tipo de isolador pode ser encontrado em porcelana e em materiais poliméricos também.

Os isoladores tipo pilar para linha em porcelana e polimérico são mostrados respectivamente nas figuras A.18 e A.19.



Figura A.18 - Isolador tipo pilar para linha em porcelana modelo 10622 (conforme [7]).



Figura A.19 - Isolador tipo pilar para linha em material polimérico [20].

Os isoladores mostrados na Figura A.19 são do modelo IPBPL, conforme catálogo do produto em [20]. Da esquerda para a direita na figura A.19, os isoladores possuem tensões nominais de 36,2, 24,2 e 15 kV.

Algumas características do isolador tipo pilar para linha em porcelana e em material polimérico são apresentadas respectivamente nas tabelas A.19 e A.20.

Tabela A.19 - Características do isolador tipo pilar para linha em porcelana modelo 10622 (conforme [7]).

Tensão Nominal (kV)	Ruptura à Flexão (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Peso (kg)
36,2	1000	700	145	9,15

Tabela A.20 - Características do isolador tipo pilar para linha polimérico modelo IPBPL (conforme [20]).

Tensão Nominal (kV)	Número de Saias	Carga Mecânica Nominal (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Comprimento (mm)	Peso (kg)
36,2	8	800/1000	760	350	3,45

O isolador tipo pilar para estação (*station post*) de forma semelhante ao isolador pilar para linha tem forma cilíndrica com pequenas saias na superfície externa, com a diferença que possui peças metálicas nas duas extremidades para fixação. Dado o seu sistema de fixação, resistem a esforços mecânicos bem mais elevados tanto de compressão como de flexão. Esse tipo de isolador pode ser encontrado em porcelana.

Os isoladores tipo pilar para estação podem ser visualizados nas figuras A.20 e A.21. Os isoladores mostrados na figura A.20 têm suas características apresentadas no catálogo do produto em [21], para tensões nominais de até 69 kV. O isolador mostrado na figura A.21 têm suas características apresentadas no catálogo do produto em [21].



Figura A.20 - Isolador tipo pilar para estação [21].



Figura A.21 - Isolador tipo pilar para estação usado em linhas de 69 kV [22].

Algumas características do isolador tipo pilar para estação em porcelana são apresentadas nas tabelas A.21 e A.22.

Tabela A.21 - Características do isolador tipo pilar para estação em porcelana modelo 4062 (conforme [21]).

Resistência Mecânica a Tensão (daN)	Resistência Mecânica a Compressão (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Comprimento (mm)	Peso (kg)
3800	4450	394	254	7,0

Tabela A.22 - Características do isolador tipo pilar para estação em porcelana modelo 4091 (conforme [21]).

Tensão Nominal (kV)	Resistência Mecânica a Tensão (daN)	Resistência Mecânica a Compressão (daN)	Distância de Escoamento (mm)	Comprimento (mm)	Peso (kg)
69	7100	11100	1828	762	29,0

Os isoladores tipo suporte (*post type*) de porcelana apresentam núcleo maciço. Estão disponíveis nas tensões de 1,2 kV a 36,2 kV. Sua resistência à flexão vão desde 375 daN até 910 daN. São muito usados em cubículos e subestações, nas tensões mencionadas.

O isolador tipo suporte pode ser visualizado na figura A.22.



Figura A.22 - Isolador tipo suporte modelo 1157 (conforme [7]).

Algumas características do isolador tipo suporte são apresentadas na tabela A.23.

Tabela A.23 - Características do isolador tipo suporte em porcelana modelo 1157 (conforme [7]).

Tensão Nominal (kV)	Distância de Escoamento (mm)	Altura Total (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Peso (kg)
24,2	410	190	128	3,5

O isolador tipo pedestal (*cap-and-pin*) possui semelhanças com isoladores do tipo pino multicorpo, no que se refere às grandes saias na superfície externa. É dotado de campânula com furos rosqueados na extremidade superior, e um pedestal com furos lisos correspondentes na extremidade inferior. Destina-se a fixar rigidamente um condutor ou outro equipamento elétrico a um suporte, em instalações externas. Pode ser usado de forma unitária ou em associação com outras unidades. São usados para isolação de barramento em subestações de 15 kV até 500 kV. Nas tensões mais altas utilizam-se unidades empilhadas. Sua

resistência mecânica à flexão individual vai de 900 daN até 1500 daN. Seu corpo é em porcelana.

A visualização de isoladores tipo pedestal pode ser feita a partir das figuras A.23 e A.24.



Figura A.23 - Isolador tipo pedestal modelo 23451 (conforme [7]).



Figura A.24 - Isolador tipo pedestal modelo 23470 (conforme [7]).

Algumas características dos isoladores tipo pedestal são apresentadas nas tabelas A.24 e A.25.

Tabela A.24 - Características do isolador tipo pedestal em porcelana modelo 23451 (conforme [7]).

Distância de Escoamento (mm)	Altura (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Peso (kg)
915	508	435	51,0

Tabela A.25 - Características do isolador tipo pedestal em porcelana modelo 23470 (conforme [7]).

Distância de Escoamento (mm)	Altura (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Peso (kg)
840	368	460	49,0

O isolador tipo bucha é um isolador oco que permite a passagem de um condutor através de seu centro conectando equipamentos e isolando esse condutor de partes metálicas. Os isoladores tipo bucha possuem diversas aplicações das quais se destaca buchas para transformadores, buchas de entrada para cabines e cubículos de medição e manobra, disjuntores e seccionadores. São disponíveis em tensões de 1,3 kV até 36,2 kV [7].

Um isolador tipo bucha usado em transformadores pode ser visualizado na figura A.25.



Figura A.25 - Isolador tipo bucha para transformadores modelo 1027-T1 (conforme [7]).

Algumas características do isolador tipo bucha para transformadores são apresentadas na tabela A.26.

Tabela A.26 - Características do isolador tipo bucha para transformadores modelo 1027-T1 (conforme [7]).

Tensão Nominal (kV)	Distância de Escoamento (mm)	Altura Total (mm)	Diâmetro Máximo (mm)	Peso (kg)
15	280	278	99	2,3

Quanto à posição em que ocupam na rede elétrica as cadeias de isoladores podem ser divididas em duas configurações de forma geral. Em cadeias de sustentação (ficam na posição vertical) e cadeias de ancoragem ou amarração (ficam na horizontal).

As cadeias de isoladores em suspensão são as mais comuns, devido às estruturas em que elas são instaladas serem as mais simples e as mais econômicas. Sua finalidade principal é simplesmente apoiar os cabos condutores, além de isolá-los da estrutura. As cadeias de suspensão têm como característica comum o fato de que os condutores nelas têm continuidade, não sendo seccionados mecanicamente.

As cadeias de suspensão são usadas em linhas de transmissão e subtransmissão. Elas ficam na posição vertical como já foi dito. Os principais isoladores usados nessa configuração são os isoladores tipo disco e tipo bastão. As cadeias de suspensão têm usualmente três tipos de fixação. Suspensão simples, suspensão dupla e suspensão em “V”. Esses três tipos podem ser visualizados respectivamente nas figuras A.26, A.27 e A.28.

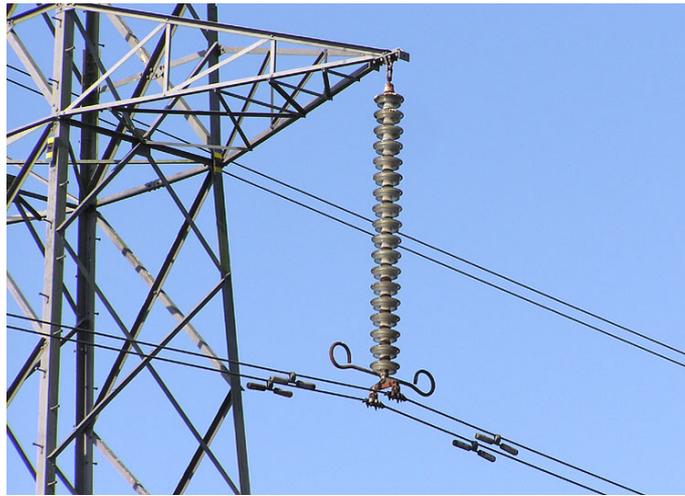


Figura A.26 - Cadeia de isoladores em suspensão simples [23].

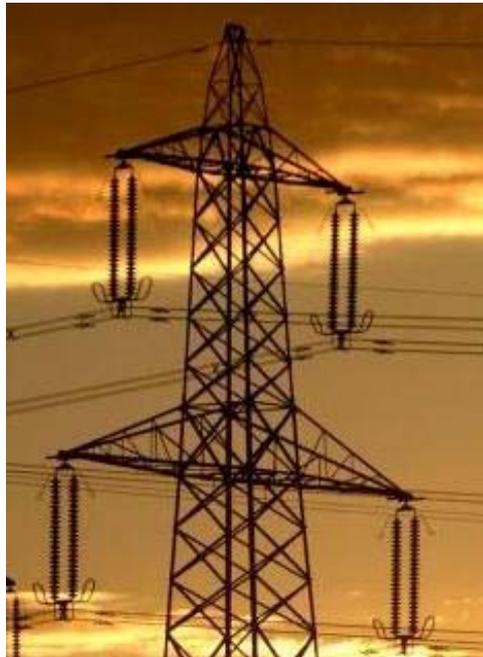


Figura A.27 - Cadeias de isoladores em suspensão dupla [24].



Figura A.28 - Cadeias de isoladores em suspensão em "V" [25].

Como já foi mencionado, os isoladores tipo disco são bastante utilizados na configuração de suspensão. Esses isoladores são usados em associação. Para o cálculo do número de isoladores usado na configuração de suspensão divide-se o valor da tensão nominal da linha por 15 e soma-se 1 ao resultado. Por exemplo, para uma linha de 69 kV deve-se utilizar 5 isoladores associados, para uma linha de 138 kV utiliza-se 10 isoladores.

As cadeias de ancoragem ou amarração ficam na posição horizontal. Suportam, além dos esforços que devem suportar as cadeias de suspensão, também os esforços devidos ao tracionamento dos cabos [5]. Ao contrário das cadeias de suspensão, as cadeias de ancoragem seccionam mecanicamente as linhas, servindo de ponto de reforço e abertura eventual em acontecimentos específicos. Essa configuração é muito usada em linhas de distribuição primária e também são usadas em linhas de transmissão. Os isoladores usados nessa configuração são principalmente os do tipo disco. As cadeias de ancoragem podem ser divididas em dois principais tipos de fixação. Amarração simples e amarração dupla. Esses dois tipos podem ser visualizados respectivamente nas figuras A.29 e A.30.



Figura A.29 - Cadeias de isoladores tipo disco de vidro em linha de distribuição primária em amarração simples (foto do autor).

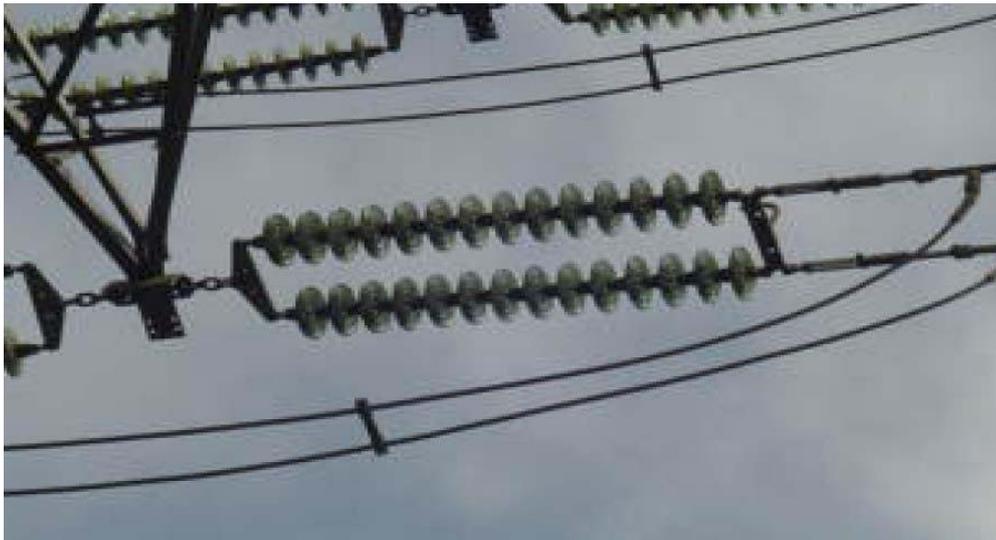


Figura A.30 - Cadeias de isoladores tipo disco de vidro em amarração dupla [26].

Assim como na configuração de suspensão, também são utilizados isoladores tipo disco para a configuração de ancoragem. Para o cálculo do número de isoladores usado na configuração de ancoragem divide-se o valor da tensão nominal da linha por 15 e soma-se 2 ao resultado. Por exemplo, para uma linha de 69 kV deve-se utilizar 6 isoladores associados.

APÊNDICE B

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O presente apêndice visa apresentar de forma breve a utilização de uma ferramenta computacional, o software CFD (*Computacional Fluid Dynamics*), na análise do comportamento do fluido utilizado na limpeza a seco, em uma determinada superfície, que é a superfície de um isolador.

O principal motivo da utilização dessa ferramenta na pesquisa foi com o intuito de definir alguns parâmetros para os primeiros testes, tais como pressão de trabalho, distância, ângulo de ataque e diâmetro para o bico de limpeza e observação do comportamento do ar sobre a superfície do isolador. Isso devido à característica inovadora do trabalho que não possui referências diretas que pudessem ser usadas como ponto de partida.

Foi usado um modelo computacional tridimensional do sistema bico de limpeza- isolador. O sistema usou o CFD, pacote de programas da ANSYS para uma solução computacional envolvendo dinâmica dos fluidos, sendo usado o método dos volumes finitos. Há dois modos de solução: o de regime permanente ou estacionário e o de regime transiente. A de regime estacionário é mais rápida, porém não possui fidelidade com a realidade até o momento em que converge. A solução por regime transiente é bastante demorada, porém possui fidelidade de tempo na resolução. Analisando-se a solução no regime transiente verificou-se que levaria em torno de 10^9 vezes mais tempo para convergir com o hardware que se tinha disponível. A solução adotada foi a de regime estacionário.

Pela análise das simulações que convergiram, verificou-se que as simulações para as pressões menores demoraram em torno de 24 horas e para as pressões maiores demoraram em torno de 96 horas para estabilizar. As simulações foram realizadas no LAMOTRIZ – DEE. As especificações do computador utilizado são: Processador Intel Core2Duo E4300, 2,2 GHz; Placa mãe Intel *Essential Series*; Dois pentes de memória Kingston 1 Gb cada e 667 MHz.

As simulações foram feitas com bicos de 0,5, 1,0, 2,0 e 3,0 mm de diâmetro. O ângulo de ataque usado foi 30° e uma distância de 6 cm do bico a um

ponto da superfície do isolador. O perfil de isolador utilizado foi de um isolador tipo disco. A técnica de limpeza foi simulada para pressões de 2, 5, 10, 20, 30, 40 e 50 bars e assim obtido o perfil da força de arraste.

Nas figuras B.1, B.2 e B.3 são mostradas, respectivamente, as simulações feitas para um bico de 2 mm de diâmetro e com pressões de 30, 40 e 50 bars.

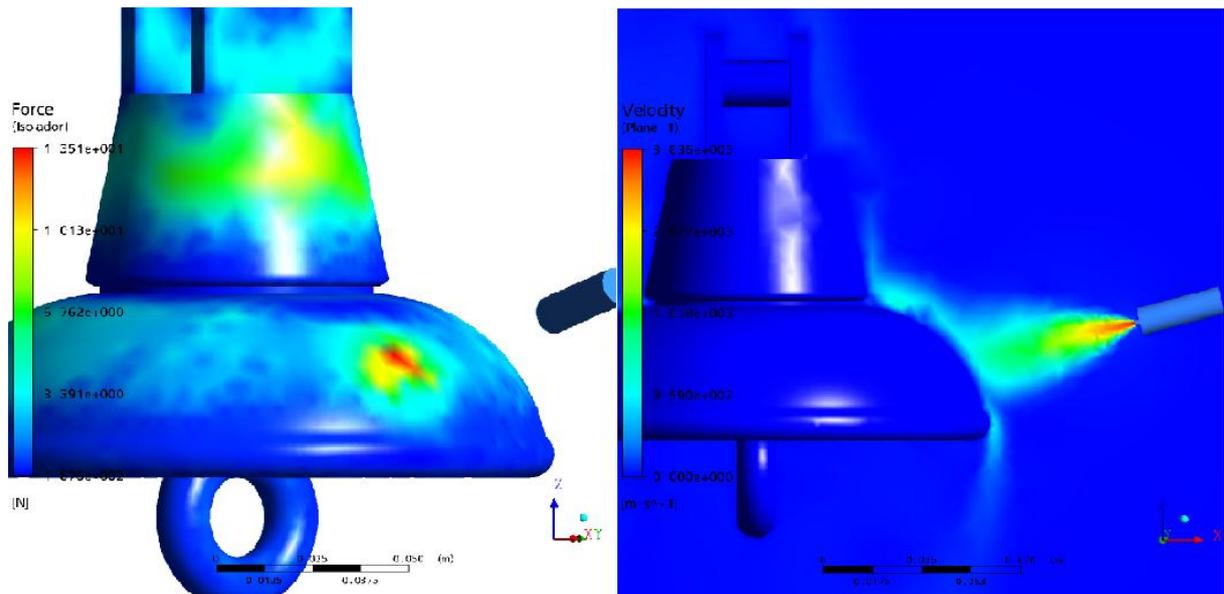


Figura B.1 - Simulação com bico de 2 mm de diâmetro e 30 bars de pressão.

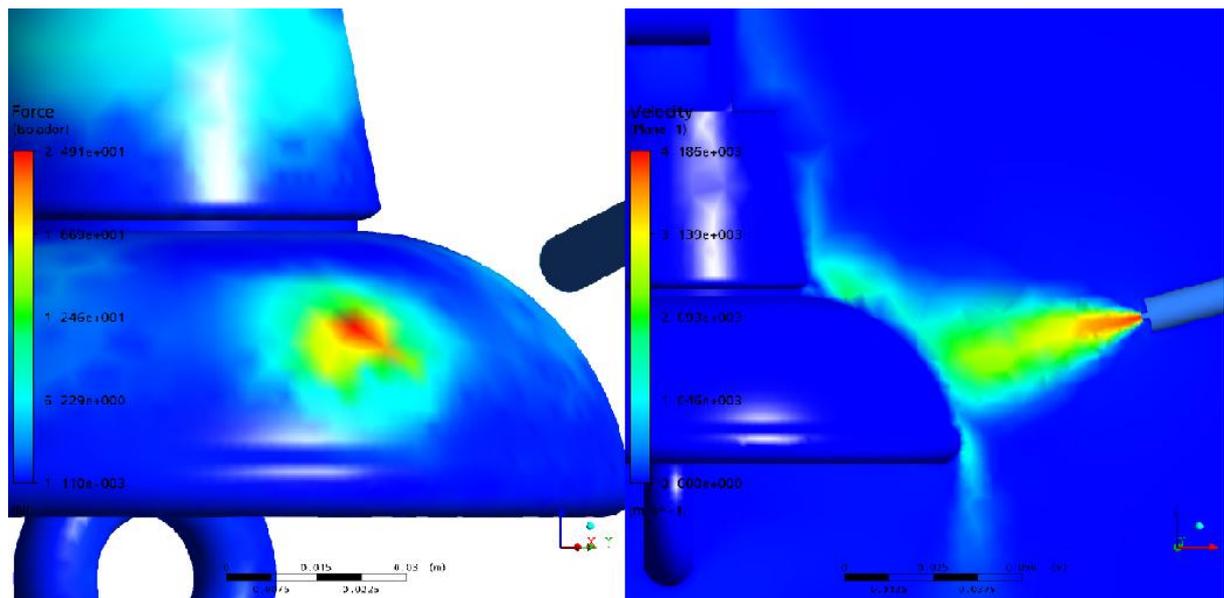


Figura B.2 - Simulação com bico de 2 mm de diâmetro e 40 bars de pressão.

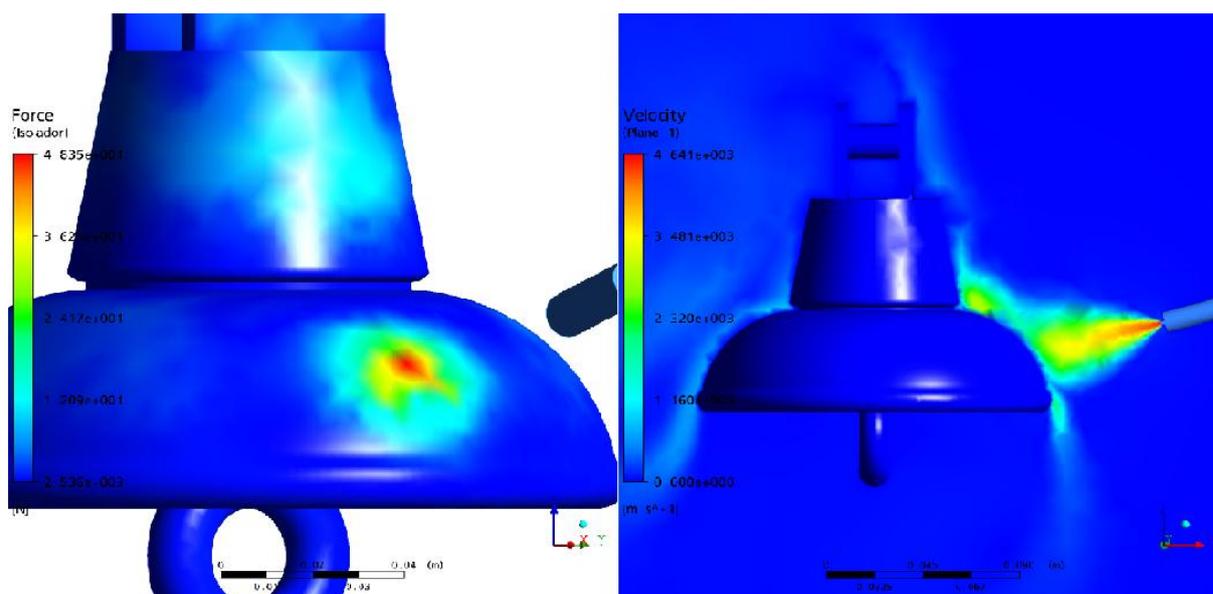


Figura B.3 - Simulação com bico de 2 mm de diâmetro e 50 bars de pressão.

A pressão de 30 bars foi usada como ponto de partida nos testes de nitrogênio. As simulações computacionais aqui apresentadas não foram utilizadas na seqüência do trabalho devido principalmente à grande complexidade de implementação, ao alto tempo de processamento e às limitações impostas pela ferramenta no sentido de variação dos parâmetros analisados como pressão, vazão, distância do bico à superfície do isolador e diâmetro do bico.

APÊNDICE C

BICOS DE LIMPEZA

O presente apêndice visa mostrar alguns bicos testados no processo de limpeza das cadeias de isoladores em laboratório, cujos testes foram abordados no capítulo 3.

Na figura C.1 são mostrados os diversos bicos testados no processo de limpeza a seco. A maioria dos bicos foram feitos em aço, mas alguns foram feitos em Technyl (o bico de cor branca na figura C.1), uma espécie de polímero. Os bicos foram construídos com diversos comprimentos, diversos diâmetros e variados perfis de furo. Alguns tinham a seção cilíndrica, ou seja, o diâmetro do furo ao longo da peça é igual e alguns bicos tinham a seção cônica.



Figura C.1 - Bicos testados no processo de limpeza a seco (foto do autor).

Nas figuras C.2, C.3 e C.4 são mostradas as seções cônicas de alguns bicos.

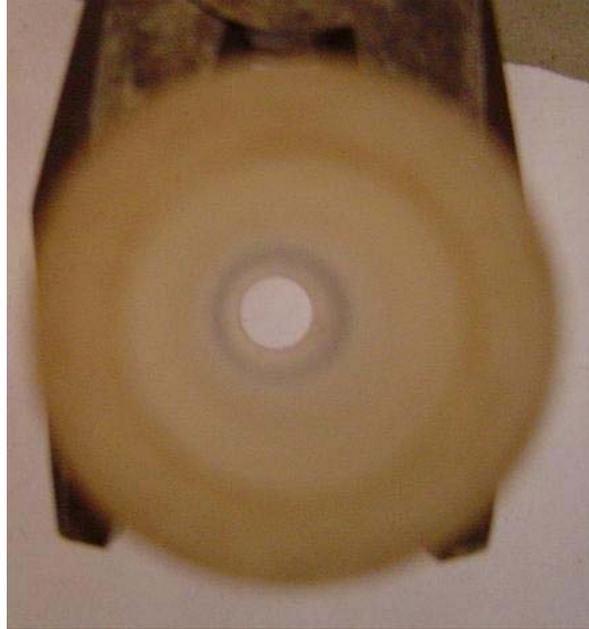


Figura C.2 - Seção cônica do bico de Technyl (foto do autor).



Figura C.3 - Seção cônica de um bico de aço (foto do autor).



Figura C.4 - Seção cônica de um bico de aço (foto do autor).

Esses bicos apresentados nesse apêndice foram utilizados em diversos testes de limpeza e concluiu-se que o bico que apresentou os melhores resultados é o mostrado na figura C.5, e que já foi visto no capítulo 3.



Figura C.5 - Bico utilizado na limpeza (foto do autor).