

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA/ELETROTÉCNICA

GLAUCIO ANTONIO WEIGERT
IAGO WILLIAN DOS SANTOS
NARDEL CORREA PEIXOTO

**ESTUDO DE CASO – ANÁLISE DE MEDIDAS MITIGADORAS PARA
CASOS DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM DUTOS
METÁLICOS NA DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

GLAUCIO ANTONIO WEIGERT
IAGO WILLIAN DOS SANTOS
NARDEL CORREA PEIXOTO

**ESTUDO DE CASO – ANÁLISE DE MEDIDAS MITIGADORAS PARA
CASOS DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM DUTOS
METÁLICOS NA DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Curitiba, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: **Prof. MSc. Annemarlen Gehrke Castagna.**

CURITIBA

2015

DEDICATÓRIA

A Deus todo poderoso e as nossas famílias.

GLAUCIO ANTONIO WEIGERT
IAGO WILLIAN DOS SANTOS
NARDEL CORREA PEIXOTO

ESTUDO DE CASO – ANÁLISE DE MEDIDAS MITIGADORAS PARA CASOS DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM DUTOS METÁLICOS NA DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 19 de novembro de 2015.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemahlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Annemahlen Gehrke Castagna, Msc.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Andrea Lucia Costa, Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Eloy Rufato Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Saul Renato da Silva, Msc.
COMPAGAS

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do Curso de Engenharia Elétrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar a eterna gratidão:

A DEUS, pela nossa saúde física e mental, pelo dom da minha vida, pelas maravilhas realizadas em nossa existência, pelas oportunidades, pela crença, esperança e fé num amanhã melhor, onde predominem valores, justiça moral e ética.

À UTFPR, por me proporcionar condições de estudos durante esses anos de graduação.

Ao DAELT, o meu agradecimento aos professores que me auxiliaram em sala de aula, nas pesquisas e nos trabalhos.

Ao Espírito Santo e Nossa Senhora por todo minuto estarem do nosso lado guiando-nos pelo melhor caminho.

A Orientadora, professora Annemarlen Gehrke Castagna, pelas informações e orientações concedidas quando solicitadas.

Eu Glaucio:

Agradeço aos meus pais, Arnei e Belenice, fundamentais na minha vida acadêmica. Minha mãe, pela paciência e sabedoria em me ensinar minhas primeiras letras e meu pai, meu principal incentivador nos estudos, e por sempre acreditar em mim. Meus irmãos, Marcio e Kellen, no convívio deles pude aprender muitas coisas a principal, a ser uma família. Agradeço também a minha amada esposa, Ana Paula, e aos pequenos Vinícius e Thiago, meus filhos queridos, pela compreensão durante o tempo de ausência para conclusão deste trabalho.

À COMPAGAS, que apoiou o estudo e contribuiu com as matérias-primas para a realização desta monografia, ao meu gerente Eduardo Andreis que acreditou nestes estudos e me proporcionou condições para concluí-lo.

Aos Engenheiro Saul Renato da Silva que revisou o trabalho e acrescentou pontos importantes.

Aos meus colegas de trabalho, que contribuíram com a experiência e observação, principalmente na análise do estudo de caso.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, a minha mais profunda gratidão.

Eu Iago:

Primeiro agradeço minha família, a base que sempre apoia e dá força, formada por meus pais José e Marizete, e meus tios João e Karen que foram essenciais para essa conquista.

A minha namorada Natali, por entender as ausências e o stress devido as demandas do curso.

A todos meus colegas de curso que fizeram com que esses anos de muito estudo e dedicação tivessem ótimos momentos de descontração e animação que serão lembrados toda a vida.

Eu Nardel:

Agradeço minha esposa Marta e meu filho o Eng. Ariel formado nesta instituição na qual tive orgulho e o prazer em ser colega de classe em algumas matérias, aos meus pais Aldo e Elsa, pela compreensão nos momentos de ausência e pelo incentivo nos momentos de dificuldades, os quais não foram poucos. Ao Senhor que nos guia e nos acompanha pela vida com sua luz e plenitude. Aos amigos e colegas de profissão que contribuíram de forma direta e indireta. E por fim aos Mestres, administradores e demais funcionários dessa Instituição que são um exemplo a seguir na dedicação e zelo na conduta na transmissão do conhecimento com ética no ensino e na qualidade de vida.

EPÍGRAFE

“Quando nada parecer dar certo, vou ver o cortador de pedras martelando sua rocha talvez 100 vezes, sem que uma única rachadura apareça. Mas na centésima primeira martelada a pedra se abre em duas e eu sei que não foi aquela que conseguiu isso, mas todas que vieram antes. Eu acredito demais na sorte. E tenho constatado que, quanto mais duro eu trabalho, mais sorte eu tenho. ”

Coleman Cox

RESUMO

WEIGERT, Glaucio Antonio. SANTOS, Iago Willian. PEIXOTO, Nardel Correa. ESTUDO DE CASO – ANÁLISE DE MEDIDAS MITIGADORAS PARA CASOS DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM DUTOS METÁLICOS NA DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL. 2015. 117 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Industrial Elétrica – ênfase em Eletrotécnica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Grandes extensões de dutos metálicos, como gasodutos de distribuição, nas proximidades de linhas de transmissão de alta tensão sofrem indução eletromagnética pelas interações dos campos eletromagnéticos das linhas carregadas. Verifica-se que as tensões e correntes induzidas nos gasodutos e respectivos afloramentos podem causar problemas para segurança humana e integridade de equipamentos. Através de um estudo de caso foram analisados estudos de interferência eletromagnéticas em um caso real, sendo que através do mesmo, juntamente com pesquisas de normativas internacionais e práticas consagradas foi realizada a classificação de medidas mitigadoras e análises técnica de sua implantação.

Palavras-chave: Interferências eletromagnéticas, dutos e linhas de transmissão, gasodutos de distribuição, medidas mitigadoras.

ABSTRACT

WEIGERT, Glaucio Antonio. SANTOS, Iago Willian. PEIXOTO, Nardel Correa. CASE STUDY - ANALYSIS OF MEASURES TO MITIGATING INTERFERENCE ELECTROMAGNETIC CASES IN PIPELINE METAL IN THE DISTRIBUTION OF NATURAL GAS. 2015. 117 f. Completion of course work (Electrical Industrial Engineering - emphasis on Electrotechnology). Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2015.

Large areas of metal products, such as distribution pipelines in the vicinity of high-voltage transmission lines suffer electromagnetic induction by the interactions of electromagnetic fields of the charged lines. It is noted that the voltages and currents induced in the pipeline and their outcrops can cause problems for human safety and equipment integrity. Through a case study electromagnetic interference studies were analyzed on a real case, and through it, along with surveys of international standards and practices enshrined the sort of mitigation measures and technical analysis of its implementation was carried out.

Keywords: electromagnetic interference, pipelines and transmission lines, distribution pipelines, mitigating measures.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – EFEITOS E CONSEQUÊNCIAS DO CHOQUE ELÉTRICO.....	52
TABELA 2 - RESISTIVIDADE TÍPICA DOS MATERIAIS.....	53
TABELA 3 - RESISTIVIDADE TÍPICA DOS MATERIAIS.....	53
TABELA 4 - FATOR DE DISTÂNCIA DE SEGURANÇA.....	54
TABELA 5 - DISTÂNCIAS DE SEGURANÇA EM FUNÇÃO DA TENSÃO DA LT. ...	55
TABELA 6- APRESENTAÇÃO DOS DADOS DE SIMULAÇÕES.	60
TABELA 7 – TABELA COM IDENTIFICAÇÃO DOS AFLORAMENTOS DO RAMAL FAZENDA RIO GRANDE	80
TABELA 8 – PARÂMETROS TÉCNICOS DO DUTO PARA SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	82
TABELA 9 – TENSÕES NOS AFLORAMENTOS DO DUTO DA COMPAGAS CONSIDERANDO O SEP EM REGIME PERMANENTE.....	83
TABELA 10 - TENSÕES NOS AFLORAMENTOS DO DUTO DA COMPAGAS CONSIDERANDO O SEP EM REGIME TRANSITÓRIO.	84
TABELA 11 – TENSÕES ADMISSÍVEIS NOS AFLORAMENTOS	85
TABELA 12 – FATORES DE SEGURANÇA	97

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CORROSÃO DO DUTO POR CORRENTE ALTERNADA.	21
FIGURA 2 - RISCO DE CHOQUES ELÉTRICOS NA OPERAÇÃO DOS DUTOS....	22
FIGURA 3 - CONTRIBUIÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO DE UM CIRCUITO TRIFÁSICO NO POTENCIAL DE UM DUTO METÁLICO.....	24
FIGURA 4 - INDUÇÃO MAGNÉTICA EM UM DUTO METÁLICO.....	25
FIGURA 5 - EXEMPLO DA ZONA DE INFLUÊNCIA DA LINHA DE TRANSMISSÃO NO DUTO. FONTE: ADAPTADO DE GRCEV, 2000, P. 109.	27
FIGURA 6 - UNIDADE DE LOCAÇÃO DE CLASSE.	29
FIGURA 7 - CAUSAS DE INCIDENTES COM GASODUTOS.	31
FIGURA 8 - MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO.	33
FIGURA 9 - PRINCIPAIS ELEMENTOS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO	36
FIGURA 10 - CIRCUITO SIMPLES VERTICAL E CIRCUITO DUPLO VERTICAL. ...	37
FIGURA 11 - CIRCUITO SIMPLES TRIANGULAR E CIRCUITO DUPLO TRIANGULAR.	38
FIGURA 12 - FAIXA DE SERVIDÃO.....	39
FIGURA 13 - COMPRIMENTO DA ZONA DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA.....	49
FIGURA 14 - ILUSTRAÇÃO DA TENSÃO DE TOQUE.	51
FIGURA 15 - ILUSTRAÇÃO DA TENSÃO DE PASSO.....	52
FIGURA 16 - CRUZAMENTO DE LT'S E GASODUTOS.....	56
FIGURA 17 - CÁLCULO DE CURTO CIRCUITO.....	57
FIGURA 18 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE TENSÕES E CORRENTES.	58
FIGURA 19 - CÁLCULO DA TENSÃO DE TOQUE ADMISSÍVEL.	59
FIGURA 20 - CÁLCULO DA TENSÃO DE PASSO ADMISSÍVEL.	59
FIGURA 21 - COLOCAÇÃO DE ATERRAMENTO NO GASODUTO.....	62
FIGURA 22 - INSERÇÃO DE PLATAFORMAS ISOLANTES.	63
FIGURA 23 - COLOCAÇÃO DE MALHA DE ATERRAMENTO NOS AFLORAMENTOS.	64
FIGURA 24 - INSERÇÃO DE PCR'S NO DUTO PARA DRENAGEM DO AC.....	65
FIGURA 25 - RDGN GASODUTO BRASIL-BOLÍVIA TBG	74

FIGURA 26 - RDGN NO PARANÁ.....	74
FIGURA 27 - DETALHE DO TRAÇADO DO RAMAL FAZENDA RIO GRANDE	76
FIGURA 28 - DETALHE DA ERP.....	77
FIGURA 29 - DETALHE DE UMA EMRP	78
FIGURA 30 - DETALHES DO PONTO DE TESTE (PT)	79
FIGURA 31 - DETALHE DE UMA VÁLVULA DE BLOQUEIO.....	80
FIGURA 32 - DETALHE DAS APROXIMAÇÕES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO COM O DUTO DA COMPAGAS.	81
FIGURA 33 – ELEVAÇÃO DE POTENCIAL EM UM DOS AFLORAMENTOS PERTO DA SUBESTAÇÃO.....	82
FIGURA 34 - ELEVAÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO DO DUTO PARALELO A SUBESTAÇÃO.....	83
FIGURA 35 - DETALHE DA EQUIPOTENCIALIZAÇÃO DA ERP – CORTE	87
FIGURA 36 - PLANTA BAIXA DO SISTEMA DE ATERRAMENTO EM ERP	87
FIGURA 37 - DETALHE DO ISOLAMENTO ELÉTRICO DO PT.....	88
FIGURA 38 - DETALHE DO ISOLAMENTO ELÉTRICO NA VÁLVULA DE BLOQUEIO	89
FIGURA 39 - DETALHE DA INSTALAÇÃO DO DESACOPLADOR NO AFLORAMENTO.....	90
FIGURA 40 - IMPLANTAÇÃO DA MALHA DE ATERRAMENTO NA ERP DA SUMITOMO	92
FIGURA 41 - INSTALAÇÃO DO SUPRESSOR DE SURTOS A JUSANTE E MONTANTE DA ERP.....	92
FIGURA 42 - IMPLANTAÇÃO DO PISO ISOLANTE NO PONTO DE TESTE	93
FIGURA 43 - IMPLANTAÇÃO DO PISO ISOLANTE NAS VÁLVULAS DE BLOQUEIO	93
FIGURA 44 - IMPLANTAÇÃO DA MALHA DE ATERRAMENTO NA CMI.....	94
FIGURA 45 - INSTALAÇÃO DO DESACOPLADOR NA CMI DA OLAPA	94
FIGURA 46 - PROJETO DE PISO ISOLANTE EM PONTO DE TESTE	101
FIGURA 47 - EXEMPLO DE INSERÇÃO DE PLATAFORMA ISOLANTE EM VÁLVULA DE BLOQUEIO SUBTERRÂNEA.....	102
FIGURA 48 - IMPLANTAÇÃO DE PROTETOR DE SURTOS NAS ESTAÇÕES....	103

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ATP	<i>Alternative Transient Power</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CDLs	Companhia Distribuidora Local
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CPFL	Companhia Paulista Força e Luz
CMI	Caixa de medição e interligação
EMRP	Estação de Medição e Redução de Pressão
ERP	Estação de Redução de Pressão
Fem	Força eletromotriz
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia Estatística
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGEM	<i>Institution of Gas Engineers and Managers</i>
Km	Quilômetros
KV	Quilo volt
LT	Linhas de Transmissão
MME	Ministério de Minas e Energia
MS	Mato Grosso do Sul
NACE	<i>National Association of Corrosion Engineers</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OLAPA	Oleoduto Araucária para Paranaguá
ONS	Operador Nacional do Sistema
PIB	Produto Interno Bruto
PT	Ponto de Teste

RDGN	Rede de Distribuição de Gás Natural
RS	Rio Grande do Sul
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SP	São Paulo
TBG	Transportador Brasileira de Gás
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TGB	Transportadora Brasileira de Gás
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
V	Volts

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Registro de tensão AC e DC no afloramento CMI – OLAPA.....	96
GRÁFICO 2 – Registro de tensões AC e DC na CMI – duto da COMPAGAS.....	96

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	TEMA	14
1.1.1.	Delimitação do Tema	15
1.2.	PROBLEMAS E PREMISSAS	16
1.3.	OBJETIVOS	17
1.3.1.	Objetivo Geral	17
1.3.2.	Objetivos Específicos	17
1.4.	JUSTIFICATIVA	18
1.5.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	18
2.	FUNDAMENTOS SOBRE LINHAS DE TRANSMISSÃO E GASODUTOS	20
2.1	EFEITO CAPACITIVO	22
2.2	EFEITO CONDUTIVO	24
2.3	EFEITO INDUTIVO	25
2.4	GASODUTOS	27
2.4.1	Gasodutos no Transporte de Gás Natural	28
2.4.2	Reparos em Oleodutos e Gasodutos	30
2.4.3	Proteção Anticorrosiva e Resistividade do Solo	32
2.5	LINHAS DE TRANSMISSÃO	34
2.5.1	Níveis Típicos De Tensão	35
2.5.2	Linhas de Transmissão Aéreas	35
2.5.3	Configurações Geométricas das Linhas Aéreas	37
2.5.4	Faixa de Servidão	38
2.6	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	40
3.	ESTUDOS DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA	41
3.1	ESCOPO DOS ESTUDOS DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA	41

3.2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA PARA ESTUDOS DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA.....	43
3.2.1	Definições de termos para estudo de interferência eletromagnética:	43
3.2.3	Metodologia para elaboração do estudo.....	45
3.2.3.1	Levantamento de dados de campo.....	45
3.2.3.2	Desenvolvimento do estudo	45
3.2.3.3	Critérios de segurança.....	48
3.3	ANÁLISE DAS TENSÕES NOS AFLORAMENTOS.....	49
3.3.1	Limites de Tensões de Toque e Passo de Curta Duração	49
3.3.2	Corrente de Choque de Longa Duração.....	52
3.4	IMPLANTAÇÃO DE MEDIDAS MITIGADORAS.....	55
3.4.1	Apresentação - Resultados dos Estudos de Interferência Eletromagnética .	55
3.5	APRESENTAÇÃO DAS MEDIDAS MITIGADORAS.....	61
3.5.1	Aterramento Localizado.....	61
3.5.2	Plataforma Isolante.....	62
3.5.3	Malha de Aterramento	63
3.5.4	Instalação de Desacopladores	64
4.	METODOLOGIA.....	67
4.2	JUSTIFICATIVA DA METODOLOGIA DE ESTUDO DE CASO	69
4.3	A CONDUÇÃO DO ESTUDO DE CASO	70
4.3.1	Documentação	70
4.3.2	Dados Arquivados	71
4.3.3	Entrevistas.....	71
4.3.4	Observação Direta.....	71
4.4	LIMITAÇÕES	72
5.	ANÁLISE DE RESULTADOS	73
5.1	Contexto do gasoduto de distribuição.....	73
5.2	ESTUDO INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA ESTUDO DE CASO ...	81

5.3	PROJETO DAS MEDIDAS MITIGADORAS	84
5.4	ESTUDO DE CASO.....	90
5.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE MEDIDAS MITIGADORAS	96
5.5.1	Considerações sobre projetos	96
5.5.2	Considerações sobre Estudo de Interferência Eletromagnéticas	98
5.5.3	Considerações sobre medidas mitigadoras.....	99
5.5.3.1	Pontos de Teste.....	100
5.5.3.2	Válvulas de bloqueio do tipo “ <i>top entry</i> ”.....	101
5.5.3.3	Válvulas de bloqueio subterrâneas.....	101
5.5.3.4	Estações Aéreas.....	103
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	105
6.1	Sugestão para trabalhos futuros	105
	REFERÊNCIAS	106

1. INTRODUÇÃO

1.1. TEMA

O acentuado desenvolvimento econômico registrado no Brasil nos últimos 20 anos (1995-2015), somado ao crescimento populacional, vem promovendo uma elevação ainda maior da demanda e consumo de energia elétrica. Observa-se uma evolução econômica da ordem de 48% no período de 2002 a 2012, conforme divulgação do Banco Central do Brasil, 2012 e IBGE (2013). No mesmo período observa-se ainda um crescimento populacional de 29%. As elevações desses dois índices forçam o aumento do consumo de energia elétrica, o qual vem apresentando elevação da ordem de 89% nos últimos dez anos, conforme índices de carga informados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, 2013) no mesmo período.

O cenário atual de recessão econômica e crise energética força o gestor público a expandir a infraestrutura para permitir a continuidade do processo de crescimento econômico na nação. Apesar dos baixos índices de investimentos neste setor nos últimos anos, estimativas indicam que estes investimentos devem ter elevação considerável. Segundo Lima (2010), esse crescimento é liderado por ampliações do setor de infraestrutura energética com a construção de usinas hidrelétricas como as de Santo Antônio, Jirau e Belo Monte.

Após a crise energética de 2001, uma das políticas de expansão do setor energético nacional tem sido a de implementação de unidades geradoras de base térmicas, pois possuem menor custo e prazo para implementação (MME, 2012). Com essa política verifica-se que a matriz de geração elétrica do Brasil vem se tornando mais dependente de usinas térmicas a cada ano. Por meio do MME que a capacidade instalada de geração de energia a partir de usinas térmicas mais, dobrou na última década.

A TBG (Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil S.A) é proprietária da malha de gasodutos de transporte em solo brasileiro. A malha brasileira conta com 2.593 km de gasodutos, que se estende de Corumbá (MS) até Canoas (RS). Em Paulínia (SP) existe um segundo trecho que vai até Guararema, onde há a interligação com os gasodutos do sistema Petrobrás. Ao longo desta malha de

gasodutos, existem 34 estações de entrega, distribuídas nos estados do território nacional, nas quais o gás é entregue às CDLs (Companhias de Distribuição Locais) que através de gasodutos de distribuição fornecem gás natural, aos seus respectivos clientes.

O gás natural é hoje apontado como uma das fontes de energia de maior perspectiva de incremento, a ponto de ser designado frequentemente como "o combustível do século XXI". Cresce também o uso deste produto como matéria-prima industrial. No Brasil, o gás natural hoje responde a 12,8% da atual matriz energética nacional (MME, 2013). Sabe-se que as metas governamentais apontam para a faixa de 15% em 2015, em razão do amplo programa de incentivo do uso do gás, que levará o produto à quase todos os estados da federação, com reservas agora substanciais e rede de transporte adequada.

1.1.1. Delimitação do Tema

O trabalho em questão analisou os fenômenos de interação eletromagnética existentes entre uma linha de transmissão de 69 kV ou de tensão superior e um duto de transporte de hidrocarbonetos enterrado, doravante a ser denominado de gasoduto de distribuição, estando a linha de transmissão em regime permanente ou transitório.

O trabalho tratou de dutos de aço, transportando gás natural, enterrados em solo típico da região sudeste do Paraná e com trechos onde há o paralelismo ou cruzamentos com linha de transmissão de energia elétrica. Para tal, o estudo se apoiou em simulações computacionais já realizadas que indicam as tensões de toques e de passo presentes nos afloramentos dos gasodutos de distribuição. Estes afloramentos são constituídos basicamente de estações de medição, válvulas de bloqueio e pontos para medição diversos, que são projetados para realizar a operação da rede de gás e em consequência disso a intervenção de profissionais nestas instalações.

As simulações computacionais, denominadas estudos de interferências eletromagnéticas, apontam tensões de toque alta (acima de 1000 V), em regimes transitórios da linha de transmissão em casos de cruzamentos com os dutos. Nos

casos de paralelismo da linha de transmissão com os dutos, a tensão nos afloramentos pode chegar a valores elevados, inclusive em operação de regime permanente.

Para estas condições supracitadas, como as opções de realocação da linha de transmissão, bem como dos dutos metálicos são, inviáveis técnica e economicamente na maioria dos casos, os estudos apontam medidas mitigadoras que tem a finalidade de fornecer condições mínimas de segurança humana e do ponto de vista de instalações, mesmo com as interferências eletromagnéticas, viabilizando assim a implantação de linhas de transmissão e de dutos metálicos.

Estas medidas mitigadoras são sugeridas atualmente em cima de práticas recomendadas e na maioria dos casos não compatibilizam áreas com problemas com sistemas de potência e com a proteção catódica do duto. A proteção catódica do duto é responsável pela proteção contra corrosão do duto, que resumidamente consiste em um sistema que injeta corrente contínua no duto metálico, até que o mesmo atinja o potencial de proteção contra a corrosão. Sendo assim, a maioria dos estudos apresenta como conclusão final soluções empíricas, sem compatibilizarem os sistemas envolvidos e não possuem uma classificação ou uma mesma linha de soluções para casos similares.

Neste sentido, o trabalho mostra, através de um estudo de casos de implantação destas medidas mitigadoras na região metropolitana de Curitiba, os problemas de interferência eletromagnética nos afloramentos dos dutos e através destes estudos classificando as medidas mitigadoras e conceituando tecnicamente através de normas, especificações técnicas e práticas recomendadas.

1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS

A importância da segurança operacional é indispensável em uma rede de distribuição de gás, uma vez que, em sua grande maioria, a intervenção humana é necessária para operação da rede de distribuição.

Sendo assim, é fundamental que em decorrência das interferências eletromagnéticas entre dutos metálicos e linhas de transmissão, que a utilização das medidas mitigadoras esteja dentro dos parâmetros técnicos sugeridos pelas normas

e procedimentos consagrados. Porém, percebe-se que estas implantações são baseadas em cima de práticas “empíricas”, necessitando de uma maior consolidação teórica.

Outro aspecto é o técnico econômico, nas quais as implantações de gasodutos de distribuição e linhas de transmissão de energia elétrica serão cada vez mais frequentes, a fim de prover o desenvolvimento econômico de regiões e em vista das possibilidades diminutas de realocação de ambas estruturas, o convívio entre elas deve ser harmonizado da melhor forma possível.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Desenvolver um estudo e contextualização das interferências eletromagnéticas de linhas de transmissão e sistemas de potência em dutos metálicos enterrados para transporte de gás natural. Realizar um estudo das medidas mitigadoras sugeridas nos estudos de interferência eletromagnética e através da correlação com normas e especificações técnicas embasar tecnicamente tais medidas.

1.3.2. Objetivos Específicos

- ✓ Contextualizar a problemática do cruzamento de dutos metálicos com elementos do sistema elétrico de potência.
- ✓ Pesquisar a literatura sobre trabalhos que abordam estudos de interferência eletromagnética.
- ✓ Descrever os requisitos de segurança a serem observados para proposição das medidas mitigadoras.
- ✓ Pesquisar as principais medidas mitigadoras que são empregadas nestes casos.

- ✓ Realizar um estudo de casos de tais medidas, acompanhando a implantação de um projeto em um ramal de uma distribuidora de gás canalizado, na região de Curitiba.
- ✓ Classificar, conceituar e embasar tecnicamente as principais medidas mitigadoras já pesquisadas.
- ✓ Apresentar uma classificação final, bem como descrição técnica embasada de todas as medidas mitigadoras utilizadas.

1.4. JUSTIFICATIVA

A reflexão sobre projeto e planejamento de uma obra de implantação de um gasoduto de distribuição com linhas de transmissão, o desenvolvimento de estudos sobre análises destas interferências eletromagnéticas em conjunto com novas tecnologias, proporcionam segurança operacional na distribuição do gás, bem como a compatibilização de projetos de energia e distribuição de gás.

O estudo proposto envolve além da área da engenharia elétrica, outras áreas de conhecimentos técnicos, como mecânica, química e física, tornando o assunto atrativo às pessoas envolvidas.

A disponibilidade e interesse dos envolvidos fazem com que o presente projeto possa trazer informações preciosas para o desenvolvimento acadêmico descrevendo de uma maneira didática e de fácil assimilação no que diz respeito aos critérios tecnológicos e para futuras implantações.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O estudo proposto é composto de uma breve revisão da literatura, de estudos e dissertações já desenvolvidas na área de simulação computacional. Também foram revisadas as literaturas referentes a normas de segurança, principalmente quanto à tensão de toque e tensão de passo, visando à segurança operacional.

Para a realização deste projeto, foi praticado um estudo de caso de implantação das medidas mitigadoras em gasodutos de distribuição localizados na

região metropolitana de Curitiba. Para tal foi revisado o estudo de interferência eletromagnética, bem como o estudo de casos similares.

Em outra etapa, realizou-se o levantamento de campo, no qual será realizado o acompanhamento e a avaliação das medidas mitigadoras implantadas, com relação às normas de segurança já pesquisadas.

Por fim, em cima do estudo de caso, da revisão de normas e práticas recomendadas e de especificações técnicas, as medidas mitigadoras são classificadas, bem como consolidadas através de estudos teóricos.

2. FUNDAMENTOS SOBRE LINHAS DE TRANSMISSÃO E GASODUTOS

Conforme Dutra e Nunes (1999, p. 159), “As estruturas enterradas extensas, como tubulações, cabos de energia e de telecomunicações, apresentam elevada condutância e podem estar sujeitas às influências de linhas de alta tensão de transmissão de energia elétrica”. O *Electric Power Research Institute* (1982, p.329) afirma que: “O advento e crescimento do uso de linhas de alta tensão elevam a importância relativa aos efeitos de campo como tensões e correntes envolvidas em corpos condutores”.

Conforme previsto pelas leis do eletromagnetismo, os condutores percorridos por corrente alternada nas linhas de transmissão podem induzir correntes em objetos metálicos nas suas vizinhanças. De acordo com Dutra e Nunes (1999, p. 159), em condições normais, a magnitude das correntes induzidas é pequena, mas quando um curto-circuito ocorre na linha de alta tensão, até que a proteção atue levará alguns ciclos, período onde haverá um forte desequilíbrio do campo magnético, ocasionando intensa indução sobre as estruturas enterradas.

A magnitude destas correntes induzidas provenientes de defeitos em linhas de alta tensão dependem das características de projeto da linha de transmissão, das características da estrutura enterrada, da resistividade do solo e seu cálculo envolve conhecimentos especializados na área de engenharia eletrotécnica e comercialmente denominam-se “Estudos de Interferência Eletromagnética”.

Considera-se que os gasodutos são equipamentos que não foram projetados para operar com elevadas tensões em sua superfície metálica. Existe um sistema de proteção catódica, que injeta corrente elétrica contínua no duto e que eleva os potenciais no duto de forma a polarizá-lo contra a corrosão. Entretanto estas tensões não podem exceder os valores de -1,25 Vcc, conforme parâmetros definidos pela ABNT 15589.

Sendo assim, a elevação de potencial proveniente de circuitos corrente alternada expõe os equipamentos, o meio ambiente e população próxima a riscos não previstos em seu projeto original. Se as tensões e correntes induzidas no duto pela linha forem suficientes, pode ocorrer centelhamento na tubulação, mesmo que de baixa energia, porém com capacidade para promover a inflamação do hidrocarboneto gerando uma explosão (DUTRA ; NUNES 1999, p. 160).

A proximidade de linhas de alta tensão e tubulações metálicas também proporciona problemas de segurança para pessoas, que de alguma forma possam entrar em contato com a tubulação. É possível que seja necessário às equipes de manutenção, a utilização de botas e luvas isolantes.

A influência da linha de transmissão também afeta a proteção anticorrosiva da tubulação, denominada como revestimento, devido às tensões e correntes induzidas na mesma, tornando-se essencial o estudo desse efeito para o projeto de medidas mitigadoras que ofereçam proteção ao duto e ao revestimento anticorrosivo.

A Figura 1 mostra um exemplo de danos por corrosão devido a correntes alternadas induzidas por uma linha de transmissão.



Figura 1 - Corrosão do duto por corrente alternada.
Fonte: North American Pipeline (2009).

A Figura 2 exemplifica os riscos às pessoas em contato com o duto metálico, uma vez que elevados potenciais no duto podem oferecer aos operadores ou qualquer pessoa em contato com os equipamentos a tensões de toque e de passo perigosas a integridade humana.

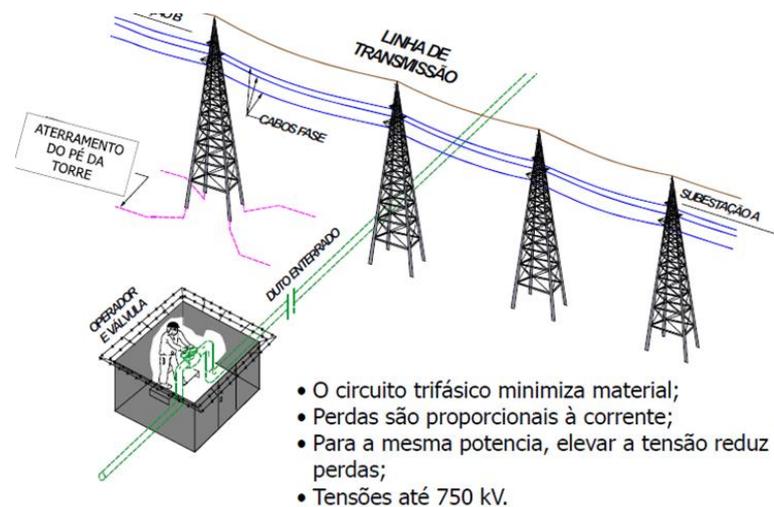


Figura 2 - Risco de choques elétricos na operação dos dutos.
Fonte: ELILSON (2010).

Conforme a DIPRA (1999, p.2) tensões induzidas em um duto metálico por uma linha de transmissão, paralela e nas proximidades do duto, podem ocorrer por efeitos capacitivos, condutivos e indutivos. O modelamento e análise desses efeitos são realizados tanto em regime permanente, como em regime transitório do sistema de potência e são realizados através do estudo de interferência eletromagnética. Estes estudos, além destas análises, dependendo da necessidade de salvaguardar a segurança humana e a integridade dos equipamentos dos gasodutos, propõem medidas de segurança para atenuar estes efeitos, chamadas comercialmente de medidas mitigadoras.

A análise destas medidas mitigadoras é o foco principal deste trabalho, sendo que a seguir no referencial teórico são abordados conceitos da problemática destes cruzamentos e dos critérios de estudo de interferência eletromagnética.

2.1 EFEITO CAPACITIVO

Considera-se um capacitor todo par de condutores separados por um dielétrico, onde pelo menos um destes estiver carregado de forma a propiciar um campo elétrico entre eles (JOHNK, 1988). A indução eletrostática desse sistema promove um acúmulo de cargas de polaridades contrárias nas superfícies dos condutores, armazenando assim certa quantidade de energia. Esse acúmulo de energia é o trabalho necessário para promover o deslocamento das cargas nos

condutores. A razão entre essa quantidade de carga e a diferença de potencial entre os condutores é a constante chamada de capacitância (HAYT, 1983). Ou seja:

$$Q = C \times V \quad (1)$$

Onde:

Q – quantidade de carga elétrica;

C – capacitância;

V – diferença de potencial entre os condutores;

Quando considerado o sistema em estudo, ou seja, uma linha de transmissão e um gasoduto enterrado, verifica-se a aplicação da teoria sobre capacitores em um sistema físico real. “Esta é uma forma de acoplamento capacitivo atuando através da capacitância entre uma linha de transmissão CA e um duto, em série com a capacitância entre o duto e a terra adjacente.” (DIPRA, 1999, p.2).

Conforme Swedi e Johar (2003) a interferência capacitiva ocorre quando o duto possui uma boa isolamento em relação à terra. O duto recebe um potencial relativo ao solo que é proporcional a tensão nas linhas de transmissão.

A Figura 3 ilustra as diferentes distâncias entre as fases na linha de transmissão e o duto a ela paralelo. Os potenciais induzidos no duto metálico devido a contribuição de cada fase devem ter módulo diferente, afinal a soma dos vetores de campo elétrico no ponto do espaço onde se encontra o duto é diferente de zero, mesmo para uma linha com tensões equilibradas (onde o vetor soma das tensões seja nulo).

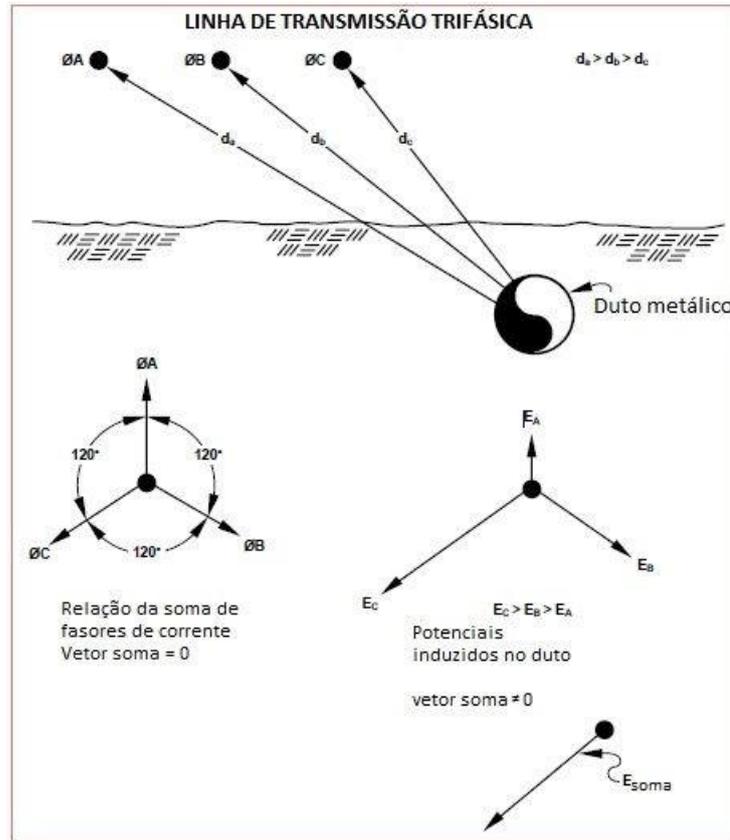


Figura 3 - Contribuição do campo elétrico de um circuito trifásico no potencial de um duto metálico.
 Fonte: adaptado de DIPRA (1999).

2.2 EFEITO CONDUTIVO

Problemas envolvendo condutância podem ocorrer durante a construção e também após a instalação. A condução elétrica pode ser causada por contato direto ou faltas a terra. Se um contato acidental acontecer entre o condutor CA e o duto metálico, o duto deve elevar seu potencial até o potencial do condutor até que a linha de corrente alternada seja desenergizada. Felizmente, este tipo de contato direto é muito raro (DIPRA, 1999, p.3).

Este tipo de interferência, que na literatura também é chamada de interferência ôhmica ou resistiva, também ocorre no caso de descargas atmosféricas atingirem a estrutura de transmissão próxima ao gasoduto (SWEDI; JOHAR, 2003, p.4). Como a impedância de falta à terra é bastante baixa, a corrente de falta cria gradientes de potencial no solo em direção radial à entrada da corrente de falta. O potencial no duto será limitado, além da resistividade do solo, pela isolamento de seu

revestimento. “Portanto, a terra ao redor do duto estará em um potencial relativamente elevado em relação ao potencial do duto. Isto pode resultar em danos ao duto metálico ou ao seu revestimento” (DIPRA, 1999 p.3).

Segundo Swedi e Johar (2003, p. 4):

“Qualquer um que tocar na tubulação fora do cone de tensão poderá receber um choque devido o potencial entre a tubulação e o solo circundante. Medidas de proteção para as pessoas são necessárias, se a tensão de contato exceder 65 V em interferência de longa duração, ou 1.000 V para interferência de curta duração. Estas medidas incluem uso botas de borracha, com isolamento, luvas, ou preenchimento de proteção isolado”.

2.3 EFEITO INDUTIVO

“Uma das maiores causas de indução de tensão em dutos é o fluxo de corrente nas linhas” (DIPRA, 1999, p.4). O fluxo de corrente em um condutor cria campo magnético em volta dele. Em uma linha de transmissão de corrente alternada no sistema de potência, este fluxo variará no tempo, e pode, portanto, produzir em um condutor paralelo em suas proximidades (duto metálico), uma força eletromotriz (fem) induzida. A Figura 4 exemplifica a ação do campo magnético no problema em questão.

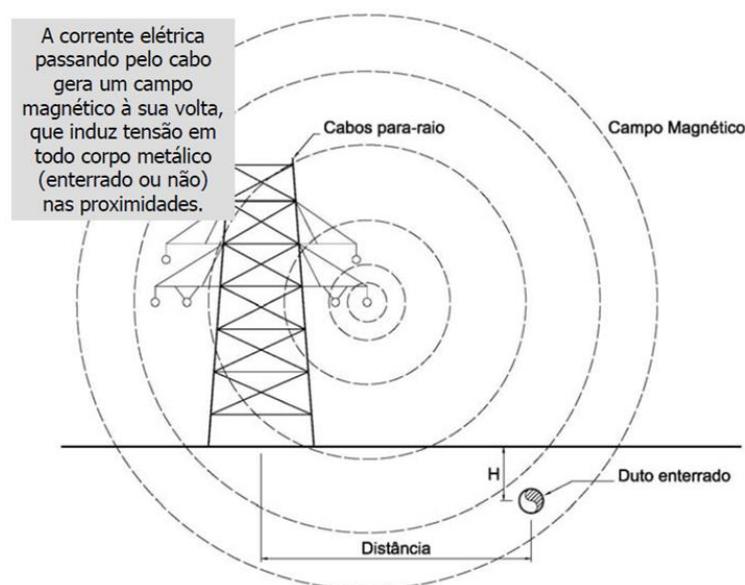


Figura 4 - Indução magnética em um duto metálico.
Fonte: Curso IBP (2009).

A magnitude da tensão induzida dependerá de (DIPRA, 1999, p.5):

- ✓ Geometria física da separação dos condutores e condutores do duto;
- ✓ Resistência do revestimento do duto;
- ✓ Resistência longitudinal do duto;
- ✓ Comprimento do duto eletricamente contínuo e paralelo a linha de transmissão;
- ✓ Magnitude da corrente no sistema;
- ✓ Frequência do sistema elétrico de potência;
- ✓ Número de fases na linha de transmissão (monofásico, ou trifásico).
- ✓ Resistividade do solo;
- ✓ Descontinuidades (quando o duto diverge em relação ao paralelismo com a linha de transmissão).

Para entender as tensões induzidas, da teoria eletromagnética, é conhecido que condutores percorridos por corrente elétrica variável no tempo podem induzir força eletromotriz.

De acordo com experimentos de Faraday, um campo magnético estático não produz fluxo de corrente, mas um campo variável no tempo produz uma tensão induzida (chamada força eletromotriz ou simplesmente fem) em circuito fechado condutivo, o que gera um fluxo de corrente (SADIKU, 2004, p.370).

O campo magnético tem origem na existência de cargas elétricas em movimento relativo à um referencial onde ele é percebido. Percebe-se que uma linha de transmissão de corrente alternada, proporcionará não apenas campos magnéticos em suas vizinhanças, como também uma variação de fluxo magnético nessa região, que será proporcional à frequência da corrente alternada.

Assim, uma força eletromotriz aparece na superfície de um duto metálico nas proximidades de uma linha de transmissão. Conforme Swedi e Johar (2003, p.3), os dutos de aço utilizados no transporte de gás natural, petróleo e derivados do petróleo, são revestidos por uma camada isolante (essencial para proteger o material metálico de corrosão). Com a melhoria da isolação dos dutos, a proteção contra a corrosão se torna mais eficiente, todavia, os valores das tensões induzidas nestes dutos aumentam.

Grcev (2000, p. 109) descreve que a aproximação do paralelismo entre uma linha de transmissão e um duto metálico, pode ser feita através da chamada zona de influência, conforme ilustra a Figura 5. Cada seção do duto é modelada por um circuito equivalente apropriado, como uma linha de transmissão com perdas, onde z é a impedância do elemento do duto e y a admitância em relação à terra.

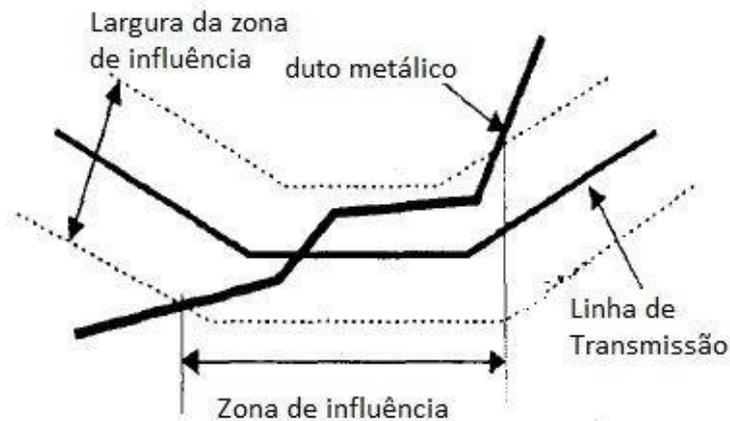


Figura 5 - Exemplo da zona de influência da linha de transmissão no duto.
Fonte: adaptado de GRCEV (2000, p. 109).

Considerando que por alguns quilômetros, o duto se estende paralelo à linha de transmissão, sem ligação a terra, e que a resistividade do solo ao longo deste trecho de paralelismo seja constante tem-se uma fem induzida constante ao longo do comprimento “L” do oleoduto paralelo. Além disso, a admitância “y” e impedância “z” do duto também poderão ser consideradas constantes (BORTELS *et al.* 2006, p.212).

2.4 GASODUTOS

No tocante aos gasodutos é importante ressaltar que este termo é reconhecido na indústria e muito utilizado na indústria de petróleo para distinguir tipos de dutos que, apesar de grande semelhança física, têm utilizações distintas. Um gasoduto, diferentemente de um oleoduto, é utilizado para transporte de diversos tipos de produtos gasosos, em geral hidrocarbonetos. Para este trabalho, serão considerados apenas gasodutos metálicos (aço), transportando

hidrocarbonetos (que serão considerados como materiais não condutores e diamagnéticos), enterrados e com proteção anticorrosiva.

2.4.1 Gasodutos no Transporte de Gás Natural

No caso de transporte de gás natural são utilizados gasodutos. Estes “variam em diâmetro e pressão de acordo com o destino do gás natural” (CORTELETTI, 2009, p. 18). A pressão é a responsável pelo transporte do gás e a medida que o gás é transportado a pressão diminui. Dessa forma, fazem-se necessárias estações de compressões intervaladas ao longo do gasoduto a fim de incrementar a pressão fazendo com que o gás atinja o destino desejado (CORTELETTI, 2009, p. 19).

Faz-se necessário reservar uma largura mínima ao redor do duto, a qual é considerada de utilidade pública e deve ser desapropriada, caso necessário. Tal largura, ou faixa, é denominada faixa de servidão. A NBR 12712-2002: Projeto de Sistemas de Transmissão e Distribuição de Gás Combustível, utiliza o termo faixa de domínio ou faixa definindo-o como “área de terreno de largura definida, ao longo da diretriz do gasoduto situado fora da área urbana, legalmente destinado à sua instalação e manutenção, ou faixa destinada, pela autoridade competente...”. (CORTELETTI, 2009, p. 19). Entretanto no caso da distribuição do gás natural, o traçado dos dutos é selecionado a partir de caminhos já existentes, como estradas e rodovias, desde que não pertencentes a áreas ambientalmente protegidas, ou seja, não existe uma faixa de domínio específica.

A eficiência no transporte e distribuição do gás natural representa clara redução econômica na implantação de um gasoduto. Segundo Burman (2004, p. 15), a redução do atrito interno pela pintura proporciona aumento de 10% na eficiência de transporte do gás natural, comparativamente a gasodutos que não possuem tal revestimento interno.

Comparando o transporte de gás natural com o transporte de petróleo através de oleodutos, tem-se que um volume muito maior de gás é transportado por unidade de energia, devido à menor densidade do gás natural.

A localização onde o gasoduto será inserido influi fortemente em seu projeto. O cálculo da espessura da parede do gasoduto, o espaçamento entre as estações

de compressões e a determinação da pressão de ensaio são critérios a partir dos quais se realiza a classificação da locação de diretriz do gasoduto. A Norma Petrobras N-2180 define unidade de locação de classe como sendo uma “área que se estende 200 m para cada lado da linha de centro de qualquer trecho, com comprimento contínuo de 1600 m”. Tal definição pode ser visualizada na Figura 6.

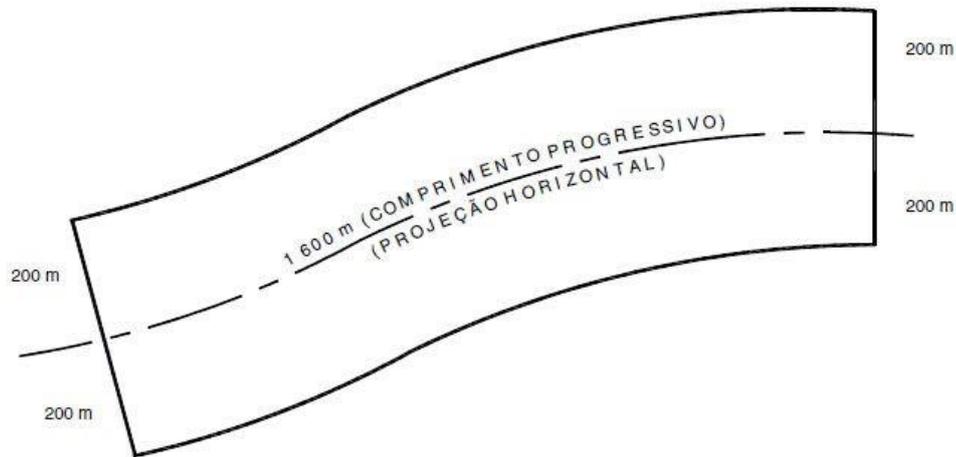


Figura 6 - - Unidade de Locação de Classe.
Fonte: Norma Petrobrás N-2180 (2001, p. 3).

Ainda, segundo a Norma Petrobrás N-2180, “a classe de locação deve ser estabelecida em função da quantidade de construções para ocupação humana existente em uma unidade de locação de classe”. Para gasodutos novos, a classificação da classe de locação varia da classe 1 a 4, variando respectivamente, de unidades de locação de classe contendo menos de 10 (dez) construções para ocupação humana, até “unidades de locação de classe onde prevaleçam prédios de 4 (quatro) ou mais pavimentos, incluindo o térreo” (Norma Petrobrás N-2180).

Devido aos riscos envolventes, faz-se necessário a instalação de válvulas de segurança ao longo da tubulação. De acordo com a NBR 12712-2002, tais válvulas devem ser instaladas a um distanciamento máximo, dado em decorrência da classe de locação, variando entre 8 km e 32 km. Devem ainda ser instalados no início, no fim de cada trecho e em intervalos não superiores a 200 km, lançadores e recebedores (*scraper- traps*) com a finalidade de limpeza e inspeção da tubulação (BURMAN, 2004, p. 16).

O fator de projeto reflete o grau de segurança estrutural do gasoduto para cada classe de locação. O fator de temperatura é dependente da temperatura de

projeto. O fator de eficiência de junta é considerado como unitário para todos os dutos fabricados atendendo normas aceitas pela NBR 12712-2002, sendo que para as exceções, o valor do fator de eficiência de junta é 0,8. Tanto o fator de projeto quanto o fator de temperatura quanto o fator de eficiência de junta são obtidos de tabela, de acordo com a classe de locação, temperatura de projeto e norma de fabricação, respectivamente, na NBR 12712-2002.

A profundidade de enterramento do gasoduto é diferenciada para gasodutos de transmissão e distribuição. Os gasodutos de transmissão têm sua profundidade de enterramento de acordo com a classe de locação/situação, podendo variar de 750 mm a 900 mm. Já os gasodutos de distribuição devem ser enterrados em profundidade igual ou superior a 600 mm (NBR 12712-2002, p. 15). Em ambas as situações (transmissão e distribuição) devem ser observadas exceções quanto à locação em cruzamentos de rodovias, ferrovias e ruas, em rios e leitos de rios, e demais situações descritas na NBR 12712-2002. Os dutos enterrados devem ainda ser sinalizados com fita contínua, ou outro meio, localizado a 300 mm acima do duto (NBR15649-2004: Tubulação para Indústria de Petróleo e Gás Natural).

2.4.2 Reparos em Oleodutos e Gasodutos

A tubulação enterrada apresenta perigo potencial para pessoas e equipamentos (NBR 15649:2004). No projeto de tais tubulações devem ser previstos alguns requisitos, como:

- ✓ Projeto, incluindo traçado, arranjo, interação com sistemas interligados;
- ✓ Procedimentos operacionais e de controle;
- ✓ Proteção contra a corrosão;
- ✓ Proteção e minimização de impactos externos;
- ✓ Especificação de materiais, procedimentos de construção e controle de qualidade.

A observação destes requisitos tem o objetivo de restringir as futuras necessidades de reparo na tubulação. A Norma Petrobrás N-2737 define que tubulações que apresentam qualquer dano com vazamento, ou sulcos e cavas com profundidade maior que 12,5% e 10% da espessura nominal de parede, no caso de

oleodutos e gasodutos, respectivamente, apresentam necessidade de reparo. Além destes, outros danos previstos na mesma norma, devem ser reparados ou removidos, tais como: qualquer tipo de trinca, mordeduras, solda não aceita por norma, áreas de corrosão e tensionamento longitudinal.

São previstos três tipos de reparos na Norma Petrobrás N-2737. São eles: reparo de contingência, temporário e permanente. Os reparos de contingência “são precedidos de ações operacionais para minimizar os impactos ao meio ambiente e pessoas.” Trata-se de um reparo preliminar que visa viabilizar os reparos temporários e definitivos. Os reparos temporários “servem para reforçar regiões que apresentam danos, garantindo a segurança e a continuidade operacional do duto, quando a execução do reparo definitivo for inviável”. Já os reparos permanentes propiciam a recomposição mecânica integral do duto.

As ocorrências de acidentes com gasodutos são classificadas pela *EGIG -7th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group* - em três formas distintas (CORTELETTI, 2009, p. 46):

- ✓ Pit (furo pequeno): diâmetro menor que 2 cm;
- ✓ Fenda: diâmetro maior que 2 cm e menor que uma fissura (20% do diâmetro);
- ✓ Ruptura: diâmetro total do duto ou fissuras (acima de 20% do diâmetro).

O gráfico na Figura 7 mostra que ações de terceiros, como escavações e construções, representam em torno de 50% do total de acidentes em gasodutos.

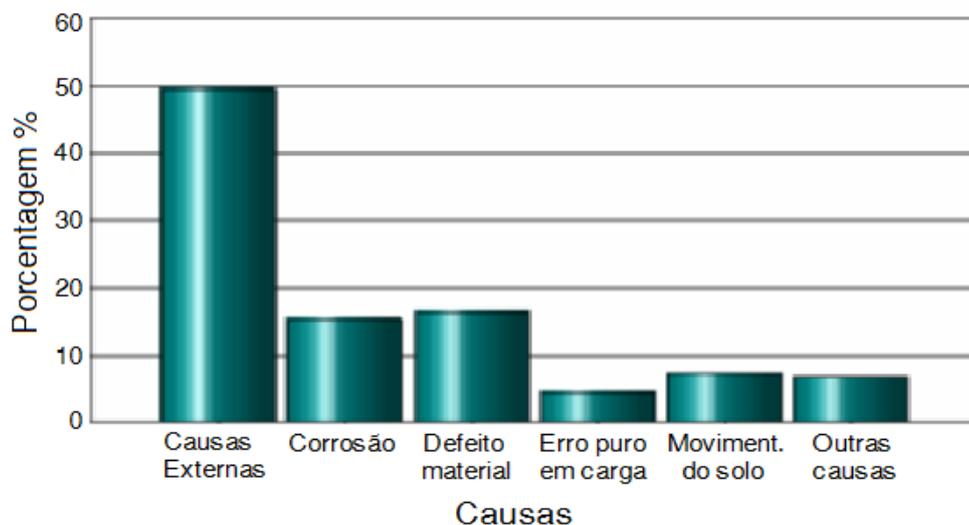


Figura 7 - Causas de Incidentes com Gasodutos.
 Fonte: CORTELETTI (2009, p. 47).

2.4.3 Proteção Anticorrosiva e Resistividade do Solo

O rompimento de um gasoduto é capaz de gerar danos muitas vezes irreparáveis ao meio ambiente. Financeiramente as consequências alcançam facilmente a marca de bilhões de dólares. A proteção da estrutura metálica de um gasoduto apresenta custos muito elevados, porém totalmente justificáveis diante das consequências resultantes de um dano no gasoduto (NETO *et al.*, 2005, p. 2).

Dutos de aço carbono necessitam de proteção anticorrosiva para prolongamento da vida útil do mesmo. Objetivando a proteção externa do duto, uma das formas mais empregadas é o revestimento externo associado à proteção catódica. O revestimento utilizado no duto representa ponto principal da prolongação da vida útil do mesmo e representa cerca de 5% do custo total de instalação (MARROIG *et al.*, 2003, p.2).

O efeito corrosivo traz como consequência a diminuição da espessura da parede nominal do duto, por meio do acúmulo de água e resíduos sólidos localizados. Tais resíduos, se abrasivos, além das consequências da abrasão, podem comprometer toda a estrutura do duto por meio do entupimento de válvulas e filtros componentes do sistema (NÓBREGA *et al.*, 2002, p. 3).

Gasodutos enterrados interagem com o meio no qual estão inseridos, portanto, justifica-se a aplicação de um projeto de proteção catódica à estrutura. No caso de oleodutos aéreos ou isolados do meio eletrolítico apenas justifica-se um projeto de proteção anticorrosiva interna, caso transporte material eletrólito (SCHIMIEGUEL; CASTRO; PELLICIONI, 2004, p. 18).

O projeto do sistema de proteção catódica deve ser consequência de criterioso levantamento de dados. Informações sobre o traçado, valores de resistividade do solo, possíveis mudanças sazonais, ataque bacteriano, fontes de interferência CC ou CA, proximidade de linhas de transmissão e sistemas elétricos ferroviários ou metroviários são dados necessários para o projeto eficiente do sistema de proteção catódica do gasoduto (Norma Petrobrás N-2171, p. 4).

A proteção catódica pode ser efetuada por meio da instalação de sistemas por corrente impressa ou por corrente galvânica. Ambos os meios apresentam o mesmo princípio: “obtenção da proteção pela injeção de corrente na estrutura através do meio em que ela se encontra” (SCHIMIEGUEL; CASTRO; ACCIOLI,

2004, p. 26). De acordo com a Norma Petrobrás N-2171, a preferência deve ser pelo sistema por corrente impressa, a qual considera resistividade do solo, existência de fontes de correntes de interferência, inserção do duto em áreas de vandalismo, facilidade de acesso para a instalação de retificadores, impacto da proteção catódica em outras já existentes ou a ser futuramente instaladas, e outras.

A resistividade do solo é quesito primordial no projeto de proteção catódica de gasodutos. Segundo a Norma Petrobrás N-2245, a resistividade deve ser medida a 1,5 m de profundidade do solo e, de acordo com o local, devem ser observadas as individualidades descritas na referida norma.

A medição da resistividade do solo pode ser obtida por meio da utilização do Método de Wenner ou Método dos Quatro Pinos. Tal método é descrito pela NBR 7117:1981. O método utiliza um terrômetro para medir os valores de resistência. O equipamento apresenta dois terminais de corrente (A e B) e dois terminais de potencial (M e N). Uma corrente elétrica é injetada através dos terminais de corrente gerando um potencial no outro par de terminais e indicando a resistência elétrica entre os eletrodos (SCHIMIEGUEL; CASTRO; ACCIOLLI, 2004, p. 28), conforme mostrado na Figura 8.

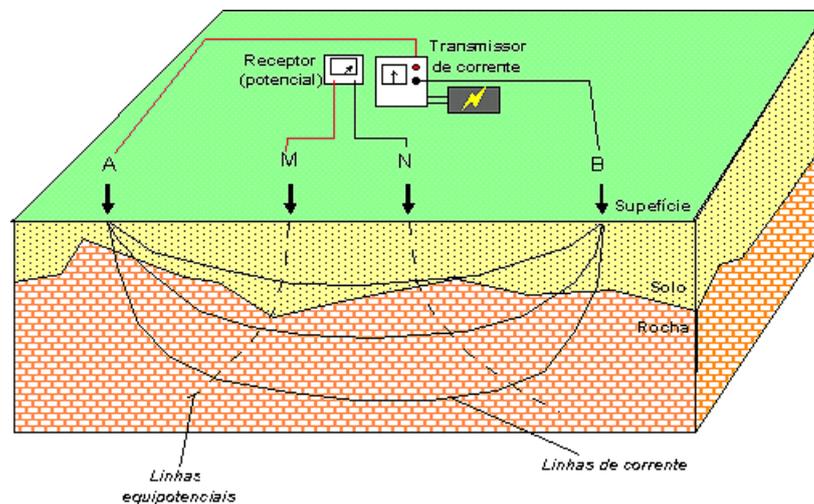


Figura 8 - Medição da Resistividade do Solo.
Fonte: SCHIMIEGUEL; CASTRO; ACCIOLLI (2004, p. 28).

2.5 LINHAS DE TRANSMISSÃO

O Operador Nacional do Sistema (ONS), em seu glossário de termos técnicos, define que “linha de transmissão é o trecho compreendido entre a primeira e a última torre, excluindo-se os barramentos de entrada das subestações” (ONS, 2009, p.27).

De acordo com o *Electric Power Research Institute (EPRI)*, “Linhas de transmissão são os meios pelos quais a energia elétrica é transportada da fonte de geração para os lugares de uso” (EPRI, 2005, p. 1-3). Observa-se que ambas as definições em nada restringem o termo as suas características construtivas, portanto, linhas de transmissão podem ser tanto aéreas com cabos nus, como subterrâneas com cabos isolados.

Neste estudo, consideram-se linhas de transmissão como sendo estruturas aéreas, com cabos nus de alumínio, com ou sem alma de aço, destinadas a transportar energia elétrica com tensão de operação nominal de 69 kV ou superior.

As linhas de transmissão, no Brasil, apresentam em geral, tamanho considerável devido às distâncias existentes entre o ponto de geração e o ponto de consumo. O parque gerador brasileiro é constituído basicamente por usinas de médio e grande porte, o que contribui ainda mais para um sistema de transmissão de longa distância.

Com o objetivo de aperfeiçoar o processo de transmissão, foi criado o Sistema Interligado Nacional - SIN. O mesmo é formado por empresas transmissoras de energia elétrica da região Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Mais de 95% do sistema de transmissão elétrica nacional é interligada, sendo que as regiões isoladas encontram-se, em sua maioria, no Norte (ONS, 2011). “As operações de instalações de geração e transmissão de energia elétrica no SIN” são controladas e coordenadas pelo ONS, sob fiscalização e regulação da ANEEL.

O sistema de transmissão integrado permite que usinas com *déficit* em seu nível de reservatório permutem energia com demais usinas instaladas nas diferentes regiões brasileiras. Além desta vantagem, o sistema integrado torna o sistema de transmissão mais estável, confiável e econômico. Existem ainda regiões brasileiras não integradas ao sistema de transmissão, sendo que a maior parte se encontra na

região Norte, onde a geração é predominantemente a partir de termelétricas a diesel (ANEEL,2013).

2.5.1 Níveis Típicos De Tensão

Os níveis de tensão utilizados variam dependendo do país sob análise, porém normalmente encontra-se entre 220 kV e 765 kV. No Brasil, linhas de transporte de energia elétrica classificadas como de linhas de transmissão possuem níveis de tensão igual ou superior a 230 kV, sendo as tensões usuais: 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV e 765 kV. As linhas de subtransmissão são sistemas com classe de tensão abaixo de 230 kV. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1985), na NBR 5422, as linhas de distribuição, responsáveis pela distribuição de energia a partir das subestações transformadoras de distribuição, possuem níveis de tensão típicos de 11 kV, 13,8 kV, 21 kV, 24 kV e 34,5 kV, 69 kV e 138 kV.

2.5.2 Linhas de Transmissão Aéreas

Os principais elementos das linhas de transmissão, conforme apresentado na Figura 9, são:

- ✓ Cabos condutores e acessórios;
- ✓ Fundações;
- ✓ Aterramentos;
- ✓ Estruturas isolantes e de suporte;
- ✓ Cabo guarda ou para-raios.

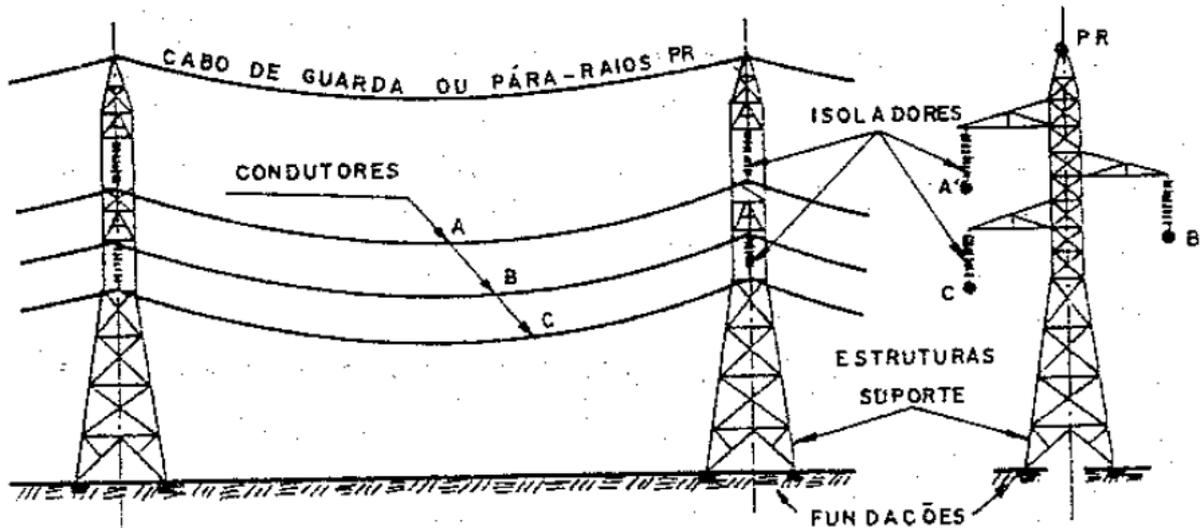


Figura 9 - Principais elementos das linhas de transmissão
 Fonte: LABEGALINI et al. (1992, p. 19).

Os condutores podem ser vistos, sob a perspectiva econômica, como os principais elementos da linha de transmissão. Seu dimensionamento está diretamente relacionado com as perdas de energia (efeitos Corona e Joule) e outros efeitos indesejáveis, como radio interferência e ruídos acústicos (LABEGALINI et al., 1992, p.19).

Os isoladores utilizados em linhas de transmissão são encontrados em materiais sintéticos compostos, vidro temperado e porcelana vitrificada. São três tipos básicos de isoladores utilizados: isoladores de pino, de pedestal ou pilar ou coluna e isoladores de suspensão. As estruturas de suporte da linha exercem papel de fixação da mesma ao solo. Além disso, permitem a fixação dos condutores através de distâncias adequadas entre si, em relação ao solo e em relação à estrutura.

O cabo guarda tem a função de diminuir ao máximo a incidência de descargas atmosféricas sobre os condutores de transmissão. Em geral, as flechas dos cabos guardas são menores que a dos cabos condutores (LABEGALINI et al., 1992, p.33).

2.5.3 Configurações Geométricas das Linhas Aéreas

São três as disposições básicas dos condutores em linhas de transmissão: plana horizontal, plana vertical conforme Figura 10 e triangular conforme Figura 11. A configuração plana horizontal é utilizada em todos os níveis de tensão, preferencialmente em circuitos simples. A configuração plana vertical tem o intuito de diminuir a faixa de servidão da linha e é utilizada em circuito simples em vias públicas. Em circuito duplo, representado na figura 11, é utilizado em níveis de tensão até 500 kV. A configuração triangular é empregada para circuitos simples e duplos, conforme Figura 11 em todos os níveis de tensão. Nesta configuração, os condutores são dispostos, normalmente, em formação de um triângulo isósceles.

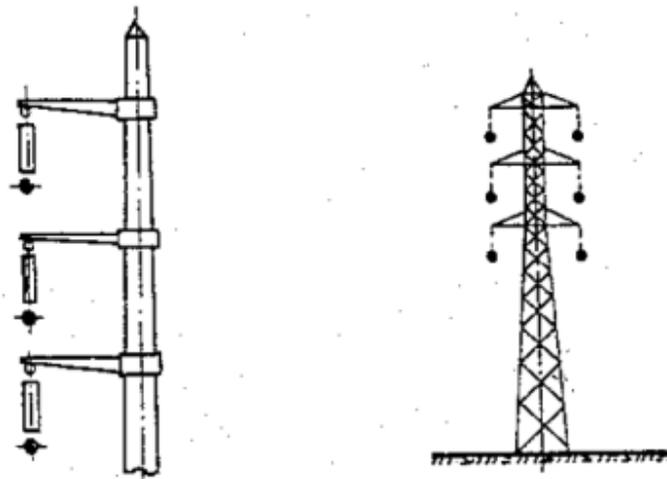


Figura 10 - Circuito Simples Vertical e Circuito Duplo Vertical.

Fonte: LABEGALINI *et al.* (1992, p. 73).

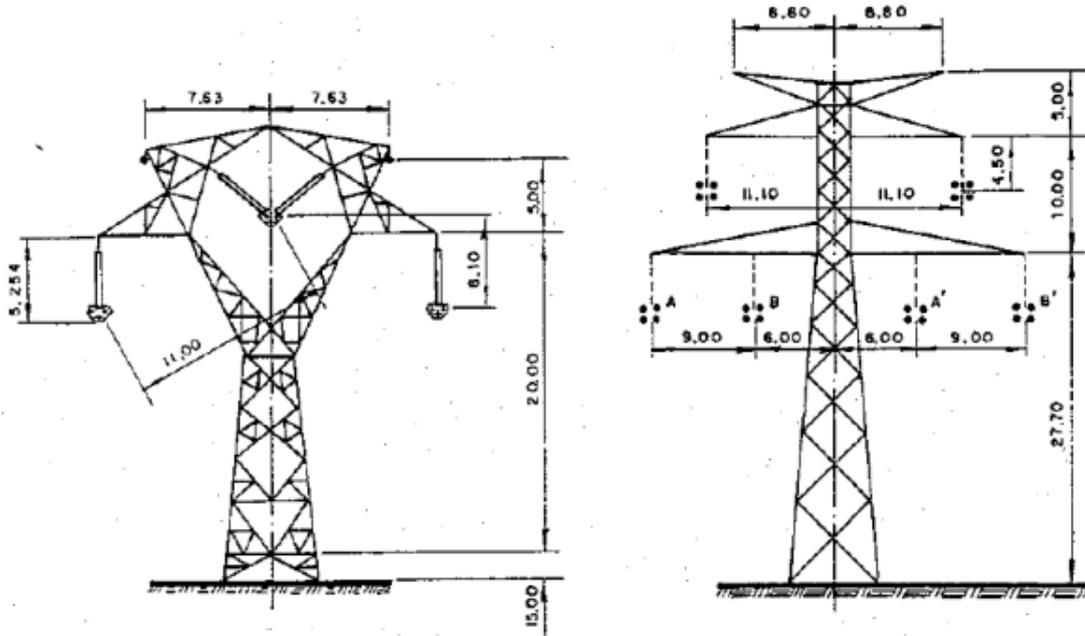


Figura 11 - Circuito Simples Triangular e Circuito Duplo Triangular.

Fonte: LABEGALINI *et al.* (1992, 74).

2.5.4 Faixa de Servidão

A faixa de servidão ou faixa é definida segundo NBR 12712 como “área de terreno de largura definida, ao longo da diretriz do gasoduto situado fora da área urbana, legalmente destinado à sua instalação e manutenção”. A faixa de domínio é adquirida pelo expropriante enquanto a faixa de servidão permanece com o proprietário, com restrições ao uso.

A faixa de terra ao longo da linha de transmissão necessária para garantir segurança e manutenção é denominada faixa de segurança e segundo a NBR 5422 alguns fatores são determinantes na largura da faixa de segurança. São eles: balanço dos cabos devido à ação do vento, posicionamento das fundações de suportes e efeitos elétricos. Ainda segundo a referida norma, a largura mínima da faixa de servidão, para uma única linha, é dada por:

$$L_f = 2 \times (b + \lambda + D) \quad (2)$$

Onde:

b – distância horizontal do eixo do suporte ao ponto de fixação do condutor mais

afastado deste eixo, em m;

λ – soma das projeções horizontais da flecha do condutor e do comprimento da cadeia de isoladores, em m;

D – no mínimo igual a 0,5m.

A largura da faixa de segurança também fica condicionada à observação de aspectos como níveis de rádio interferência, interferência em sinais de TV e ruído audível quando se trata de linhas de transmissão com nível de tensão acima de 230kV.

É também necessário observar o espaço da faixa quanto às benfeitorias permitidas. A NBR 5422 define as distâncias mínimas de segurança e a orientação técnica da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL, 2007) determina a utilização do espaço de acordo com o exposto na Figura 12. A área A fica impossibilitada de construção de quaisquer benfeitorias enquanto as áreas B e C permitem benfeitorias específicas. Ainda de acordo com orientação técnica da CPFL, a largura mínima usual para linhas de 69 kV, 88 kV e 138 kV correspondem a 15 m para cada lado do eixo da linha de transmissão. Como observado, a faixa de servidão e de segurança da linha de transmissão constitui tema principal em normas e orientações técnicas de concessionárias de operação de linhas de transmissão.

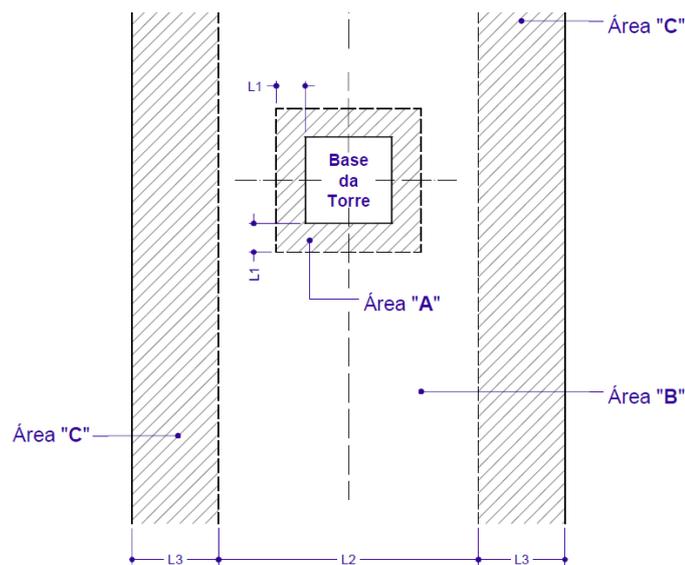


Figura 12 - Faixa de servidão.

Fonte: Adaptado de Orientações Técnicas da CPFL.

2.6 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou uma breve explanação sobre a operação das linhas de transmissão aéreas, explicando os efeitos causados pela corrente alternada que circula nas LT's, bem como aspectos construtivos e níveis de tensão. Também foi realizada uma breve explanação sobre a implantação de gasodutos. A partir das explicações descritas, o Capítulo 3 apresentará como são feitos os estudos de interferência eletromagnética entre as linhas de transmissão e gasodutos.

3. ESTUDOS DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA

Os estudos de interferência eletromagnética têm o objetivo de fornecer as diretrizes gerais para a elaboração da análise de cruzamentos de dutos metálicos com linhas de transmissão e caso necessário, elaboração do “Projeto Executivo” com as soluções de mitigação dos efeitos elétricos nas tubulações metálicas.

O importante para facilitar o entendimento do estudo é a definição de certos critérios em que se existe a necessidade da realização do mesmo, ou seja, a que distância longitudinal entre o duto e linha de transmissão, ou para quais tensões da linha de transmissão os cruzamentos serão estudados. Estes estudos são aplicados em certas condições, segundo especificação técnica COMPAGAS (2012), conforme orientações abaixo:

- ✓ Cruzamentos da rede de distribuição de aço com linhas de transmissão que operam com tensão elétrica superior a 34,5 KV.
- ✓ Paralelismo da rede de distribuição de gás natural, em aço carbono, com linhas de transmissão com tensão de regime igual ou superior a 69 kV, cujas distâncias transversais sejam inferiores a 150 metros.

3.1 ESCOPO DOS ESTUDOS DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA

O estudo do nível de interferência eletromagnética entre a linha de transmissão de energia elétrica e o gasoduto, nos pontos de cruzamento e nos trechos com paralelismo, deve conter alguns elementos mínimos a fim de caracterizar o nível de confiabilidade das simulações e conclusões definidas, bem como prover subsídios para uma análise mais completas nos critérios de segurança humana e de integridade de equipamentos.

Sendo assim recomenda-se que os estudos devem conter no mínimo os seguintes itens:

- ✓ Os critérios adotados nos estudos.
- ✓ O desenvolvimento do estudo, contextualizando as interferências e premissas adotadas.

- ✓ Perfil de tensão induzida em regime permanente, nos pontos onde existe o contato humano, tais como: nos afloramentos, em caixas subterrâneas de válvulas, em caixas subterrâneas de ERPs e nos pontos de testes existentes ao longo do trecho sob análise.
- ✓ Perfil de tensão induzida ao longo do duto, nos pontos de afloramento e no solo, devido às exposições e efeitos da corrente alternada e descargas atmosféricas em tubulações em função de: falhas de fase, incluindo curtos circuitos, surtos de chaveamento, desbalanceamentos e outros transientes, considerando os acoplamentos resistivo, capacitivo e indutivo.
- ✓ Considera-se a intensidade de correntes elétricas e tempos de duração;
- ✓ Considera-se a dispersão da corrente elétrica entre as linhas de transmissão, cabos de aterramento e duto.
- ✓ Deverá ser apresentada a metodologia utilizada para o cálculo do perfil de tensão.
- ✓ Apresentada a metodologia de medição e cálculo da resistividade elétrica do solo.
- ✓ No caso de existência de proteção catódica da estrutura da linha de transmissão, executar um estudo de interferência em relação entre este e o gasoduto.

O estudo explicita os dados referentes à LT, tais como:

- ✓ Aterramento dos estais, distância e direção em relação ao Gasoduto.
- ✓ Característica das estruturas das linhas de transmissão.
- ✓ Estudo da influência do ângulo de cruzamento, em relação à tensão induzida.
Após os cálculos de tensões induzidas conforme as diretrizes expostas neste capítulo devem ser realizadas a análise de risco conforme os tópicos abaixo:
- ✓ Análise de riscos de choques elétricos em pessoas que toquem na tubulação ou em pontos de afloramento, incluindo tensões de toque e de passo.
- ✓ Análise dos possíveis danos na tubulação e seu revestimento.
- ✓ Análise dos possíveis danos nos dispositivos e instrumentos conectados à tubulação.

Esta análise é realizada a fim de avaliar o nível de tensão induzida na tubulação e nos seus respectivos afloramentos, verificando os critérios de proteção

primeiramente da segurança humana e em segundo plano da integridade do duto e equipamentos.

3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA PARA ESTUDOS DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA

Esta seção tem o objetivo de fazer uma breve revisão na bibliografia de modo a fornecer subsídios teóricos e práticos para execução das análises.

3.2.1 Definições de termos para estudo de interferência eletromagnética:

Para os propósitos deste trabalho, são adotadas as seguintes definições conforme utilizadas no meio profissional, entretanto que envolvem áreas de conhecimento diversas (elétrica, mecânica, inspeção de equipamentos, química). Neste contexto, foi reunida uma série de termos usualmente utilizados, cujos conceitos são identificados conforme a NACE (2008), a fim de atender aos interessados finais do estudo, em geral concessionárias de energia envolvidas. Seguem abaixo as definições consolidadas:

- ✓ **Sistema interferente:** Termo geral para designar uma linha de transmissão de energia elétrica ou sistema de tração AC em alta tensão.
- ✓ **LT:** Linha de transmissão de energia elétrica.
- ✓ **Sistema interferido:** Estrutura na qual se observam os efeitos das interferências elétricas, ou o duto metálico e todos os equipamentos associados.
- ✓ **Epicentro:** Ponto de intersecção, no plano, entre o sistema interferente e o sistema interferido, no caso de cruzamento. No caso de paralelismo ou aproximação, corresponde ao ponto contido no sistema interferente que mais se aproxima do sistema interferido.
- ✓ **Regime permanente:** Condição normal de operação do sistema elétrico de potência.

- ✓ **Regime transitório:** Condição não intencional causada por curto-circuito monofásico à terra, anterior à atuação dos dispositivos de proteção do sistema elétrico de potência.
- ✓ **Acoplamento condutivo:** Fenômeno que ocorre quando parte da corrente elétrica proveniente do sistema interferente retorna ao seu aterramento de origem através do sistema interferido.
- ✓ **Acoplamento resistivo:** O mesmo que acoplamento condutivo.
- ✓ **Acoplamento indutivo:** Fenômeno que ocorre quando o campo magnético produzido por uma corrente elétrica influencia outro circuito, resultando em tensões e correntes induzidas no sistema interferido.
- ✓ **Acoplamento magnético:** O mesmo que acoplamento indutivo, usualmente referido no contexto de operação em regime permanente.
- ✓ **Acoplamento capacitivo:** Fenômeno que ocorre quando o campo elétrico produzido por um condutor energizado influencia outro circuito, resultando em tensões entre as partes isoladas do circuito vítima e a terra.
- ✓ **Tensão de toque:** Diferença de potencial entre uma estrutura metálica aterrada e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa, por definição considerada igual a 1,0 m.
- ✓ **Tensão de passo:** Diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo separados pela distância de um passo de uma pessoa, considerada igual a 1,0 m.
- ✓ **Tensão no solo:** Elevação de potencial do solo ocorrida quando uma corrente elétrica flui para a terra por meio de uma estrutura de aterramento.
- ✓ **Tensão de stress:** Diferença de potencial elétrico entre o metal do circuito interferido e o solo adjacente, normalmente imposta ao seu revestimento isolante.

3.2.3 Metodologia para elaboração do estudo de caso

3.2.3.1 Levantamento de dados de campo

Um dos pontos importantes do levantamento de campo é a medição de resistividade elétrica do eletrólito ao longo do traçado do duto, empregando o método dos quatro pinos (Wenner), em conformidade com o disposto na norma ABNT NBR-7111, para as profundidades de: 1,5 m; 3,0 m; 4,5 m e 6,0 m.

As medições indicadas devem ser realizadas com espaçamento de 500 m e, nos casos de travessias de cursos d'água e cruzamentos com a(s) linha(s) de transmissão de energia elétrica são realizadas duas medições adicionais, sendo uma à montante e outra à jusante, conforme NACE 2008.

3.2.3.2 Desenvolvimento do estudo

A partir dos dados coletados em campo deve ser realizada a estratificação da resistividade do eletrólito em camadas, para os solos adjacentes às estruturas objeto de estudo, sendo desconsideradas as medições com desvio superior a 50%, e subsequente redução para o modelo de duas camadas equivalente, conforme NBR 7111.

Para efeito das análises de interferências provenientes de acoplamento indutivo em regime permanente, a resistividade do solo foi modelada como homogênea, desprezadas as medições com desvio superior a 50%, sendo adotado o valor conservador correspondente à resistividade elétrica média ao longo do traçado da tubulação na região próxima ao cruzamento (500 metros a montante e 500 metros a jusante).

Com base nos valores de estratificação obtidos e nos sistemas de aterramento das estruturas informados pela(s) concessionária(s), pode ser determinada a resistência da malha de aterramento de cada estrutura da torre da LT, utilizando, para um esquema típico de contrapesos composto por 4 (quatro) condutores, a equação 3:

$$R_f = 1,12 \times \frac{\rho}{\pi L} \left[\ln \frac{4L}{\sqrt{dh}} - 1 \right] \quad (3)$$

Em que:

ρ – resistividade elétrica do solo, em $\Omega \cdot m$;

L – comprimento do cabo contrapeso enterrado, em m ;

d – diâmetro do condutor enterrado, em m ;

h – profundidade de instalação dos cabos contrapeso.

As tensões induzidas no solo por acoplamento condutivo, para um solo estratificado em camadas, foram determinadas por meio da equação (4), conforme IGEM (2013):

$$U = \frac{\rho_1}{2\pi r} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{r}\right)^2}} \right] \quad (4)$$

Em que:

ρ_1 – resistividade elétrica do solo na camada superior, em $\Omega \cdot m$;

r – distância ao ponto de observação, em m ;

k – coeficiente de reflexão entre a camada superficial e a profunda, dado por

$\frac{(\rho_{n+1} - \rho_n)}{(\rho_{n+1} + \rho_n)}$, no modelo equivalente de duas camadas;

h – espessura da camada superior do solo, em m .

n – número de iterações.

Utilizando os parâmetros geométricos da tubulação em estudo, da(s) linha(s) de transmissão e respectivas estruturas, características das subestações terminais, parâmetros elétricos dos circuitos e respectivos condutores, resistividade elétrica do solo e resistência de aterramento das estruturas, e empregando modelos computacionais são realizadas simulações de interferências em regime permanente

(condições normais de operação das LTs) e em regime transitório (ocorrência de falta fase-terra nas LTs), para determinação dos seguintes parâmetros:

- ✓ Perfil de tensões induzidas no duto por acoplamento indutivo em regime permanente.
- ✓ Perfil de correntes longitudinais induzidas no duto por acoplamento capacitivo em regime permanente.
- ✓ Perfil de correntes longitudinais induzidas no duto por acoplamento indutivo em regime permanente.
- ✓ Valores das correntes de falta nas estruturas e subestações terminais em regime transitório (ocorrência de falta fase-terra nas LTs).
- ✓ Perfil de tensões nas estruturas das LTs em regime transitório (ocorrência de falta fase-terra nas LTs).
- ✓ Perfil de tensões induzidas no duto por acoplamentos indutivo e condutivo em regime transitório (ocorrência de falta fase-terra nas LTs).
- ✓ Perfil de tensões induzidas no solo, em relação ao terra remoto, por acoplamento condutivo, em regime transitório (ocorrência de falta fase-terra nas LTs).
- ✓ Perfil de tensões impostas ao revestimento isolante do duto por acoplamentos indutivo e condutivo em regime transitório (ocorrência de falta fase-terra nas LTs).
- ✓ Perfil de correntes longitudinais induzidas no duto por acoplamentos indutivo e condutivo em regime transitório (ocorrência de falta fase-terra nas LTs).

Por meio da comparação dos perfis de tensão resultantes com os critérios adotados, podem ser avaliados os riscos de: choques elétricos decorrentes de tensões de toque e tensões de passo nos pontos de afloramento da tubulação, danos ao revestimento isolante, ao material do duto e à dispositivos conectados eletricamente à tubulação.

Com base no perfil de tensões induzidas no solo pode ser calculada a tensão de passo pela variação de tensão num intervalo de 1 metro de distância na proximidade do ponto de afloramento do duto, como expresso na equação (5):

$$E_p = \frac{\Delta E_s}{d} \quad (5)$$

Em que:

ΔE_s – diferença de potencial no solo, entre dois pontos adjacentes, em V;

d – distância entre os pontos considerados, em m;

Nos casos dos cruzamentos com LTs, onde as estruturas compartilham a faixa de servidão do duto em estudo torna-se interessante a realização de análises específicas da distribuição das tensões de passo nas adjacências das referidas estruturas, quando da ocorrência de falta fase-terra nas LTs, segundo DUTRA (2008).

Caso constatadas violações aos critérios de segurança preceituados devem ser propostas ações de mitigação, após o que se realizaram novas simulações computacionais, considerando a aplicação das referidas medidas. Estas medidas serão tratadas no item 3.5 deste trabalho.

3.2.3.3 Critérios de segurança

O comprimento da zona de interferência é aquele onde a influência eletromagnética é significativa, entendida como distância a partir da qual a força eletromotriz induzida (fem) devido a uma corrente de falta com retorno pela terra é superior a 10 V / km.kA segundo DUTRA (2008).

A tensão total induzida em uma estrutura interferida cresce linearmente com o comprimento da exposição (paralelismo), porém, em situações reais, é limitada pela impedância associada à corrente de fuga pelo revestimento isolante do duto a qual, por sua vez, é determinada pela resistividade elétrica do solo.

Conforme o CIGRÉ WG-36.02, a zona de influência eletromagnética é definida numericamente como descrito na expressão (6) e mostrado na Figura 13:

$$Z = 200\sqrt{\rho} \quad (6)$$

Em que:

Z – comprimento da zona de interferência, em m;

ρ – resistividade elétrica do solo, em $\Omega \cdot m$;

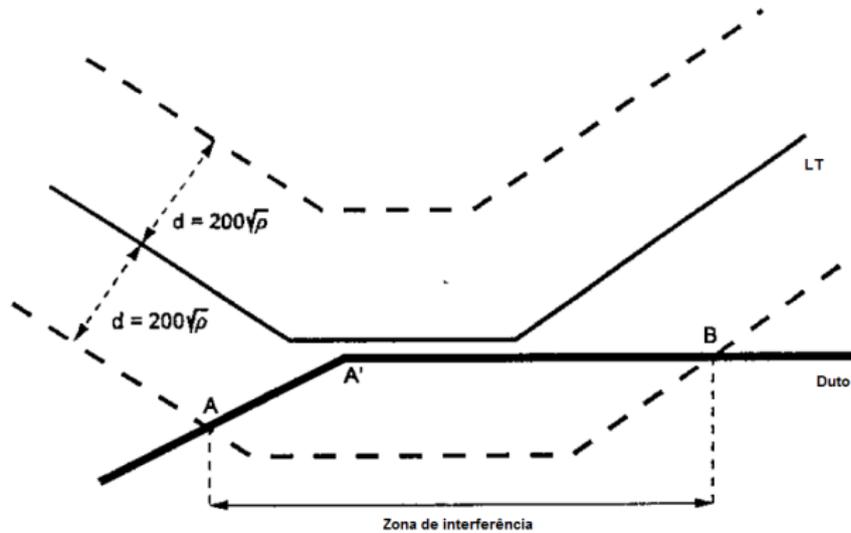


Figura 13 - Comprimento da zona de interferência eletromagnética

Fonte: CIGRÉ WG-36.02

O potencial sobre o revestimento isolante é caracterizado pela diferença de potencial entre o solo e o condutor metálico numa determinada região.

Conforme recomendação do Projeto de Norma COBEI nº. CE 3:09.11.5-001, o valor limite admissível para diferença de potencial imposta ao revestimento isolante da tubulação é de 5 kV.

3.3 ANÁLISE DAS TENSÕES NOS AFLORAMENTOS

As análises das tensões resultantes nos afloramentos são principalmente referente à tensão de toque e de passo, nas quais influencia diretamente na segurança humana da operação dos sistemas.

3.3.1 Limites de Tensões de Toque e Passo de Curta Duração

O potencial de toque é a máxima diferença de potencial que pode ocorrer entre o pé e a mão de um indivíduo para que não ocorra fibrilação ventricular pela circulação de corrente. A tensão de toque é caracterizada pela diferença de

potencial entre o solo e o condutor metálico exposto, como mostra a Figura 14, segundo NBR 5410-2005.

O potencial de passo é a máxima diferença de potencial que pode ocorrer entre os dois pés de um indivíduo para que não ocorra fibrilação ventricular pela circulação de corrente. A tensão de passo é caracterizada pela diferença de potencial quando os dois pés estão distantes 1 metro e repousam sobre linhas equipotenciais distintas, como mostra a Figura 15, segundo NBR 5410.

Os limites admissíveis para tensões de passo e toque serão determinados em conformidade com o disposto na ANSI / IEEE STD. 80, por meio das equações apresentadas a seguir:

$$E_p = (R_B + R_{2Fs}) \times I_B \quad (7)$$

$$E_t = (R_B + R_{2Fp}) \times I_B \quad (8)$$

Em que:

E_p – tensão de passo admissível, em V;

E_t – tensão de toque máxima admissível, em V;

R_B – resistência elétrica do corpo humano, considerada 1000 Ω ;

R_{2Fs} – resistência elétrica em série dos dois pés de um ser humano, em Ω ;

R_{2Fp} – resistência elétrica em paralelo dos dois pés de um ser humano, em Ω ;

I_B – corrente elétrica máxima admissível pelo corpo humano, em A;

A corrente elétrica máxima admissível pelo corpo humano I_B , considerando um indivíduo de 50 kg, é determinada por meio da expressão (9):

$$I_B = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (9)$$

Em que:

t – tempo de exposição à corrente elétrica, em segundos, sendo considerado o tempo de eliminação de faltas nas LTs: 0,5s e 1,0s.

As resistências elétricas R_{2Fs} e R_{2Fp} são calculadas por meio das equações (10), (11) e (12) simplificadas, considerando ausência de luvas e botas isolantes:

$$R_{2Fs} = 6,0 \times C_s \times \rho_s \quad (10)$$

$$R_{2Fp} = 1,5 \times C_s \times \rho_s \quad (11)$$

$$C_s = \frac{0,9 \times \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0,09} \quad (12)$$

Em que:

C_s – fator de correção do solo (igual a 1 no caso de ausência de correção);

ρ – resistividade elétrica do solo abaixo da camada superficial, em $\Omega \cdot m$;

ρ_s – resistividade elétrica da camada superficial do solo, em $\Omega \cdot m$;

h_s – espessura da camada superficial do solo, em m;

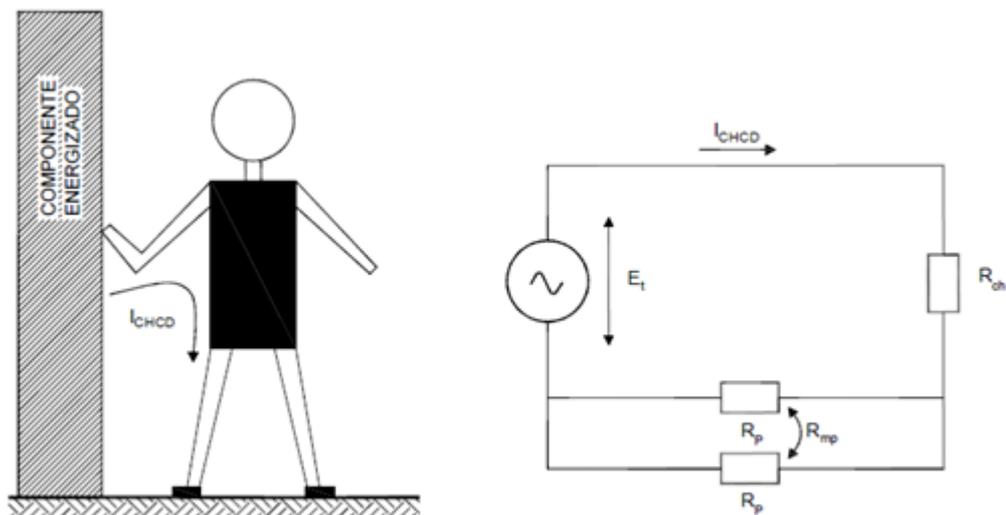


Figura 14 - Ilustração da Tensão de Toque.

Fonte NBR 5410.

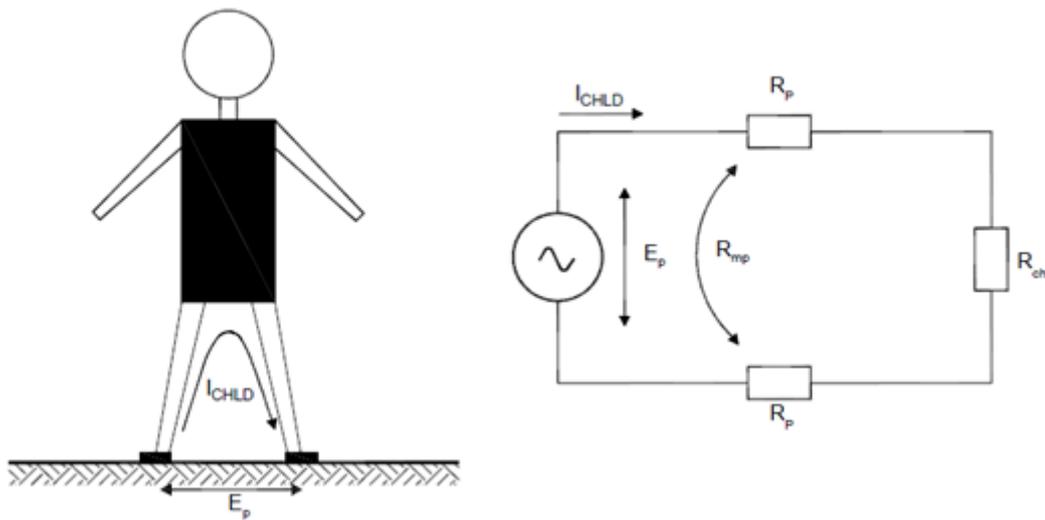


Figura 15 - Ilustração da Tensão de Passo.

Fonte NBR 5410.

3.3.2 Corrente de Choque de Longa Duração

A corrente de choque de longa duração permissível, também denominada corrente limite de largar de longa duração, é igual a 9 mA, conforme preceituado na Tabela 1 da norma ABNT NBR-15751.

Complementarmente a título referencial, são também considerados os seguintes valores de correntes de longa duração e respectivos efeitos no corpo humano, conforme mostrados na Tabela 1:

Tabela 1 – Efeitos e consequências do choque elétrico

CORRENTE	EFEITO
10 a 100 μ A	Fibrilação ventricular em indivíduos “eletricamente sensíveis” (cateterizados)
1 mA	Percepção cutânea
5 mA	Contrações musculares dolorosas
20 mA	Asfixia se exposto por período superior a 3 minutos e se trajeto atinge o diafragma
70 mA	Fibrilação ventricular se ocorrer exposição por período igual ou superior a 1 minuto
5 A	Queimaduras, asfixia, fibrilação

Fonte: ABNT NBR-15751.

O padrão IEEE STD. 80-2000 apresenta valores de resistividade típica para materiais usuais na mitigação de tensões de passo e toque em subestações. Todos

os materiais apresentados tiveram amostras analisadas e testadas, sendo utilizados para aumentar a resistividade elétrica da camada superficial do solo.

Na tabela 2 são dados os valores de resistividade de alguns materiais, que são determinados pelo pedão IEEE.

Tabela 2 - Resistividade típica dos materiais

MATERIAL	RESISTIVIDADE DA AMOSTRA MOLHADA ($\Omega.m$)	RESISTIVIDADE DA AMOSTRA SECA ($\Omega.m$)
CONCRETO	100	1.000.000
BRITA CALCÁREA Nº 2	3.000	7.000.000
BRITA GRANÍTICA Nº 3	5.000	1.500.000
BRITA GRANÍTICA Nº 5	10.000	2.600.000
ASFALTO	10.000	6.000.000

Fonte: IEEE STD 80-2000.

A Norma ABNT NBR-15751 considera os seguintes valores para as amostras de matérias descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Resistividade típica dos materiais

MATERIAL	RESISTIVIDADE DA AMOSTRA MOLHADA ($\Omega.m$)	RESISTIVIDADE DA AMOSTRA SECA ($\Omega.m$)
BRITA Nº 1, 2 ou 3	3.000	-
CONCRETO	21 a 100	1.200 a 280.000
ASFALTO	10.000 a 6.000.000	2.000.000 a 30.000.000

Fonte: NBR-15751.

Limites de tensões induzidas em regime permanente

Conforme recomendação estabelecida na norma ABNT NBR-5410, o valor limite admissível para tensões de longa duração é de 50 Vca.

Contudo, para efeito de estudos de interferência eletromagnética, o limite para adoção de medidas de mitigação recomendado pela NACE é o valor de 15 Vca, pois além da segurança humana existe a preocupação com a corrosão do aço para potenciais alternados acima destes patamares.

Distâncias de segurança

Conforme prescrito na norma ABNT NBR-5422, quaisquer equipamentos, maquinário, veículos que se fizerem presentes na faixa de servidão das LTs, seja para as obras de construção, bem como futuras atividades de manutenção na tubulação, deverão obedecer a uma distância mínima de segurança em relação aos cabos condutores, expressa, em metros, conforme equação 13:

$$D = a + 0,01 \times \left(\frac{D_v}{\sqrt{3}} - 50 \right) \quad (13)$$

Em que:

D_v - distância em metros, numericamente igual à tensão máxima de operação; da LT, em kV;

a - fator em metros, conforme a Tabela 4;

Tabela 4 - Fator de distância de segurança.

a=	NATUREZA DA REGIÃO
6,0 m	LOCAIS ACESSÍVEIS APENAS A PEDESTRES
8,0 m	RODOVIAS, RUAS E AVENIDAS
3,0 m	VEÍCULOS RODOVIÁRIOS E FERROVIÁRIOS
3,0 m	ESTRUTURAS TRANSPORTADORAS

Fonte: NBR 5422.

A Tabela 5 sumariza as distâncias mínimas de segurança a serem observadas, em função das classes de tensão das LTs:

Tabela 5 - Distâncias de segurança em função da tensão da LT.

NATUREZA DA REGIÃO	Classe de tensão					
	88 kV	138 kV	230 kV	345 kV	440 kV	500 kV
DISTÂNCIA CABO-SOLO EM LOCAIS ACESSÍVEIS APENAS A PEDESTRES	6,0 m	6,3 m	6,8 m	7,5 m	8,0 m	8,4 m
DISTÂNCIA CABO-SOLO EM RODOVIAS, RUAS E AVENIDAS	8,0 m	8,3 m	8,8 m	9,5 m	10,0 m	10,4 m
DISTÂNCIA A VEÍCULOS RODOVIÁRIOS E FERROVIÁRIOS	3,0 m	3,3 m	3,8 m	4,5 m	5,0 m	5,4 m
DISTÂNCIA A ESTRUTURAS TRANSPORTADORAS	3,0 m	3,3 m	3,8 m	4,5 m	5,0 m	5,4 m

Fonte: NBR 5422.

3.4 IMPLANTAÇÃO DE MEDIDAS MITIGADORAS

Esta seção tem como objetivo identificar todos os itens que devem conter os estudos de interferência eletromagnética e a partir destes itens as análises que são realizadas e função dos critérios de segurança mencionados, listar as medidas mitigadoras que em geral são propostas e que serão os temas do estudo de caso a ser realizado por este trabalho.

3.4.1 Apresentação dos Resultados dos Estudos de Interferência Eletromagnética

Em função dos cruzamentos e paralelismos entre as estruturas (linhas de transmissão e gasodutos), conforme mostra a Figura 16, é realizado o georeferenciamento destas estruturas para apropriar as distâncias em um modelo computacional. Na Figura 16, que foi utilizada como exemplo de um caso típico de interferência, aparece a linha de transmissão em tracejado e o gasoduto de distribuição em linha contínua. Neste caso pode se visualizar 2 cruzamentos, bem como trechos de paralelismo da linha de transmissão e o gasoduto de distribuição.

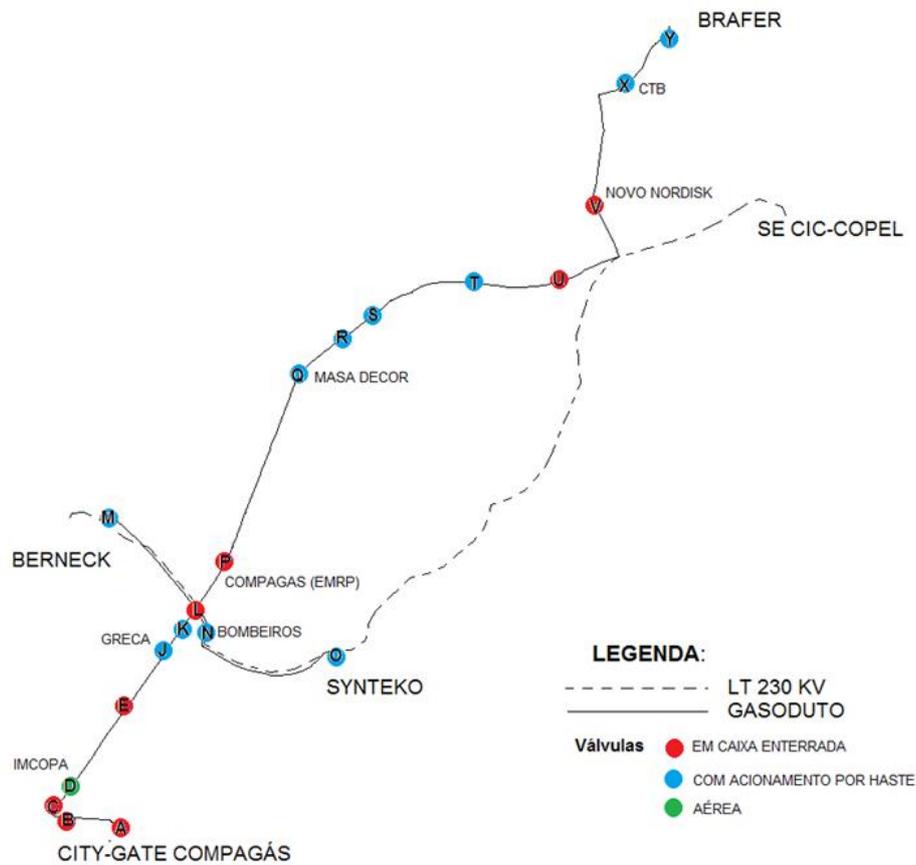


Figura 16 - Cruzamento de LT's e gasodutos.

Fonte: ELILSON (2010).

Em função dos parâmetros informados pela concessionária de energia elétrica detentora do sistema elétrico de potência, são realizados os cálculos de curto circuito nas estruturas envolvidas no estudo. Estes cálculos de curto circuito para efeitos condutivo são os de sequência zero e para efeitos de acoplamento indutivo são realizados os de sequência positiva e negativa. A Figura 17 mostra a simulação de curto circuito realizada em um estudo de caso.

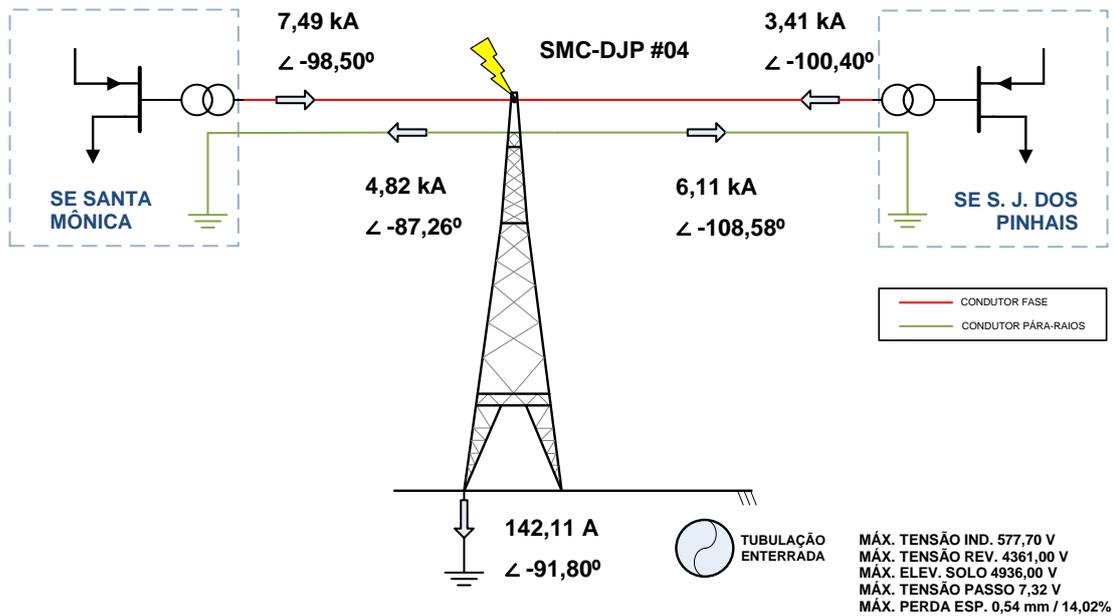


Figura 17 - Cálculo de curto circuito.

Fonte: GUTIERREZ (2014).

Com as informações de curto circuito das linhas de transmissão e as informações dos dutos, bem como suas respectivas posições são informados estes parâmetros como entrada dos programas computacionais que irão fazer as simulações, a fim de encontrar as tensões induzidas no duto. Conforme simulações computacionais das estruturas envolvidas são obtidos os gráficos mostrados na Figura 18.

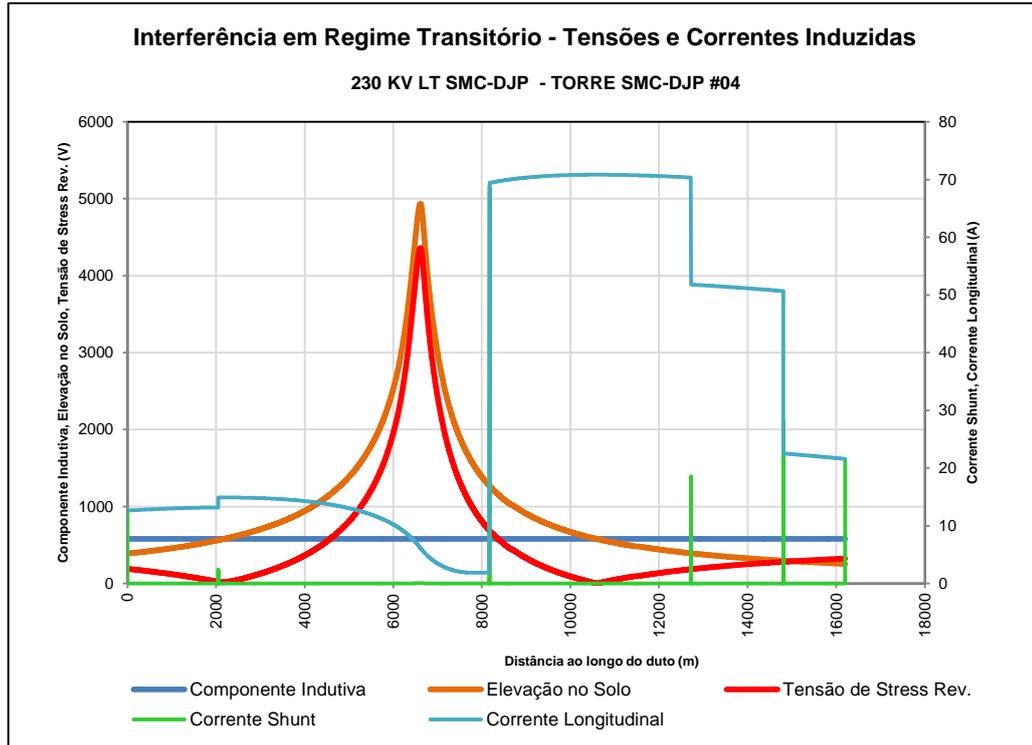


Figura 18 - Resultado das simulações computacionais de Tensões e Correntes.

Fonte: GUTIERRES (2014).

Em função destes gráficos e valores obtidos nas simulações e conforme a análise dos mesmos são realizados os cálculos de tensões de toque e de passo admissíveis, conforme ilustram as Figuras 19 e 20.

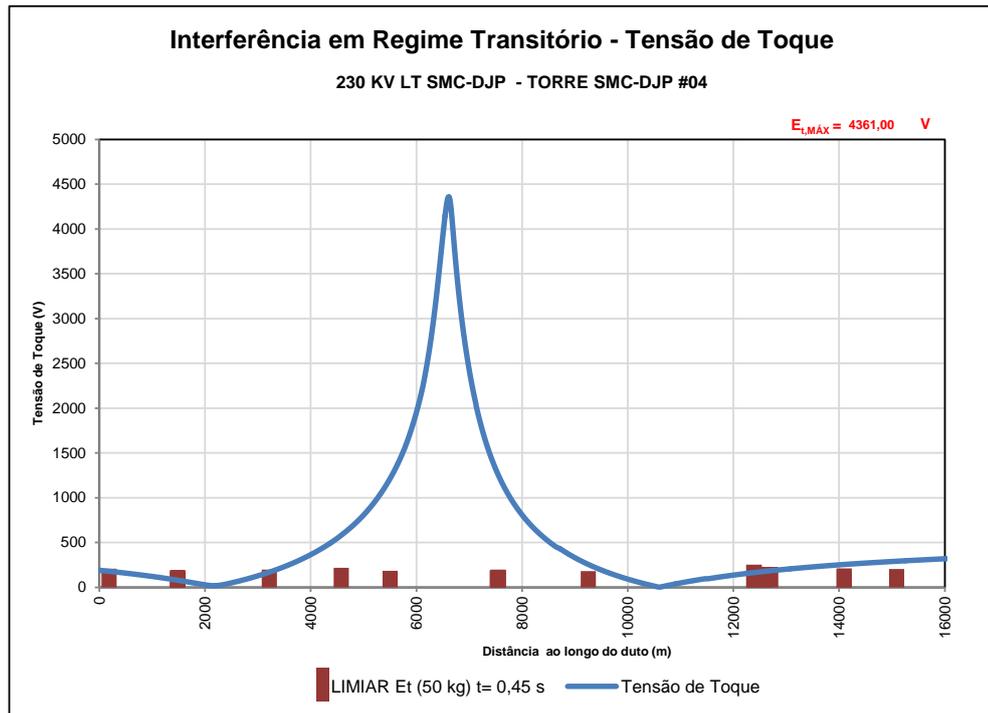


Figura 19 - Cálculo da tensão de toque admissível.

Fonte: GUTIERREZ (2014).

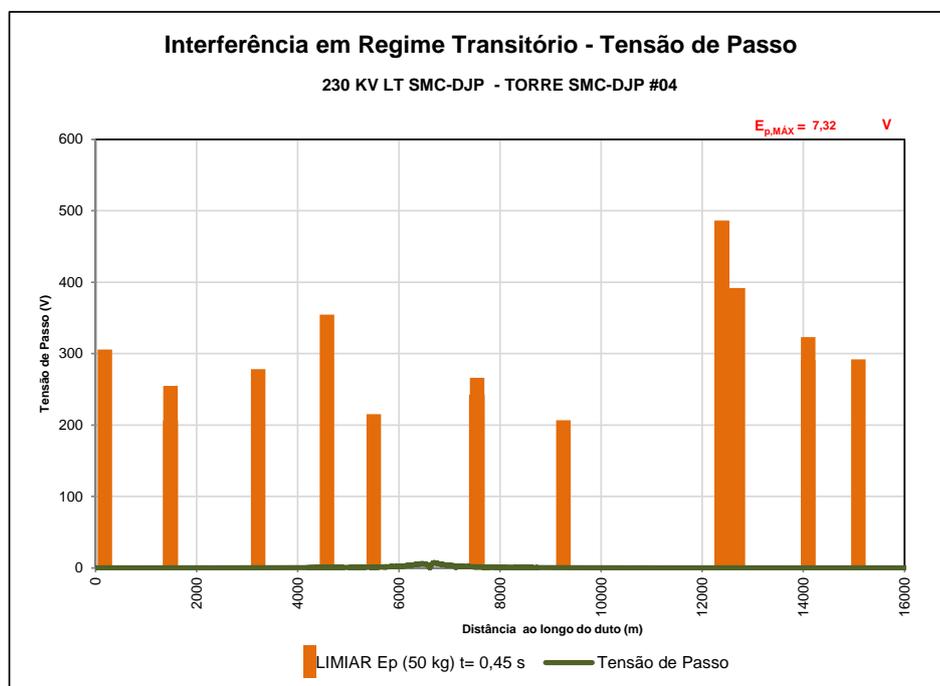


Figura 20 - Cálculo da tensão de passo admissível.

Fonte: GUTIERREZ (2014).

Utilizando estas análises é realizado o cruzamento destes dados nos afloramentos e equipamentos dos gasodutos, ou seja, são criadas tabelas que relacionam as tensões encontradas nas simulações e as tensões admissíveis calculadas em função das condições dos afloramentos. A Tabela 6 mostra um exemplo do exposto.

Tabela 6- Apresentação dos dados de simulações.

Estratificação do solo	ρ_1 ($\Omega.m$)	Tensões máximas admissíveis (V)									
		Solo natural		Cobertura de 15 cm de brita		Cobertura de 10 cm de pedra		Cobertura de 5 cm de asfalto		Cobertura de 5m cm de asfalto manta de PVC	
		V_{toque}	V_{passo}	V_{toque}	V_{passo}	V_{toque}	V_{passo}	V_{toque}	V_{passo}	V_{toque}	V_{passo}
E1	363	253	521	764	2563	1041	3673	1407	5137	>2500	>5000
E2	55	177	218	741	2473	1009	3544	1356	4930		
E3	120	193	282	746	2492	1016	3572	1367	4974		
E4	103	189	265	745	2487	1014	3564	1365	4968		
E5	190	211	351	752	2514	1024	3602	1380	5026		
E6	305	239	464	760	2548	1035	3650	1398	5099		
E7	483	283	640	772	2597	1054	3723	1427	5217		
E8	220	218	381	754	2523	1026	3614	1383	5042		
E9	660	326	814	784	2644	1072	3794	1457	5337		
E10	285	234	445	758	2541	1033	3641	1395	5090		
E11	262	229	422	757	2535	1031	3631	1392	5075		
E12	222	219	383	754	2523	1027	3616	1384	5043		
E13	240	223	400	755	2528	1029	3623	1387	5055		
E14	259	228	419	756	2534	1031	3631	1390	5068		

Fonte: ELILSON (2010).

A partir da análise destes dados é que são propostas as medidas mitigadoras em função da necessidade, ou não, segundo critérios de segurança operacional, principalmente relacionados a segurança humana.

3.5 APRESENTAÇÃO DAS MEDIDAS MITIGADORAS

Conforme mencionado no item 3.5 os estudos de interferência eletromagnética apontam medidas mitigadoras nos afloramentos e componentes do duto para atenuação das tensões elevadas provocadas por transitórios elétricos do sistema elétrico de potência. A problemática destas medidas, conforme mencionado no Capítulo 1 deste trabalho é que não existem normas brasileiras específicas referentes à indicação destas medidas mitigadoras. Neste sentido um dos objetivos deste trabalho, utilizando o estudo de caso proposto no Capítulo 4, realizar uma classificação destas medidas, bem como subsidiá-las por meio de normas internacionais e favorecer a compatibilização destas medidas entre sistema elétrico de potência, integridade de equipamentos e projetos de proteção catódica.

Em função de consulta a estudos de interferência eletromagnética, conforme Elilson 2010 pode-se citar algumas medidas mitigadoras que são utilizadas para mitigação dos riscos elétricos:

- ✓ Aterramentos localizados nos gasodutos.
- ✓ Utilização de plataformas isolantes e de equipotencialização.
- ✓ Execução de malha de aterramento nos afloramentos.
- ✓ Inserção de juntas de isolamento elétrico, conforme Inserção de PCRs, dispositivos semicondutores que fazem a drenagem de tensões alternadas e bloqueiam tensões CC, impedindo a fuga de corrente de proteção catódica para solo.

A seguir nesta seção será realizada uma descrição sucinta de cada medida mitigadora, a fim de explicar o propósito e método de atuação de cada medida mitigadora.

3.5.1 Aterramento Localizado

Esta técnica de mitigação é utilizada quando os potenciais nos afloramentos dos gasodutos, bem como no seu revestimento estão no limite de suportabilidade do revestimento do duto, ou causando problemas para segurança humana nos afloramentos. Basicamente consiste na solda de pontos de aterramento ao longo do

duto, cujas distâncias entre aterramento e quantidade de pontos a serem inseridos, para atenuação dos potenciais de indução, devem ser calculados e simulados.

Esta técnica, apesar de implantação simples, apresenta problemas de compatibilização com o sistema de proteção catódica da tubulação, uma vez que fornece o referencial da terra para o mesmo. A Figura 21 mostra o exemplo desta implantação.

Aterramentos localizados

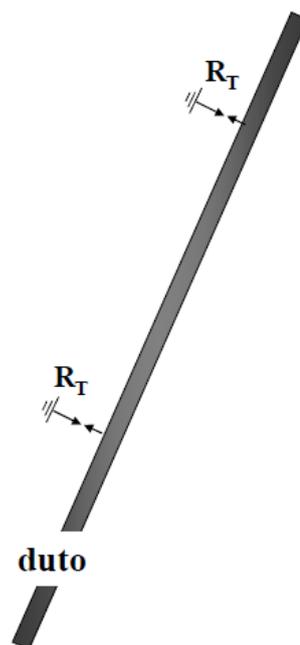


Figura 21 - Colocação de aterramento no gasoduto.

Fonte: ELILSON (2010).

3.5.2 Plataforma Isolante

Esta técnica de mitigação é utilizada quando os potenciais nos afloramentos dos gasodutos e principalmente nos afloramentos são elevados e acima dos limites admissíveis para segurança humana. Nestes casos nos afloramentos (válvulas de operação manual, estações de recebimento) são construídas plataformas com chapa *multigrip*, por exemplo, que são equipotencialização por meio de cabos ao duto fazendo que em um caso de elevação de potencial, tanto os pés como mãos de

quem estiver operando estejam no mesmo potencial. A Figura 22 demonstra este tipo de plataforma.

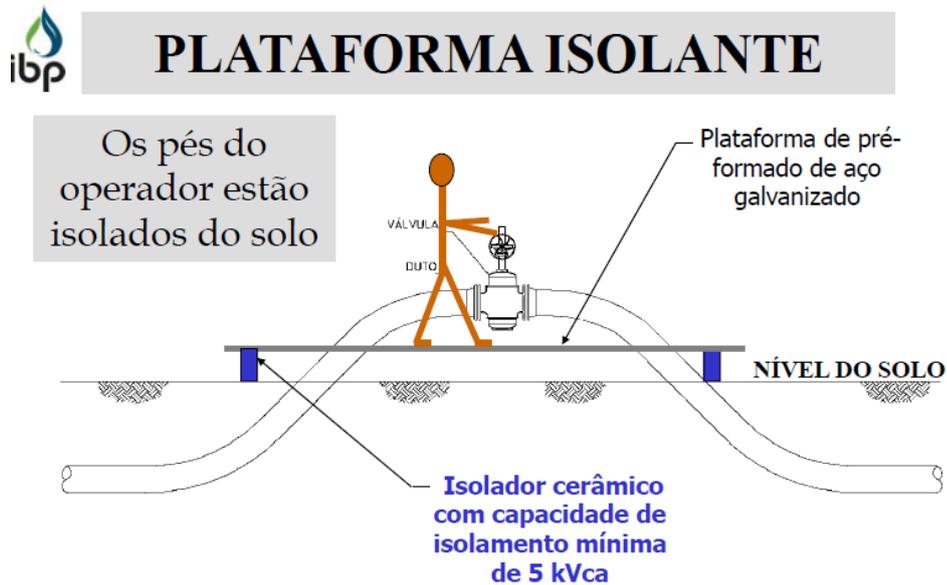


Figura 22 - Inserção de plataformas isolantes.

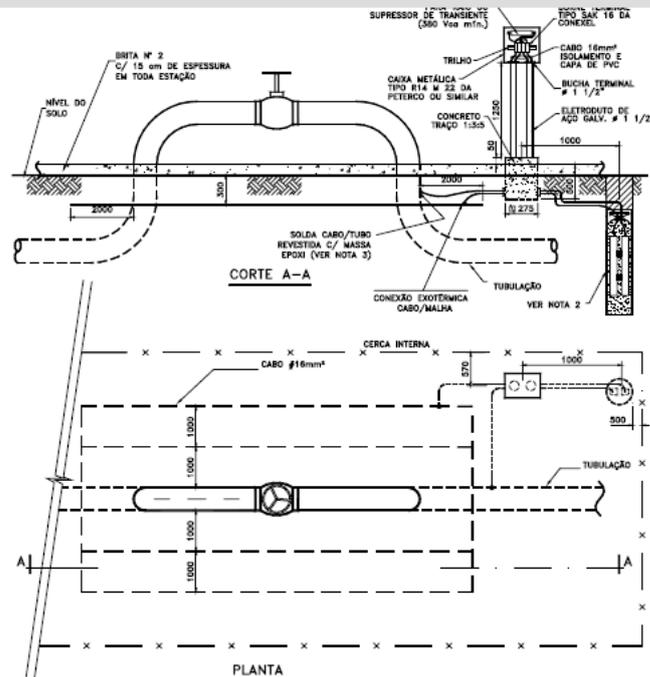
Fonte: ELILSON (2010).

Esta solução, embora bastante indicada no caso de mitigação em afloramentos, deve ser bem avaliada em sua utilização, pois os custos para sua implantação, bem como para sua manutenção, são bem elevados.

3.5.3 Malha de Aterramento

Esta técnica de mitigação é utilizada quando os potenciais nos afloramentos dos gasodutos e principalmente nos afloramentos são elevados e acima dos limites admissíveis para segurança humana. Entretanto, esta se torna viável quando a solução de plataforma isolante fica limitada para os afloramentos. Ou seja, para regiões mais extensas, ou nos afloramentos em que não seja viável a instalação de plataformas isolantes, a execução da malha de aterramento torna-se mais viável técnica e economicamente. A Figura 23 demonstra a implantação da malha de aterramento em uma válvula.

MALHA DE TERRA



**Malha
de
Equalização
de
potenciais**

696

Figura 23 - Colocação de malha de aterramento nos afloramentos.

Fonte: ELILSON (2010).

3.5.4 Instalação de Desacopladores

Esta técnica de mitigação é utilizada quando os potenciais no revestimento dos gasodutos são elevados e podem causar danos aos dutos. Também são utilizadas quando as tensões são constantes na tubulação em regime permanente do sistema elétrico de potência, não só em caso de regime transitório como os casos anteriores. A Figura 24 mostra este tipo de instalação.

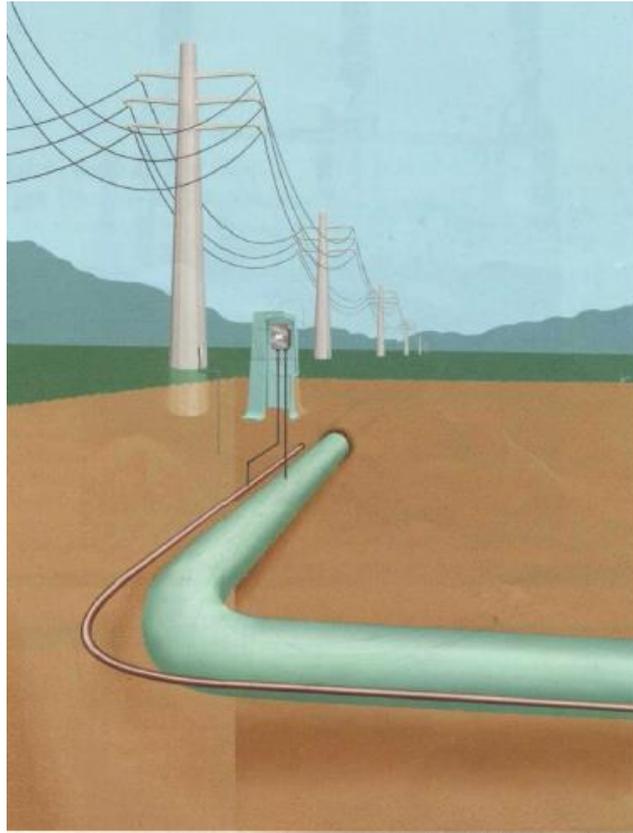


Figura 24 - Inserção de PCRs no duto para drenagem do AC.

Fonte: IEC (2015).

Esta técnica de mitigação resolve os problemas do revestimento e tensões em regime permanente no duto, entretanto seu projeto torna-se complexo, em função da compatibilização da instalação destes desacopladores com o sistema de proteção catódica da tubulação. Ou seja, os desacopladores são interligados a malha de aterramento e para os mesmos não influenciarem no rendimento do sistema de proteção catódica, no projeto devem ser estudadas as condições do solo, materiais da malha de aterramento e características de bloqueio de tensão contínua dos desacopladores.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou uma breve explanação sobre os estudos de interferência eletromagnética, sua metodologia e análises dos resultados. Também

foi realizada uma breve explanação sobre os tipos de medidas mitigadoras adotados na prática, bem como sua implantação nos afloramentos. A partir das explicações descritas e desta fundamentação teórica descritas nos capítulos 2 e 3, o Capítulo 4 e o Capítulo 5 apresentarão a metodologia do estudo de caso realizado e as análises de resultados a partir deste estudo.

4. METODOLOGIA PARA ANÁLISES MITIGADORAS PARA CASOS DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA

Para alcançar o objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso, que é a análise de medidas mitigadoras para casos de interferência eletromagnética em dutos metálicos na distribuição de gás natural serão relatados os estudos de interferência e a implantação de medidas mitigadoras realizadas no ramal Fazenda Rio Grande, pertencente a RDGN da COMPAGAS.

Esta obra iniciou-se no segundo semestre de 2012, com uma extensão aproximada de 12 Km, e foi concluída com a implantação das medidas mitigadoras no primeiro semestre de 2015. Sendo assim, os autores puderam observar minuciosamente todas as etapas de construção e implantação. As informações coletadas em campo foram confrontadas com normas vigentes e boas práticas de construção, bem como com normas e estudos internacionais, visando consolidar conceitos e propor critérios para a implantação das medidas mitigadoras.

O processo de implantação de uma rede de gás é uma obra complexa, uma vez que, em sua grande maioria, está em faixas públicas, envolvendo grandes extensões e inúmeras interferências com outros sistemas (dutos de outras companhias).

Existe uma série de licenças (órgãos ambientais, prefeituras locais) necessárias para a execução destas obras e os cuidados com segurança devem ser redobrados, pois, muitas vezes, a interferência com a comunidade é muito próxima. O processo de lançamento de dutos é um trabalho minucioso, sendo que muitas variáveis devem ser controladas (revestimento do duto, soldas, tensão que os dutos são submetidos).

O estudo de caso proposto para análise desenvolveu-se primeiramente através da contratação da executante dos serviços por um processo de licitação, já que a COMPAGAS é uma empresa de economia mista. A documentação da obra necessária para a análise foi coletada na sequência de desenvolvimento da mesma, ou seja, primeiramente adquiriram-se as informações contidas no edital de licitação (Memorial Descritivo, Especificações Técnicas, Informações do Edital) e depois a

documentação com a contratada (relatórios de obra, consultas técnicas, planejamento da obra, relatórios de implantação).

A observação direta do processo executivo contou com a inspeção em campo do pesquisador nas etapas pré-estabelecidas e detalhadas conforme descritas no capítulo 3 deste trabalho. Outros pontos observados na análise de resultados foram coletados através da experiência de técnicos em transferência de custódia e da fiscalização em outras obras de características semelhantes.

Primeiramente realizou-se o detalhamento dos pontos a serem observados na implantação das medidas mitigadoras. Conforme descrito no capítulo 3, que detalha todas as etapas do estudo de interferência eletromagnética. Assim listou-se os pontos que seriam observados na execução da obra. Em função dos objetivos traçados para este trabalho de conclusão de curso, a análise das tensões nos afloramentos e escolha das medidas mitigadoras para os mesmos foram os pontos de maior atenção neste estudo de caso.

Listados os afloramentos com tensões críticas foram analisadas as medidas adotadas, bem como os critérios normativos que serviram de referência para esta escolha. Neste sentido, foi acompanhada a execução e posteriormente seu comissionamento, a fim de verificar a eficácia da sua instalação.

Com esta pesquisa de campo, juntamente com a análise de outros casos semelhantes foi possível estabelecer alguns critérios para a escolha das medidas mitigadoras. Através do apoio de normas internacionais, como a IGEM e IEEE foi possível estabelecer critérios e definir melhores soluções para os afloramentos, quando submetidos a tensões de toque e de passo superiores às admissíveis.

Em função das análises supracitadas foi possível realizar uma descrição final classificando e descrevendo critérios para a implantação das medidas mitigadoras nos afloramentos, bem como descrever recomendações gerais para a implantação de gasodutos de distribuição quando estes estão sujeitos a interferências eletromagnéticas e na etapa de projeto.

4.2 JUSTIFICATIVA DA METODOLOGIA DE ESTUDO DE CASO

Este capítulo descreve a metodologia utilizada para realizar este trabalho, como ele foi elaborado e as técnicas em que foi baseado. Chama-se metodologia a uma coleção de métodos, técnicas e ferramentas para atingir um objetivo. Já um método é uma sequência de procedimentos (PRADO, 2001).

Yin (1994) afirma que:

“[...] um estudo de caso é uma pesquisa empírica que investiga um fenômeno contemporâneo dentro de um contexto da vida real quando os limites entre o fenômeno e o contexto não estão claramente definidos e onde múltiplas fontes de evidência são utilizadas”.

De forma sintética, Yin (1989) apresenta quatro aplicações para o Método do Estudo de Caso:

- a) Para explicar ligações casuais nas intervenções na vida real que são muito complexas para serem abordadas pelas “*surveys*” ou pelas estratégias experimentais.
- b) Para descrever o contexto da vida real no qual a intervenção ocorreu.
- c) Para fazer uma avaliação, ainda que forma descritiva, da intervenção realizada.
- d) Para explorar aquelas situações onde as intervenções avaliadas não possuam resultados claros específicos.

Baseado nisto, concluiu-se que o estudo de caso era o método mais adequado para a aplicação neste trabalho. No entanto, teve que tomar certos cuidados para empregá-lo de forma adequada, e obter resultados satisfatórios advindos de informações fidedignas e evitar conclusões tendenciosas por parte do pesquisador.

A pesquisa desenvolvida, inicialmente tem um embasamento teórico sobre o método da implantação de uma rede, sua execução e forma de planejamento para a realização da obra. Posteriormente são analisados os projetos, estudos e dados de uma obra, realizados através da coleta do elemento informação e observação direta.

Assim, de acordo com o presente objetivo deste trabalho de conclusão de curso, a pesquisa compreende classificar como um estudo de caso em que segundo Gil (1999, p.73),

[...] é caracterizado pelo estudo profundo e exaustivo de um ou de poucos objetos, de maneira a permitir conhecimentos amplos e detalhados do mesmo, tarefa praticamente impossível mediante os outros tipos de delineamentos considerados.

Desta forma, a pesquisa classifica-se como um estudo de caso qualitativo e descritivo, o qual para Gil (2002, p.42) “as pesquisas descritivas têm como objetivo primordial a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis”. A exposição da pesquisa descritiva segundo Beuren (2006, p.80),

[...] configura-se como um estudo intermediário entre a pesquisa exploratória e explicativa, ou seja, não é tão preliminar como a primeira nem tão profunda como a segunda. Nesse contexto, descrever significa identificar, relatar, comparar, ente outros aspectos.

De acordo com Richardson (1999, p.80) “a metodologia qualitativa pode descrever a complexidade de determinado problema, analisar a interação de certas variáveis, compreender e classificar processos dinâmicos vividos por grupos sociais”.

4.3 A CONDUÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Podem-se obter evidências a partir de seis fontes de dados: documentos, registros de arquivos, entrevistas, observação direta, observação participante e artefatos físicos YIN (1989). Neste trabalho foram utilizadas quatro destas seis fontes de dados, descritas a seguir.

4.3.1 Documentação

Sua finalidade principal é corroborar e aumentar as evidências vindas de outras fontes. É possível fazer inferências a partir da análise da qualidade dos registros e dos documentos (YIN, 1989).

Foram coletadas da companhia distribuidora especificações técnicas, editais da obra, memorial descritivo, cronograma da obra, planilhas, manuais da qualidade,

procedimentos padrão. Alguns documentos não puderam ficar em poder do pesquisador, foram apenas apresentados e explicados pelos entrevistados.

4.3.2 Dados Arquivados

Podem ser usados em conjunto com outras fontes de informações tanto para verificar a exatidão como para avaliar dados de outras fontes (YIN, 1989). Foram usados dados organizacionais, orçamentos e cronogramas, relatórios de acompanhamento, relatos de desempenho, mapas e quadros de controles que foram verificados junto à fiscalização e executores da obra. Estes documentos, por serem de posse da contratada e pelo receio dos entrevistados, não puderam ficar de posse do pesquisador, mas foram importantes, principalmente na análise do planejamento da obra.

4.3.3 Entrevistas

Como o objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso é a análise das medidas mitigadoras, optou-se na pela entrevista aberta, pois se acredita que desta forma, mais informações seriam coletadas da fiscalização, bem como da contratada para a execução da obra. É importante ressaltar que o interesse desta pesquisa é a análise da implantação das medidas mitigadoras.

4.3.4 Observação Direta

Ao visitar o local de estudo, o pesquisador se estiver preparado pode fazer observações e coletar evidências, que são úteis para prover informações adicionais sobre o tópico em estudo. Para aumentar a confiabilidade das observações, além de se ter roteiro definido, pode-se designar mais de um observador e comparar os resultados das observações relatadas para se eliminar diferenças (YIN, 1989).

Foram feitas observações diretas e coletadas evidências pelo pesquisador e pelos colaboradores, inclusive fotos nas obras.

4.4 LIMITAÇÕES

O método de pesquisa adotado restringiu-se aos dados e informações coletados na empresa contratada da obra do estudo de caso. Este estudo limitou-se a pesquisa dos departamentos de obras e fiscalização que estavam diretamente envolvidos na execução e gerenciamento da implantação do gasoduto de distribuição.

Além deste estudo de caso, na análise do mesmo, foram utilizadas informações de outras obras com especificações técnicas semelhantes.

A pesquisa também se limitou ao prazo de 6 meses, na qual se desenvolveu a obra.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

A fim de atender o objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso, bem como os objetivos específicos, este capítulo de análise de resultados foi estruturado da seguinte forma:

- ✓ Contexto do gasoduto de distribuição.
- ✓ Estudo de interferência eletromagnética do estudo de caso.
- ✓ Projeto executivo das medidas mitigadoras.
- ✓ Acompanhamento da implantação das medidas mitigadoras.
- ✓ Análise das medidas mitigadoras.

5.1 CONTEXTO DO GASODUTO DE DISTRIBUIÇÃO

A COMPAGAS é uma empresa de economia mista, que recebeu do Governo do Estado do Paraná a concessão para explorar o serviço público de fornecimento de gás canalizado para indústrias, residências, estabelecimentos comerciais e postos de combustíveis.

Constituída em dezembro de 1994, iniciou suas atividades em maio de 1995. Sua acionista majoritária é a Companhia Paranaense de Energia (COPEL), que detém 51% de suas ações. O restante das ações pertence a Petrobras Gás S.A “GASPETRO”, com 24,5% e a Mitsui Gás e Energia, com 24,5% (Manual do Consumidor, 2015).

A COMPAGAS - Companhia Paranaense de Gás é responsável pela distribuição do gás canalizado no Estado do Paraná. O gás é proveniente da Bolívia, o qual é extraído de poços de exploração na região de “*Santa Cruz De La Siera*” e é conduzido através de gasodutos de transporte até o Brasil. Quando o gasoduto entra no Brasil, na cidade de Corumbá-MS, fica sob a responsabilidade da TBG (Transportadora Brasileira de Gás) que entrega a cada concessionária de estado, a fim das mesmas realizarem a distribuição nos estados, conforme mostra a Figura 25.

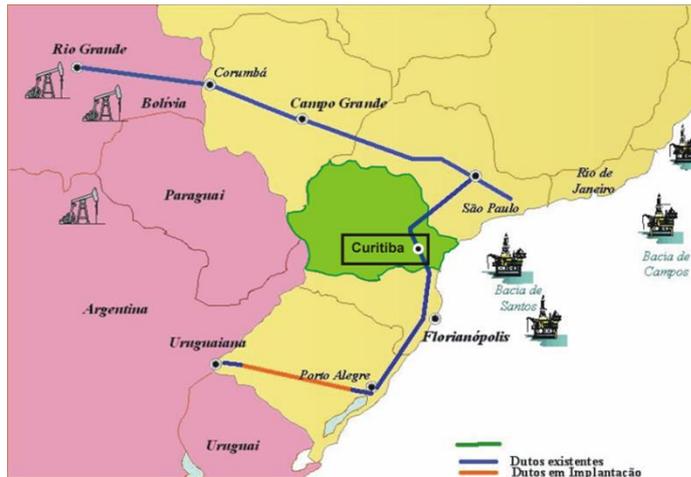


Figura 25 - RDGN Gasoduto Brasil-Bolívia TBG

Fonte: Manual do Consumidor Industrial (2015).

Os locais de entrega em cada estado são *SITES*, denominados “*CITY GATE*” e no caso da COMPAGAS está localizado em Araucária – Paraná. No *CITY GATE* o gás natural é odorizado e distribuído através de tubulações, gasodutos de distribuições, nas regiões da: Cidade Industrial de Curitiba, Campo Largo, Balsa Nova, São José dos Pinhais, Curitiba, Palmeira e Ponta Grossa, como ilustra a Figura 26.

É importante salientar que a pressão de entrega do *CITY GATE* é de 35 kgf/cm², existindo a redução desta pressão ao longo da rede para 17, 7, 4, 2, e 1,0 kgf/cm², a fim de atender clientes: industriais, cogeração, postos GNV, comerciais e residenciais.



Figura 26 - RDGN no Paraná

Fonte: Manual do Consumidor Industrial – 2015.

Para o controle dos diferentes níveis de pressão são instalados equipamentos, estações de redução de pressão, que realizam a redução e o controle da pressão do gás, até as pressões de entrega ao cliente, bem como são instaladas válvulas de bloqueio de atuação manual em caso da necessidade de fechamento de um ramal da RDGN.

Grande parte dos equipamentos de redução de pressão e praticamente todas as válvulas de bloqueio são instaladas em caixas subterrâneas. Utilizam-se dutos metálicos em aço carbono para distribuição em 35 kgf/cm² e dutos de PEAD (polietileno de alta densidade), para pressão de 4kgf/cm². Os dutos de aço são fabricados de acordo com a especificação e requisitos técnicos para a fabricação de dutos de aço de condução sob pressão de óleo e gás, API 5L Gr.245 (PSL 1), tendo espessuras calculadas de acordo com a classe de pressão e externamente são revestidos com uma camada plástica de polietileno tripla camada extrudado.

Estes dutos, assim como alguns equipamentos, são abrigados abaixo do nível do solo, normalmente instalados em faixas públicas, e estão sujeitos à interferência de obras dos órgãos públicos das cidades e de outras concessionárias como Copel, Sanepar e Telefonia, tornando-se um sistema complexo no que diz respeito a interferências com outros sistemas.

5.1.1 Objeto do Estudo de Caso

O ramal da Fazenda Rio Grande foi idealizado a fim de atender os clientes desta região a partir de uma linha tronco de 35 kgf/cm². Este ramal foi construído em aço e cruza com linhas de transmissão da ELETROSUL e da COPEL ao longo dos seus 12 km de implantação. A figura 27 mostra o detalhe do traçado deste ramal.

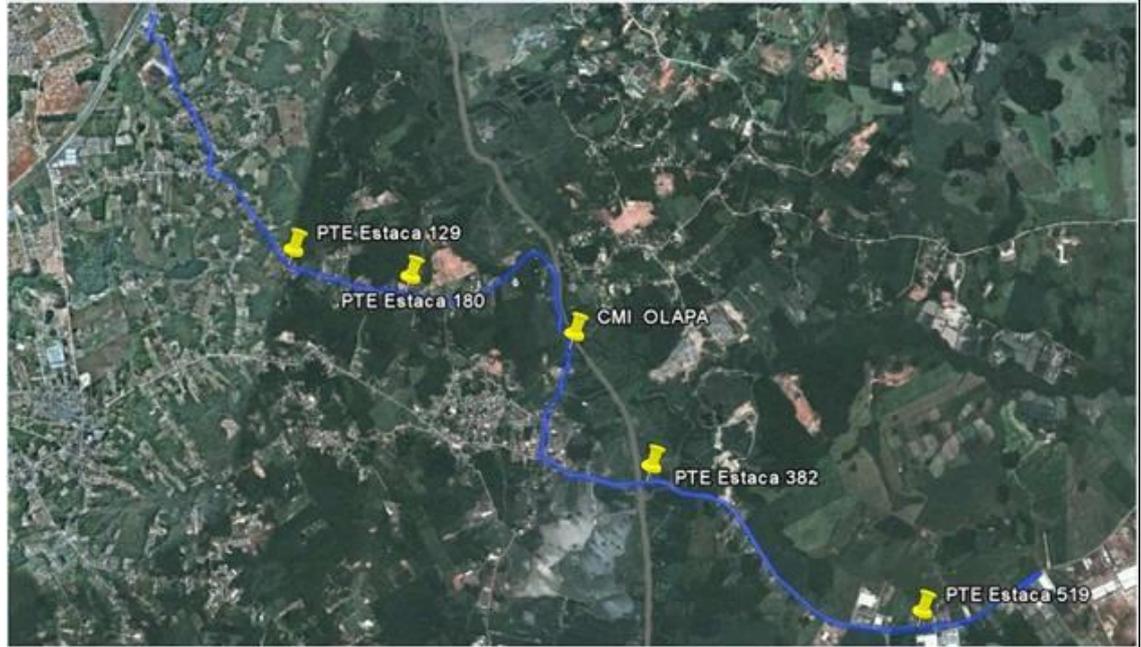


Figura 27 – Detalhe do traçado do ramal Fazenda Rio Grande

Fonte: API, 2013.

O duto possui as seguintes características mecânicas, conforme abaixo:

- ✓ Diâmetro: 6" – Comprimento: 45,7 metros – Classe 300#.
- ✓ Diâmetro: 8" – Comprimento: 11.442 metros – Classe 150#.
- ✓ Material: Aço Carbono API 5L X Gr. 245.
- ✓ Comprimento Total: 11.487,7 metros
- ✓ Revestimento: Polietileno extrudado tripla camada.

Conforme já exposto, para a operação destes gasodutos de distribuição são necessários elementos como: válvulas de bloqueio, ERPs, PTs e EMRPs. Abaixo será realizado um breve descritivo sobre estes afloramentos, uma vez que se tratam de elementos importantes na análise deste trabalho.

Estação Redutora de Pressão (ERP) – Conjunto de equipamentos destinados a reduzir a pressão de uma determinada rede de distribuição de gás. Em geral trata-se de uma estação metálica instalada no interior de uma caixa de concreto subterrânea com dimensões de 2m x 3m x 6m. A Figura 28 mostra com detalhes a ERP.



Figura 28 – Detalhe da ERP

Fonte: Autoria Própria.

Estação de Medição e Redução de Pressão (EMRP) – Conjunto de equipamentos destinados a reduzir a pressão para níveis adequados e medir o volume de gás consumido. Estas instalações em geral são aéreas e os equipamentos mecânicos são colocados apoiados em uma base de concreto e são instaladas dentro da propriedade do cliente industrial. Tanto a jusante do equipamento, como a montante existem juntas de isolamento elétrico que isolam eletricamente a saída e entrada do equipamento. A Figura 29 mostra a EMRP em um cliente.



Figura 29 - Detalhe de uma EMRP

Fonte: Autoria Própria.

Ponto de Teste (PT) – Ponto da rede de gás natural pelo qual é possível realizar a medição dos potenciais DC, a fim de conferir os níveis de tensão fornecidos pelo sistema proteção catódica estão adequados para finalidade de proteção contra a corrosão. Em resumo, a estrutura consiste em um cabo que é soldado diretamente no duto, que é sustentado por uma caixa metálica, ou moirão de concreto, no qual se realiza as medições. A Figura 30 mostra detalhes do PT.



Figura 30 - Detalhes do Ponto de Teste (PT)

Fonte: Autoria própria.

Válvula de Bloqueio Intermediária – dispositivo que restringe total ou parcialmente o fluxo de gás e é instalado ao longo da rede de distribuição de gás. Este dispositivo consiste numa válvula de bloqueio do tipo esfera que é instalada em uma estrutura de concreto subterrânea. A Figura 31 mostra a válvula de bloqueio.



Figura 31 - Detalhe de uma válvula de bloqueio

Fonte: Autoria Própria.

Em função do exposto, segue abaixo a Tabela 7 que identifica os principais afloramentos deste estudo de caso.

Tabela 7 – Tabela com identificação dos afloramentos do ramal Fazenda Rio Grande

Afloramentos da Fazenda Rio Grande					
TAG	Estaca	Coordenadas UTM		Localização	Km
		Norte	Este		
01	002	7171285,71	675782,17	ERP do Km 0+000	0,03
02	129	7169736,12	674080,21	PT Próximo a Torre de AT	2,58
	162	-	-	Válvula 01	3,24
03	180	7168744,89	674100,07	PT Central as 4 torres de AT	3,60
04	286	7167283,63	673938,79	CMI da interlig. com o OLAPA	5,72
	326	-	-	Válvula 02	6,25
05	382	7166435,04	673064,94	PT Na margem do Rio Iguaçu	7,64
	487	-	-	Válvula 03	9,74
06	519	7163976,01	672450,16	Defronte a Subestação Elétrica	10,38
	570	-	-	Válvula 04	11,40
07	571+10	7163094,70	673074,00	ERP Km final	11,43

Fonte: API (2013).

5.2 ESTUDO DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA DO ESTUDO DE CASO

Neste item será detalhado como foi realizado o estudo de interferência eletromagnética do Ramal da Fazenda Rio Grande, bem como foram realizadas as análises nos afloramentos do duto da COMPAGAS. Conforme já mencionado o encaminhamento do duto para a execução do ramal tem cruzamentos com linhas de transmissão da ELETROSUL e COPEL e um paralelismo com a subestação Gralha Azul. Por esse motivo, essas linhas de transmissão, bem como a subestação serão denominados de SEP, por serem parte de um sistema elétrico de potência. A Figura 32 mostra o detalhe das aproximações citadas.

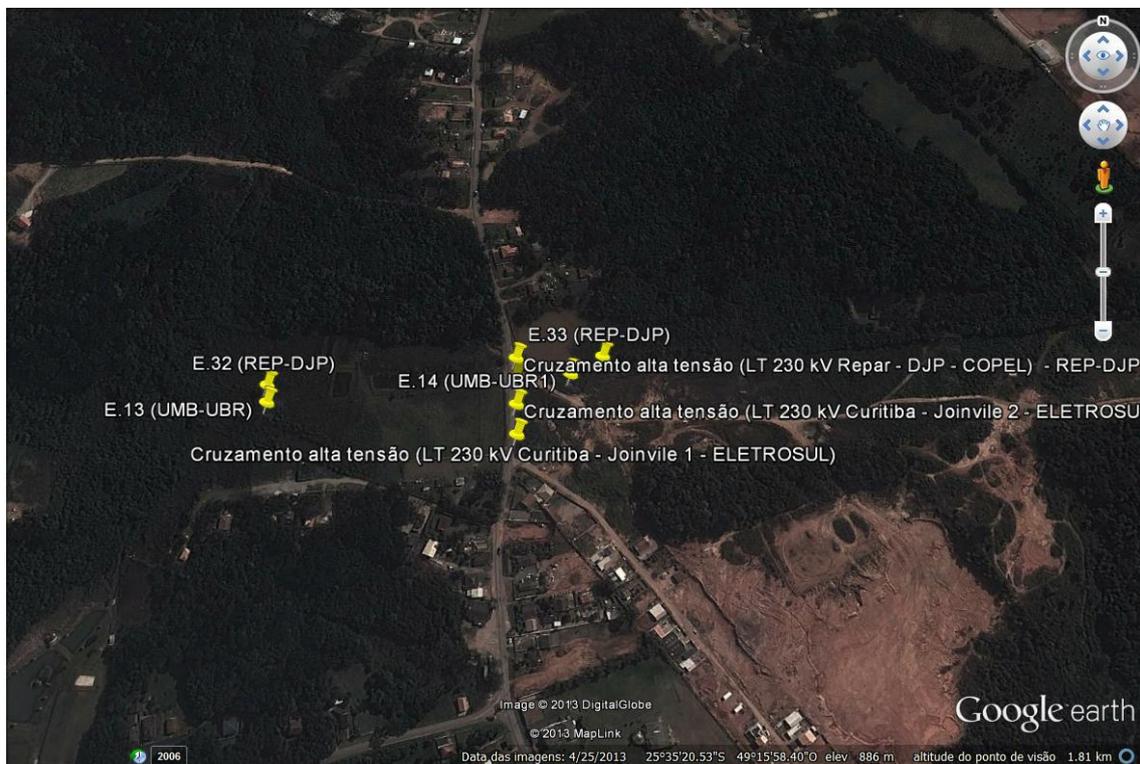


Figura 32 - Detalhe das aproximações das linhas de transmissão com o duto da COMPAGAS.

Fonte: API (2013).

Em seguida foram coletadas informações do sistema elétrico de potência (correntes de curto circuito das linhas) e informações mecânicas do duto da COMPAGAS. A Tabela 8 mostra os detalhes do duto.

Tabela 8 – Parâmetros técnicos do duto para simulações computacionais

CARACTERÍSTICA	DADOS
Comprimento	600 km
Diâmetro	6"
Material	Aço carbono API 5L Gr B
Resistividade do aço	$0.15 \times 10^{-6} \Omega.m$
Permeabilidade magnética relativa	200
Profundidade média	1,50 m até 1,90 m
Revestimento isolante	Polietileno Tripla Camada
Espessura média da camada isolante	4,8 mm
Resistência específica da camada isolante	$10^{23} \Omega m$

Fonte: API (2013).

Com estas informações foram carregadas as posições geográficas do traçado do duto, bem como do sistema elétrico de potência. O *software* utilizado para as simulações foi o ATP (*Alternative Transient Program*). Neste, além das informações de posicionamento, foram inseridos os parâmetros do duto (espessura do revestimento, resistência, etc.) e os parâmetros do SEP (curto circuito das linhas, corrente nominal, etc.). Com estes dados foram realizadas as simulações computacionais e as Figuras 33 e 34 mostram as elevações de potenciais e do campo elétrico nos cruzamentos do duto com as linhas.

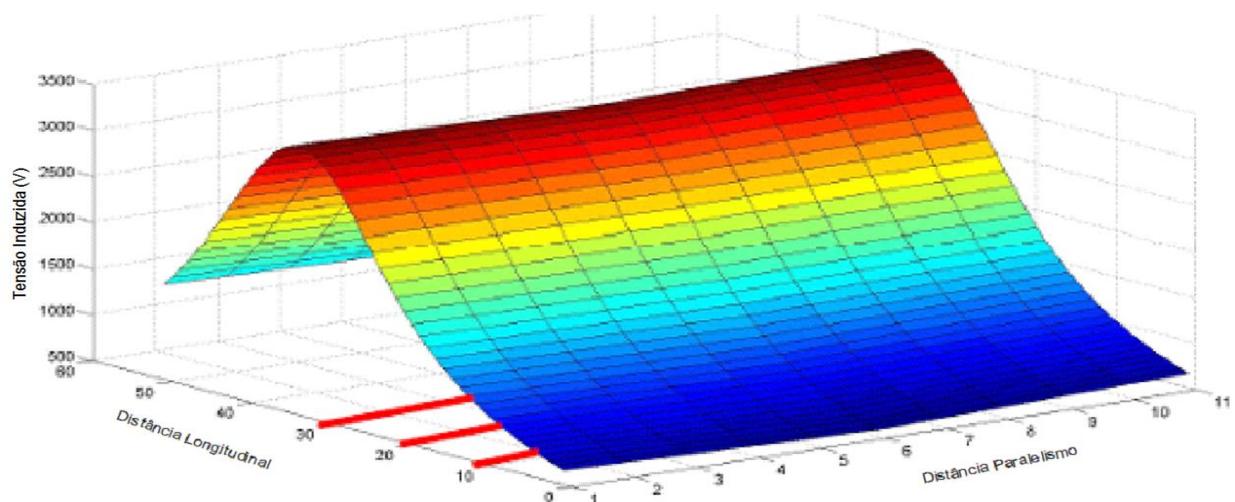


Figura 33 – Elevação de potencial em um dos afloramentos perto da subestação

Fonte: API (2013).

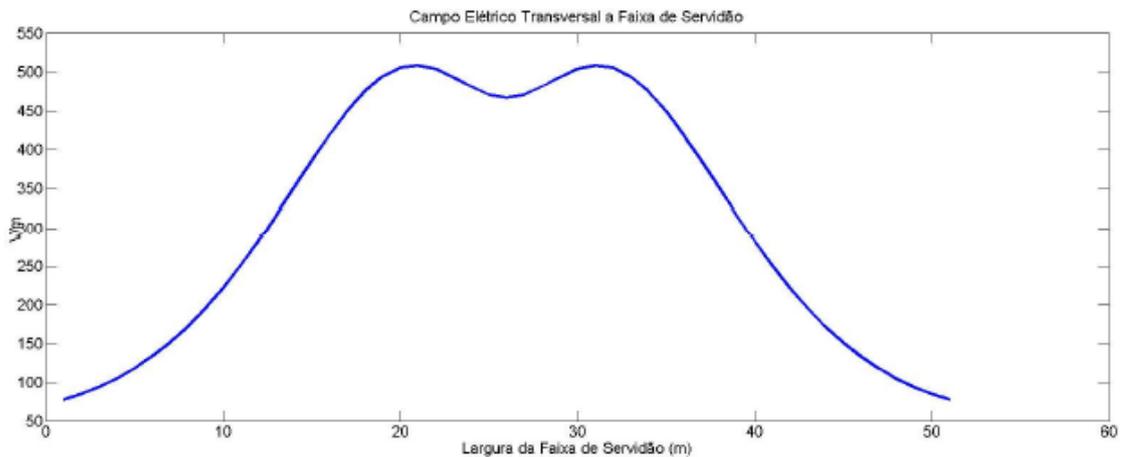


Figura 34 – Elevação do campo elétrico do duto paralelo a subestação

Fonte: API (2013).

Estes gráficos mostram as elevações de potenciais no duto em alguns pontos especiais de cruzamentos com o SEP. Estas informações são relevantes para análises das tensões nas quais ficam submetidas o revestimento do duto. Entretanto as análises mais importantes são realizadas em função das tensões nas quais ficam submetidos os afloramentos do duto. As Tabelas 9 e 10 mostra como ficaram estas tensões tanto em regime permanente, quanto em regime transitório do SEP.

Tabela 9 – Tensões nos afloramentos do duto da COMPAGAS considerando o SEP em regime permanente.

Tensões de toque – REGIME PERMANENTE			
TAG	Km	Localização	Tensão de toque (V)
01	0,03	ERP do Km 0+030	<5
02	2,58	PT Próximo a Torre de Alta Tensão	15
03	3,24	Válvula 01	<5
04	3,60	PT Central às 4 torres de Alta Tensão	30
05	5,72	CMI da interligação com o OLAPA	<5
06	6,25	Válvula 02	<5
07	7,64	PT Na margem do Rio Iguaçu	<5
08	9,74	Válvula 03	19
09	10,38	PT defronte a Subestação Elétrica	45
10	11,40	Válvula 04	32
11	11,43	ERP Km final	25

Fonte: API (2013).

Tabela 10 - Tensões nos afloramentos do duto da COMPAGAS considerando o SEP em regime transitório.

Tensões de toque – CASO 03			
TAG	Km	Localização	Tensão de toque (V)
01	0,03	ERP do Km 0+030	<50
02	2,58	PT Próximo a Torre de Alta Tensão	<50
03	3,24	Válvula 01	<50
04	3,60	PT Central às 4 torres de Alta Tensão	<50
05	5,72	CMI da interligação com o OLAPA	130
06	6,25	Válvula 02	960
07	7,64	PT Na margem do Rio Iguaçu	1980
08	9,74	Válvula 03	3156
09	10,38	PT defronte a Subestação Elétrica	4950
10	11,40	Válvula 04	3040
11	11,43	ERP Km final	2890

Fonte: API (2013).

Em função destes valores de tensão nos afloramentos foram feitas análises quanto à segurança humana e de equipamentos, que serão detalhadas no próximo item.

5.3 PROJETO DAS MEDIDAS MITIGADORAS

Após a realização do estudo de interferências eletromagnéticas e apresentação dos potenciais nos afloramentos e pontos notáveis do duto é necessário a realização da análise destas tensões em relação a segurança humana e de instalações. Esta análise ocorre com os potenciais obtidos em regime permanente e transitório do SEP, mas evidentemente com critérios de avaliação diferentes.

Em função das medições de resistividade realizadas ao longo do traçado do duto, adotou-se os valores de 220 Ω m para todos os afloramentos, conforme API (2013). Em função destes valores e conforme critérios de cálculo da NBR 15751 de 2009, são calculadas as tensões admissíveis de toque e de passo nos afloramentos. A Tabela 11 demonstra os potenciais calculados para os afloramentos, bem como as admissíveis para os mesmos com coberturas especiais ou considerando apenas solo natural.

Tabela 11 – Tensões admissíveis nos afloramentos

Identificação dos Afloramentos	Km	Tensões máximas admissíveis (V)								
		Solo natural		Cobertura de 15 cm de brita		Cobertura de 10 cm de pedra		Cobertura de 5 cm de asfalto		Máxima tensão encontrada
		V _{toque}	V _{passo}	V _{toque}	V _{passo}	V _{toque}	V _{passo}	V _{toque}	V _{passo}	V _{máxima}
ERP do Km 0+000	0,03	218	381	754	2523	1026	3614	1383	5042	430
PT Próximo a Torre de Alta Tensão Válvula 01	2,58	218	381	754	2523	1026	3614	1383	5042	2450
	3,24	218	381	754	2523	1026	3614	1383	5042	1890
PT Central às 4 torres de Alta Tensão	3,60	218	381	754	2523	1026	3614	1383	5042	4350
CMI da interligação com o OLAPA	5,72	218	381	754	2523	1026	3614	1383	5042	890
Válvula 02	6,25	218	381	754	2523	1026	3614	1383	5042	960
PT Na margem do Rio Iguaçu Válvula 03	7,64	218	381	754	2523	1026	3614	1383	5042	1980
	9,74	218	381	754	2523	1026	3614	1383	5042	3156
PT defronte a Subestação Elétrica Válvula 04	10,38	218	381	754	2523	1026	3614	1383	5042	4950
	11,40	218	381	754	2523	1026	3614	1383	5042	3040
ERP Km final	11,43	218	381	754	2523	1026	3614	1383	5042	2890

Fonte: API (2013).

Para esta tabela são analisadas as tensões de toque, tipo de afloramento, localização e em função desta análise é realizado o projeto executivo das medidas mitigadoras para a viabilização da operação dos equipamentos nos respectivos afloramentos.

É importante salientar, que nessa etapa de análise medidas mitigadoras o uso de EPIs, coberturas de solo com brita são adotadas como medidas complementares, uma vez que são condições não totalmente controladas e para fins de aumento do nível de proteção devem ser adotadas outras soluções de mitigação.

Outra questão em relação aos afloramentos nos quais a análise é realizada, em função da: localização destes pontos (se estão em área pública ou dentro do cliente industrial), tipo do equipamento (ponto de teste, estações de redução, válvulas de bloqueio), periodicidade de operação destes equipamentos e aspectos construtivos.

Em função destas análises foram definidas as medidas mitigadoras para os afloramentos do ramal da Fazenda Rio Grande, conforme PALESSA (2014). Assim para as soluções em regime transitório do SEP, estabeleceu-se que:

- ✓ ERPs e EMRPs teriam a construção de malhas de aterramento e sistemas de equipotencialização.
- ✓ Pontos de Teste teriam a construção de um piso com isolamento elétrico.
- ✓ Válvulas de Bloqueio também teriam a construção de um piso com isolamento elétrico.

Para a mitigação das tensões nos afloramentos causadas pelo funcionamento do sistema elétrico de potência em regime permanente, a Tabela 9 mostrou que a tensão nos afloramentos apresenta valores de 45 V. O estudo API (2013) aponta também que pode haver correntes de 80 A circulando pelo duto nas proximidades do paralelismo com a subestação.

Neste caso a solução encontrada foi a instalação de um desacoplador em um dos afloramentos, a fim de promover a drenagem da indução eletromagnética AC para a malha de aterramento e ao mesmo tempo o bloqueio da drenagem das tensões DC no duto que são importantes para a polarização do duto em virtude do sistema de proteção catódica.

5.3.1 Projeto das medidas mitigadoras

Em função das análises supracitadas são definidas as técnicas de mitigação que serão utilizadas em cada afloramento. Entretanto, como cada afloramento tem uma localização específica é necessário um projeto específico para a implantação de cada medida mitigadora, que doravante chamar-se-á projeto executivo.

O projeto executivo além de estabelecer como será a implementação destas medidas mitigadoras nos afloramentos, realiza os cálculos das malhas de aterramento, especifica materiais para isolamentos elétricos, calcula os fluxos dos circuitos em regime permanente a fim de determinar as especificações técnicas dos desacopladores.

Assim foram realizados os projetos executivos para as seguintes estruturas: ERPs, EMRPs, PTs e válvulas de bloqueio. As Figuras 35 a 39 mostram os detalhes do projeto executivo.

Para as ERPs além da malha de aterramento para a proteção humana das tensões de passo e de toque, também foram adotadas medidas de

equipotencialização e blindagem nos equipamentos que visam a proteção inclusive de equipamentos. As Figuras 35 e 36 mostram estes detalhes de implantação.

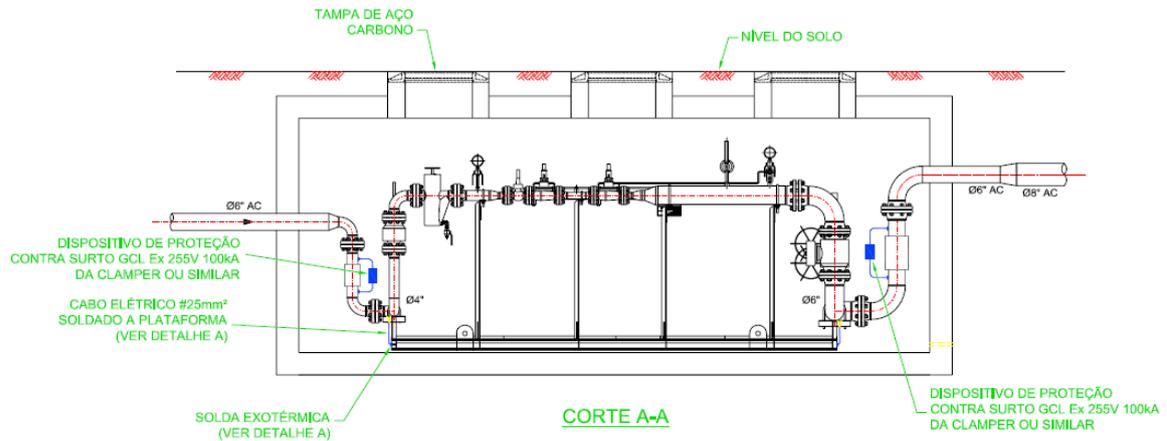


Figura 35 – Detalhe da equipotencialização da ERP – corte

Fonte: PALESSA (2014).

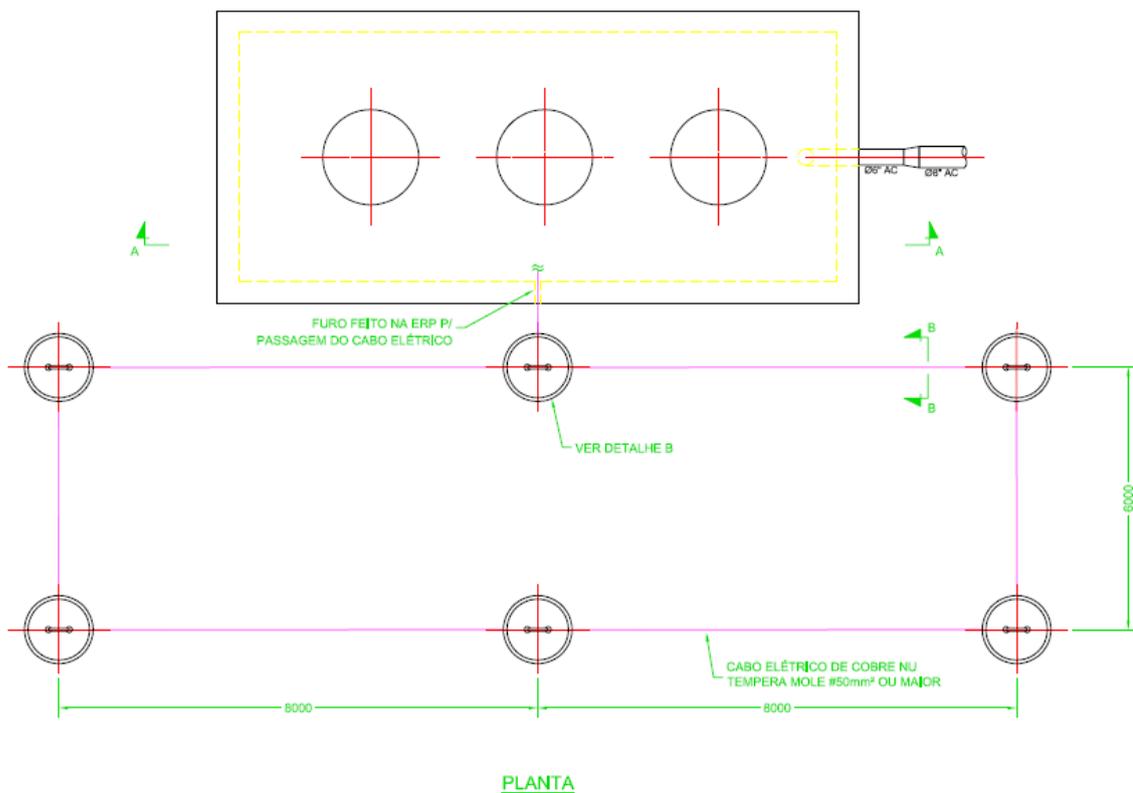


Figura 36 – Planta baixa do sistema de aterramento em ERP

Fonte: PALESSA (2014).

Em relação aos pontos de teste, como a frequência de inspeção é no mínimo quadrimestral e o tempo de inspeção é aproximadamente de 15 minutos, pode-se concluir que neste afloramento as probabilidades de ocorrências de elevação de potencial durante a intervenção humana ficam abaixo de 10^{-5} (critério de análise de risco), valores aceitáveis para o risco, conforme NBR 5419-2015.

Assim a medida mitigadora neste afloramento foi de aumentar o isolamento elétrico no piso do PT. Para este aumento de isolação elétrica foi instalada uma camada de asfalto, com cerca de 5 cm de espessura, conforme mostra a Figura 37.

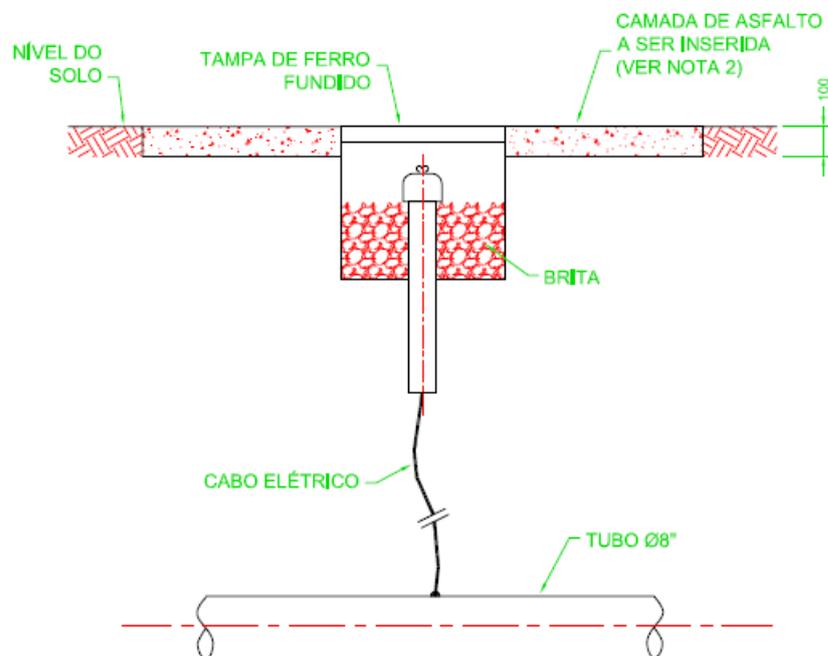


Figura 37 – Detalhe do isolamento elétrico do PT

Fonte: PALESSA (2014).

Em relação a válvula de bloqueio constatou-se a mesma situação de risco do PT e neste sentido foi adotado a mesma solução de mitigação, conforme mostra a Figura 38.

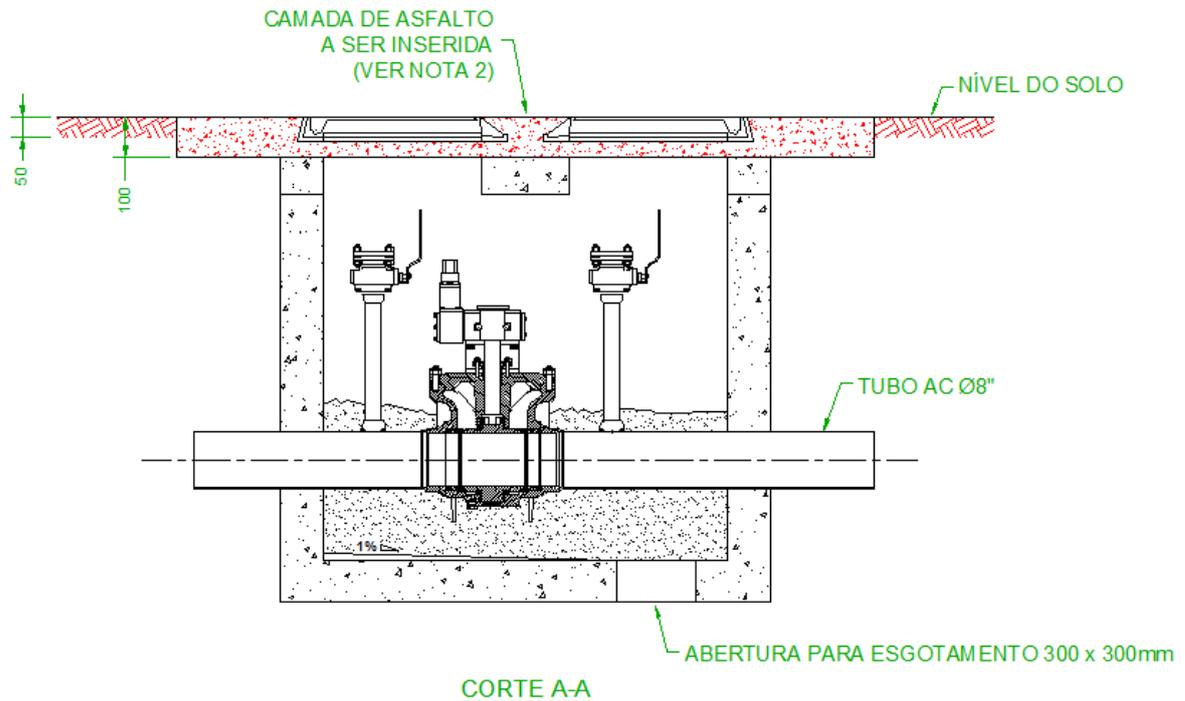


Figura 38 – Detalhe do isolamento elétrico na válvula de bloqueio

Fonte: PALESSA (2014).

As medidas já citadas são referentes a proteção dos afloramentos quando na ocorrência de interferência eletromagnéticas em regime transitório do sistema de potência. Entretanto, conforme já comentado nos itens anteriores em função do regime permanente do SEP podem haver tensões de até 45 V nos afloramentos e circulações de corrente no duto de 80 A. Neste sentido foram analisados os pontos possíveis de executar a drenagem elétrica. A partir desta análise foi projetado a instalação de um desacoplador na CMI (caixa de medição e interligação), cujo dispositivo é o ponto de equipotencialização do duto da COMPAGAS com o duto da TRANSPETRO. A Figura 39 mostra o detalhe da instalação.

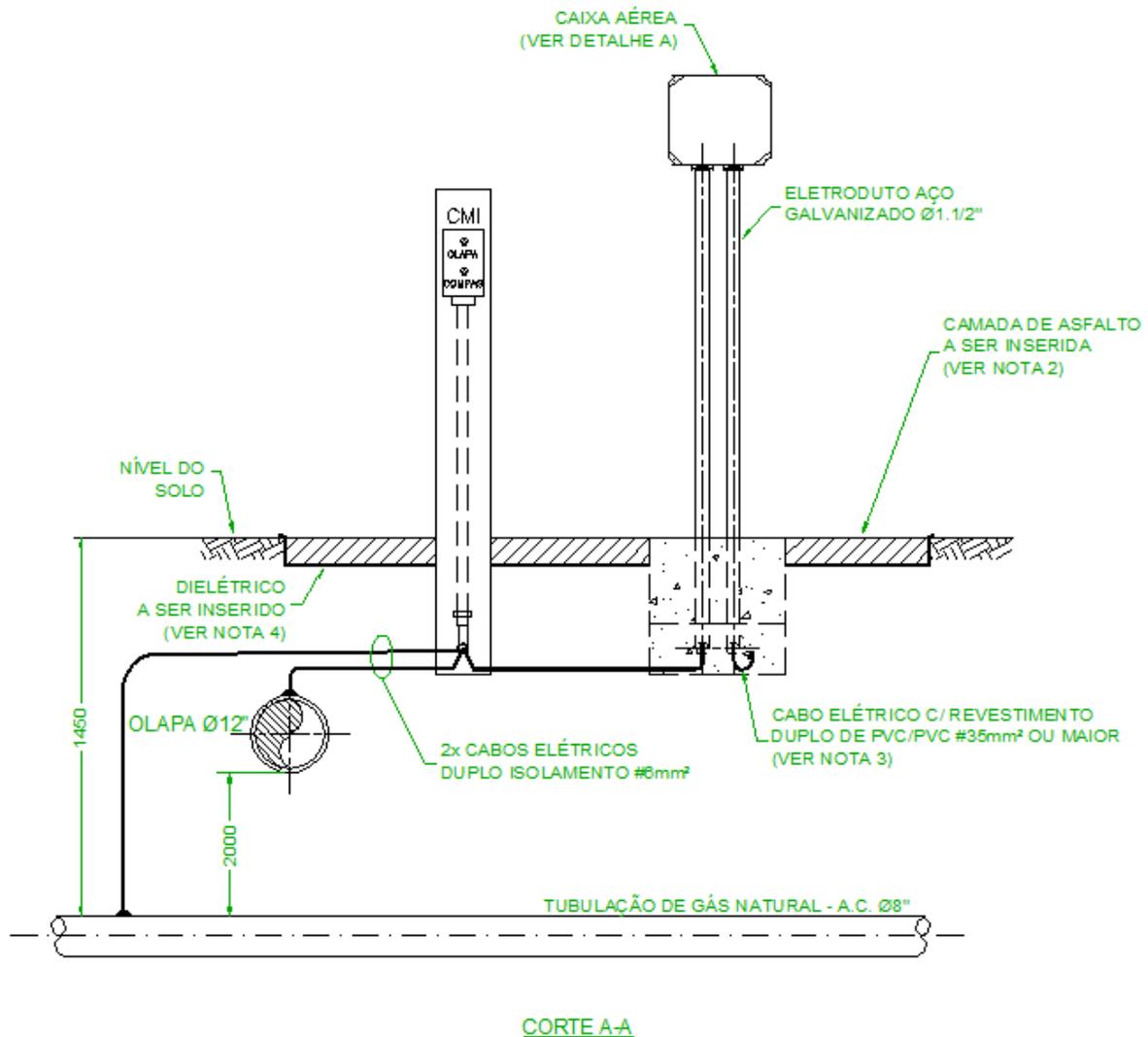


Figura 39 – Detalhe da instalação do desacoplador no afloramento

Fonte: PALESSA (2014).

Com o projeto das medidas mitigadoras foi contratada a execução e assim foi realizado o acompanhamento da implantação destas medidas mitigadoras nos afloramentos de acordo com os critérios estabelecidos no Capítulo 4 deste trabalho. O próximo item será abordado como foi a obra de execução e em especial a pré- operação, que consiste na avaliação eficaz das soluções adotadas.

5.4 ESTUDO DE CASO

Até este ponto do estudo de caso foram levantadas as informações a serem estudadas através da análise de documentação (estudo de interferência eletromagnética, projeto executivo), bem como levantamentos de Normas Técnicas

e análise de casos semelhantes. Este item pretende apresentar como foi a implantação das medidas mitigadoras propriamente dita.

Como já mencionado no item 5.1 o ramal da Fazenda Rio Grande é ramal em aço com aproximadamente 12 km de extensão. Os afloramentos nos quais foram realizadas as obras de mitigação, tratam-se de: Estações de Redução de Pressão (2 estações), Pontos de Teste (4 pontos), Caixa de Medição e Interligação (1 ponto) e Válvula de Bloqueio (1 ponto).

No relatório técnico (IEC-2015) o escopo dos serviços de implantação estão conforme abaixo:

- ✓ Instalação de camada de asfalto com 10 cm de espessura no entorno dos seguintes equipamentos: PTEs das estacas 130+80, 181+00, 382+10 e 519+00; válvula de bloqueio da estaca 573+19 e Ponto de Medição e Interligação com o OLAPA da estaca 287+10.
- ✓ Instalação de dispositivos de proteção contra surto nas juntas monobloco existentes no interior das ERPs das estacas 02+13 e 574+12.
- ✓ Instalação de malhas de aterramento para as ERPs das estacas 02+13 e 574+12 e para o Ponto de Medição e Interligação com o OLAPA da estaca 287+10.
- ✓ Instalação de dispositivo desacoplador de corrente contínua nas proximidades do cruzamento com o OLAPA (ao lado do Ponto de Medição e Interligação com o OLAPA da estaca 287+10).
- ✓ Instalação de tapete isolante de borracha, para os PTEs das estacas 181+00 e 519+00.
- ✓ Medições de resistência de aterramento das malhas instaladas para as ERPs e para o Ponto de Medição e Interligação com o OLAPA.
- ✓ Realização de registros prolongados de potencial tubo-solo.

As maiores dificuldades de implantação foram nas ERPs e na CMI da OLAPA onde foi preciso realizar a construção de malhas de aterramento, pois estes afloramentos estão em vias públicas, dificultando a obra. Outro agravante, no caso das ERPs, são os afloramentos subterrâneos, que na execução da obra continuam em operação e configuram-se assim como espaços confinados exigindo medidas especiais para segurança no trabalho.

A Figura 40 demonstra a construção da malha de aterramento, enquanto que a Figura 41 mostra a instalação do dispositivo de proteção contra surtos a montante e jusante da ERP.



Figura 40 – Implantação da malha de aterramento na ERP da Sumitomo

Fonte: IEC (2015).



Figura 41 – Instalação do supressor de surtos a jusante e montante da ERP

Fonte: IEC (2015).

A obra dos PTs e válvulas de bloqueio, como se tratavam da colocação de superfícies isolantes, ou seja, intervenções na área civil e pelo fato destes afloramentos serem aéreos, foram mais simples de serem executadas. A Figura 42 mostra a obra no PT e a Figura 43 mostra a obra na válvula de bloqueio.



Figura 42 – Implantação do piso isolante no Ponto de Teste

Fonte: IEC (2015).



Figura 43 – Implantação do piso isolante nas válvulas de bloqueio

Fonte: IEC (2015).

Estas obras supracitadas fazem parte das soluções de mitigação nos afloramentos para casos de interferências eletromagnéticas estando o SEP em regime transitório, ou seja, no caso dos potenciais mais elevados. Entretanto, o estudo de interferência deste ramal apontou tensões na ordem de 50 V estando SEP em regime permanente.

Sendo assim, foi necessária a instalação de um desacoplador interligado a uma malha de aterramento. Este ponto de instalação, conforme definições do projeto executivo foi a CMI da OLAPA. A Figura 44 mostra a instalação da malha de aterramento neste ponto, enquanto que a Figura 45 mostra o desacoplador instalado na estrutura da CMI.



Figura 44 – Implantação da malha de aterramento na CMI

Fonte: IEC (2015).



Figura 45 – Instalação do desacoplador na CMI da OLAPA

Fonte: IEC (2015).

De maneira geral a obra transcorreu sem maiores transtornos e seu prazo de execução foi de 5 meses. Concluída a obra de instalação foi realizada a pré- operação do sistema. Esta etapa consiste nas medições dos potenciais DC e AC nos afloramentos, a fim de averiguar principalmente se existem tensões elevadas nos afloramentos em regime permanente do sistema de potência.

Estas medições são realizadas através de registradores de tensão que são instalados nos afloramentos e ficam medindo estes potenciais por um período de 48 horas. Os Gráficos 1 e 2 demonstram os registros efetuados nestes afloramentos.

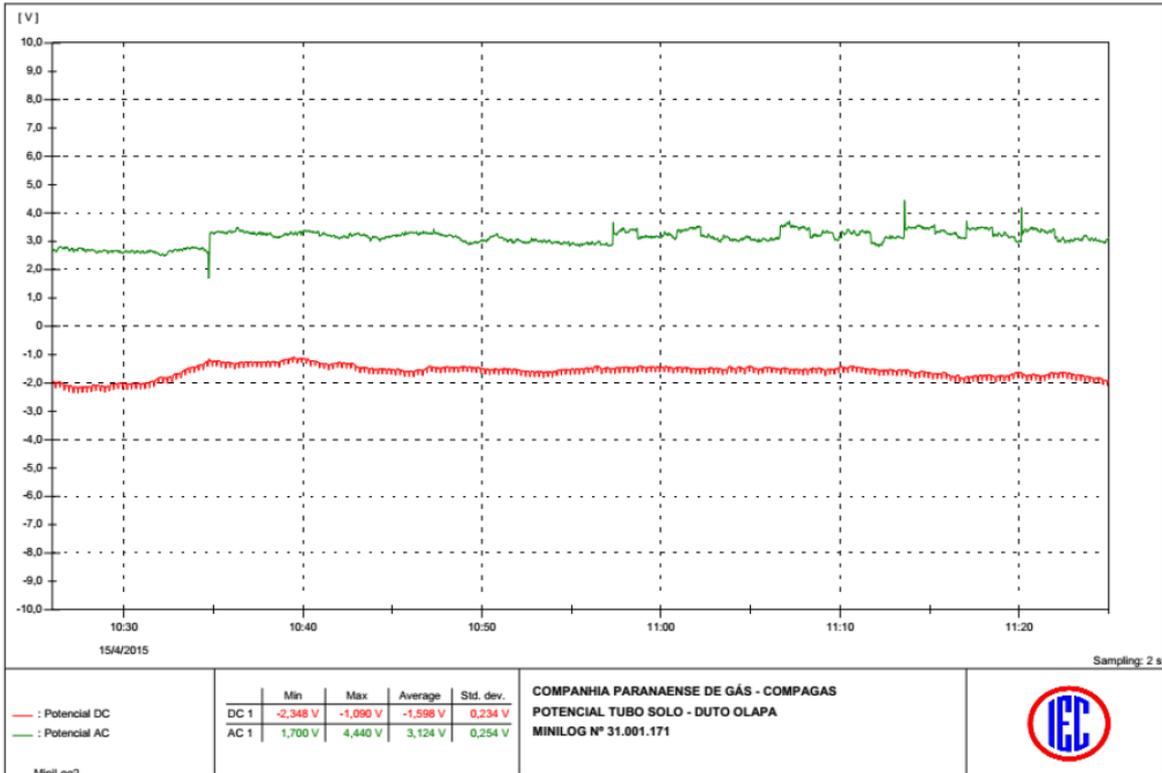


Gráfico 1 – Registro de tensão AC e DC no afloramento CMI – OLAPA

Fonte: IEC (2015).

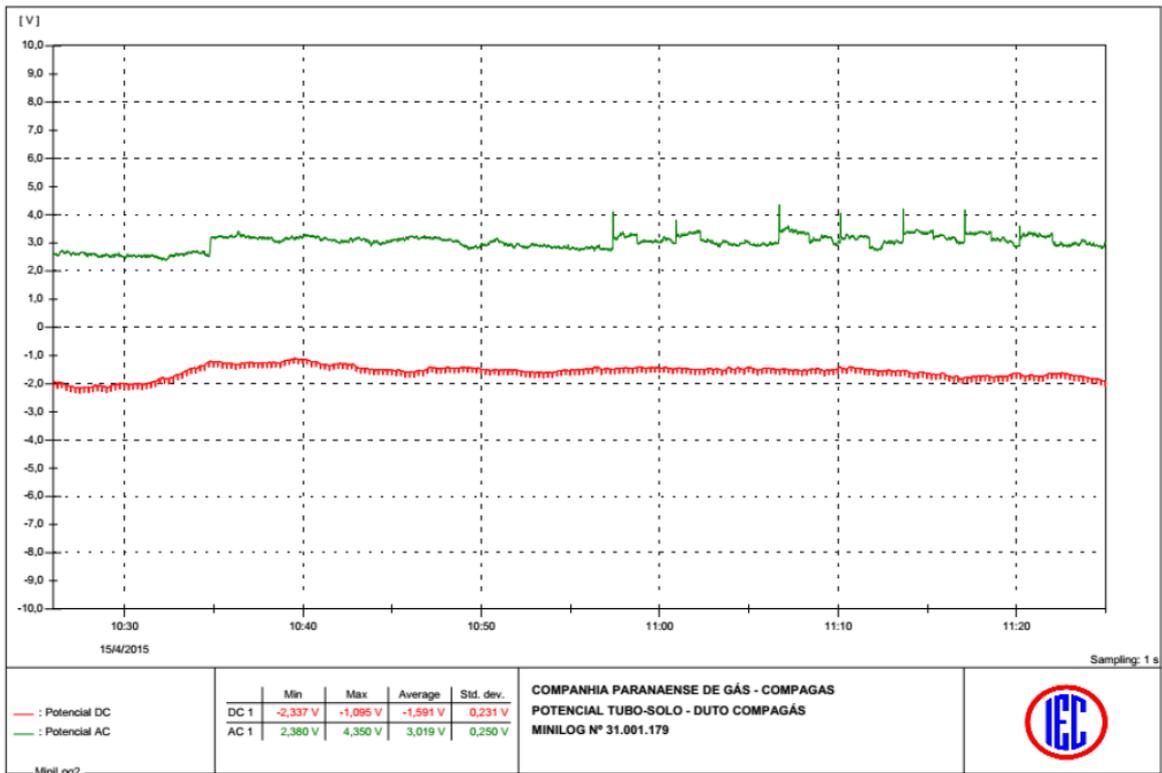


Gráfico 2 – Registro de tensões AC e DC na CMI – duto da COMPAGAS

Fonte: IEC (2015)

Com estes registros, os potenciais avaliados chegaram a um valor máximo de 4,40 V, menores que os 15 V que são recomendados pela NACE. Sendo assim, em função das obras realizadas e dos relatórios finais de aprovação as medidas mitigadoras neste ramal foram implantadas com sucesso, sendo necessário a manutenção de uma rotina de inspeção nas instalações supracitadas.

Com estas descrições a etapa de acompanhamento do estudo de caso foi finalizada e todas as informações necessárias e estipuladas nos objetivos iniciais foram adquiridas, tanto das documentações, quanto aos dados de acompanhamento da obra. A seção 5.5 irá fazer considerações finais sobre estudos de interferência eletromagnética e implantação de medidas mitigadoras.

5.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE MEDIDAS MITIGADORAS

Conforme a definição dos objetivos específicos deste trabalho de conclusão de curso, através de um estudo de caso e uma consulta a bibliografia sobre o assunto ficou definido que estabeleceriam critérios para a implantação das medidas mitigadoras em função da análise das interferências eletromagnéticas.

Sendo assim, os capítulos deste trabalho exploraram toda literatura nacional e estrangeira sobre o assunto, acompanhou e conheceu estudos práticos, bem como se realizou um estudo de caso de uma situação real. Por meio destas análises e confrontação de Normas e uma abordagem crítica dos autores sobre os conceitos envolvidos, foram estabelecidas diretrizes e classificações para casos de interferências eletromagnéticas em gasodutos de distribuição de gás natural.

5.5.1 Considerações sobre projetos

Como relatado na revisão bibliográfica deste trabalho, os problemas nos afloramentos dos gasodutos acontecem quando existem situações de cruzamentos ou paralelismo dos dutos com linhas de transmissão ou subestações. Para que não haja interferências eletromagnéticas nestes casos são necessárias duas medidas básicas: evitar-se o cruzamento do traçado dos gasodutos com as linhas de

transmissão e evitar paralelismo cujas distâncias longitudinais entre o duto e a linha de transmissão para distâncias menores que 150 metros, segundo DULTRA (2009).

Entretanto no Brasil, devido a pouca atenção ao gerenciamento de projetos, certas etapas da análise de risco e de gerenciamento de escopo, nas quais estas medidas poderiam ser tomadas, são negligenciadas nos casos reais da implantação. Ou seja, o gerenciamento de risco passa para o gerenciamento de problemas e de compatibilização, nos quais certas medidas preventivas poderiam ser tomadas.

Porém, para projetos que possam ser feitos ao mesmo tempo, ou para implantações nas quais estas situações possam ser avaliadas com antecipação seguem as diretrizes de projeto que podem ser seguidas:

- ✓ Conforme prescrito na norma ABNT NBR-5422, quaisquer equipamentos, maquinário, veículos que se fizerem presentes na faixa de servidão das LTs, seja para as obras de construção, bem como futuras atividades de manutenção na tubulação, deverão obedecer a uma distância mínima de segurança em relação aos cabos condutores, expressa, em metros, por:

$$D = a + 0,01 \times \left(\frac{D_v}{\sqrt{3}} - 50 \right) \quad (1)$$

Em que:

D_v = distância em metros, numericamente igual à tensão máxima de operação da LT, expressa em kV;

a = fator em metros, conforme tabela seguinte.

O fator a é dado pela tabela 12.

Tabela 12 – Fatores de segurança

a=	NATUREZA DA REGIÃO
6,0 m	LOCAIS ACESSÍVEIS APENAS A PEDESTRES
8,0 m	RODOVIAS, RUAS E AVENIDAS
3,0 m	VEÍCULOS RODOVIÁRIOS E FERROVIÁRIOS
3,0 m	ESTRUTURAS TRANSPORTADORAS

Fonte: NBR 5422

- ✓ A Norma EN 50443:2011 estabelece que distâncias seguras entre casos de paralelismos de linhas de transmissão com gasodutos podem ser para valores maiores que 200 metros de distância longitudinal entre estruturas.
- ✓ Segundo estudo da NACE, realizado em agosto de 2012, no caso da necessidade de aproximações do duto com torres de linhas de transmissão, uma distância segura de torres e gasodutos para tensões da linha na faixa de 88/230 KV são valores maiores que 50 metros.
- ✓ Para casos de paralelismo com linhas de transmissão acima de 88 KV recomenda-se distâncias longitudinais maiores que 500 metros entre o duto e a linha de transmissão para paralelismo superior a 3 km. Para paralelismo menor que 3 km a distância longitudinal pode ser maior que 200 metros, conforme IGEM-TD1.

5.5.2 Considerações sobre Estudo de Interferência Eletromagnéticas

Passada a etapa de projeto, nas quais as medidas podem ser tomadas preventivamente e já na fase de implantação quer seja da linha de transmissão ou do gasoduto de distribuição, é importante que no caso de cruzamentos ou paralelismo destas estruturas seja realizado o estudo de interferências eletromagnéticas para se avaliar os possíveis riscos envolvidos.

Sendo assim, para haver uma análise consistente sobre os resultados é necessário que sejam cumpridas algumas etapas, conforme (ET-COMPAGAS, 2013):

- ✓ Aquisição completa dos dados do duto envolvido e do sistema elétrico de potência.
- ✓ Realização das simulações computacionais.
- ✓ Análise das tensões de toque e de passo nos afloramentos dos gasodutos.
- ✓ Análises das tensões aplicadas ao revestimento.
- ✓ Análise das tensões induzidas no duto em regime permanente.
- ✓ Com estes dados, a realização de uma análise de risco geral.

- ✓ Esta análise de risco geral deve apontar a adoção de medidas adicionais de segurança, bem como a proposição de medidas mitigadoras nos afloramentos se for o caso.

Quando em função das análises de riscos realizadas a tensão no revestimento do duto for acima de 5 KV, conforme requisitos do COBEI, ou exista a impossibilidade da implantação das medidas mitigadoras nos afloramentos dos gasodutos podem ser previstas medidas que interferem propriamente na Linha de Transmissão:

- ✓ Realocamento dos contrapesos das torres de transmissão para direção oposta do gasoduto.
- ✓ Mudança do cabo para-raio das linhas de transmissão, para que os mesmos possam conduzir uma maior parcela das correntes de curto circuito, reduzindo as correntes que são injetadas pelo solo, diminuindo assim o acoplamento condutivo e por consequência as tensões induzidas no duto.
- ✓ Mudança nos dispositivos de proteção da linha de transmissão, com a finalidade de diminuir os tempos de atuação da proteção do sistema, por consequência aumentando as tensões admissíveis de toque e de passo.
- ✓ Aterramento profundo para os aterramentos das torres de transmissão com a finalidade de diminuir o acoplamento condutivo, diminuindo assim as tensões injetadas no solo e por consequência a redução das tensões no duto.

5.5.3 Considerações sobre medidas mitigadoras

Em função dos apontamentos dos estudos de interferência eletromagnéticos devem ser propostas as medidas mitigadoras quando necessárias. Estas soluções de mitigação a serem instaladas nos afloramentos devem seguir certas premissas, segundo:

- ✓ Compatibilizar soluções de tensões induzidas alternadas no duto com os potenciais de proteção catódica injetados no duto.

- ✓ Considerar a adoção de EPIs e EPCs como medidas de solução complementares e não efetivas.

Com estas premissas podem ser classificadas as medidas mitigadoras em função do tipo de afloramento, localização e nível de intervenção humana do mesmo.

Neste sentido podem-se dividir os afloramentos em categorias e cada um deles apontar medidas mitigadoras a serem utilizadas de forma mais eficiente, conforme situações semelhantes apresentadas neste trabalho e o estudo de caso que foi desenvolvido. Assim segue os afloramentos e suas respectivas divisões:

1. Pontos de Teste (pontos de medição de proteção catódica, caixas de medição e interligação, pontos de drenagem de corrente);
2. Válvulas de bloqueio do tipo “*top entry*”;
3. Válvulas de bloqueio subterrâneas;
4. Estações aéreas;

5.5.3.1 Pontos de Teste

Os pontos de teste são pontos nos quais se faz medições de rotina dos potenciais DC, a fim de verificar os potenciais de proteção catódica. Estes tipos de afloramentos típicos nos gasodutos de distribuição podem ser: caixas de medição e interligação, circuitos de drenagem e outros pontos de medição. Nestes afloramentos as inspeções de rotina em geral são quadrimestrais ou em algumas feitas anualmente. Sendo assim, as intervenções operacionais são bem pequenas e como não existem equipamentos sensíveis instalados, torna-se mais fácil a definição de uma solução mitigadora.

Com estas considerações as soluções mitigadoras nestes afloramentos podem ser a implantação de pisos isolantes, cujos materiais devem estar especificados de acordo com o nível de tensão apontado no estudo de interferência eletromagnética. A Figura 46 mostra este tipo de implantação.

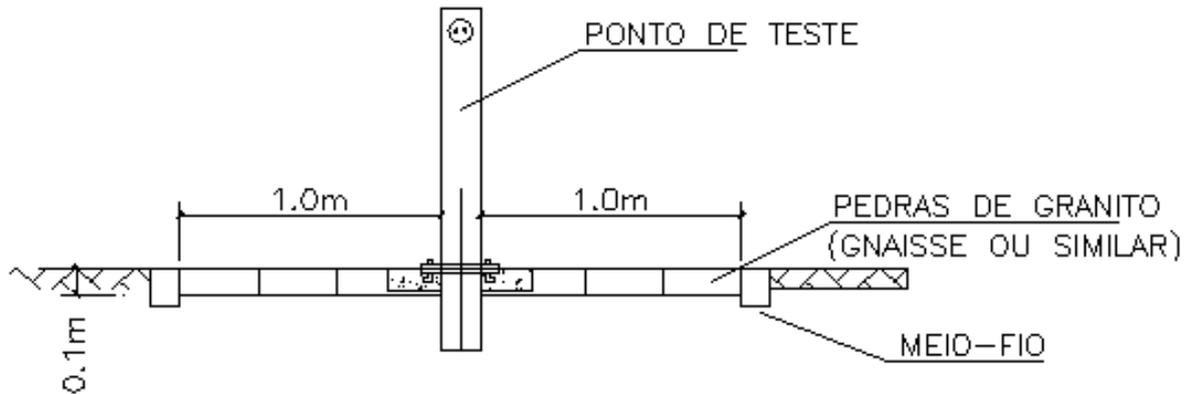


Figura 46 – Projeto de piso isolante em ponto de teste

Fonte: ELILSON (2011).

5.5.3.2 Válvulas de bloqueio do tipo “top entry”

Estas válvulas de bloqueio tem a característica de serem operadas através de uma chave de manobra o que configura uma intervenção sem contato direto, caracterizando este afloramento como aéreo e neste sentido, muito semelhante a atuação do pontos de teste anteriormente citado.

Assim a solução mitigadora também pode ser a implantação de pisos isolantes, cujos materiais devem estar especificados de acordo com o nível de tensão apontado no estudo de interferência eletromagnética, conforme EN 50443(2011).

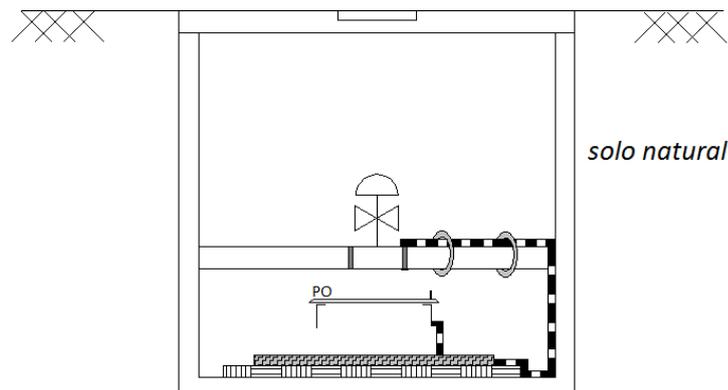
5.5.3.3 Válvulas de bloqueio subterrâneas

As válvulas de bloqueio são equipamentos instalados na rede com a finalidade de bloquear o fluxo de gás e na sua grande maioria são válvulas esferas com operação através de volante associado a caixa de redução e que na maioria dos casos são subterrâneas.

Assim este afloramento além de subterrâneo, a operação tem contato direto do operador com o equipamento. Além disso, em geral a ligação destas válvulas

com os dutos são através de conexões flangeadas, o que possibilita a ocorrência de centelhamento nos flanges em função da passagem de correntes elevadas. Outro ponto é a própria tensão de toque em que o operador pode ficar submetido em um caso de indução eletromagnética.

Nestes casos a solução mitigadora não pode se restringir a colocação de pisos isolantes, ou seja, à técnica de mitigação deve partir do conceito de equipotencialização do equipamento com o terra remoto em que o operador está localizado no momento da operação. Isto pode ser realizado com a instalação de plataformas ligadas por meio de cabos às válvulas de bloqueio. Para não haver centelhamento nos flanges e a instalação de cabos de interligação dos flanges que fazem um contato elétrico entre os mesmos, diminuindo assim as possibilidades de centelhamento no interior da caixa. A Figura 47 mostra a adoção de plataforma numa caixa de bloqueio, conforme estudo realizado num gasoduto (ELILSON, 2011).



LEGENDA

-  manta butílica (camada de 4mm)
-  chapa de aço
- PO plataforma de operação
-  cabo de cobre de seção 16mm² isolado e instalado em mangueira/eletroduto de PVC

Figura 47 – Exemplo de inserção de plataforma isolante em válvula de bloqueio subterrânea

Fonte: ELILSON (2011).

5.5.3.4 Estações Aéreas

As estações aéreas podem ser classificadas: as estações de redução de pressão, estações de medição, válvulas aéreas de transferência de custódia, entre outros equipamentos. Nestes casos, além da intervenção humana mais frequente, em muitos casos diariamente, estes afloramentos possuem juntas de isolamento elétrico, que isolam eletricamente a estação ou equipamento do restante da tubulação. Também é comum encontrar nestes afloramentos equipamentos eletrônicos de instrumentação, automação e medição, configurando estas instalações como sensíveis na questão de proteção elétrica contra surtos elétricos.

A partir destes apontamentos supracitados as soluções mitigadoras exigem mais requisitos do que nos casos anteriores. A fim de atender os critérios de segurança humana quanto a proteção contra tensões de toque e de passo devem se prever a instalação de malhas de aterramento e soluções de equipotencialização na estação e equipamentos. Em conjunto com as soluções de proteção humana, as soluções de equipotencialização devem prever blindagens elétricas para os equipamentos eletrônicos. Para a proteção contra a queima das juntas de isolamento elétrico devem ser previstas a instalação de supressores de surto, que cujo conjunto de proteção é conhecido como dispositivos de proteção de junta isolada, conforme EN 50443:2011.

As Figuras 48 mostram o tipo de implantação.

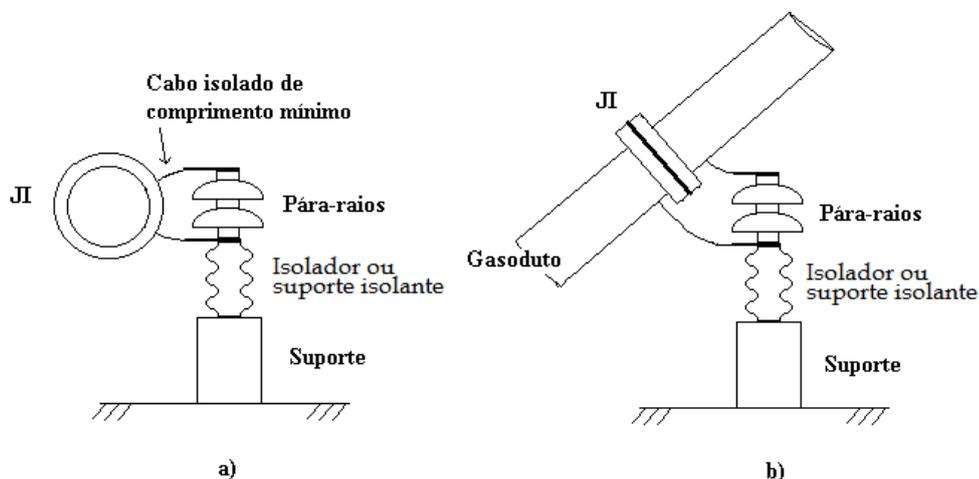


Figura 48 – Implantação de protetor de surtos nas estações

Fonte: ELILSON (2011).

Este capítulo final deste trabalho teve o objetivo de fazer as considerações finais sobre as principais medidas mitigadoras que são utilizadas e em cima dos estudos realizados neste trabalho foram apresentadas diretrizes para projetos e de estudo de interferência. Também foram classificados os afloramentos e tendo como base estas divisões foram detalhadas as soluções de medidas mitigadoras para cada caso especial, segundo as considerações técnicas de cada situação e suas particularidades.

Ressaltando apenas, que embora estas considerações tenham subsídios de trabalhos já implantados e de diretrizes internacionais existe a necessidade de estudos mais específicos sobre o assunto, a fim de que os mesmos se tornem práticas consagradas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio de um estudo de caso, o presente trabalho detalhou o fenômeno de interferência eletromagnética entre gasodutos de distribuição e sistemas elétricos de potência. Foi identificada a problemática da situação, consultada a bibliografia sobre o assunto e assim obteve-se conceitos sobre estudos de interferência eletromagnética e medidas mitigadoras.

Esta análise pode ser mais aprofundada em função do estudo de caso analisado, na qual se obteve dados de obra e comprovações teóricas sobre as soluções mitigadoras existentes.

Com base nos termos supracitados e com a análise de normativas internacionais e implantações de casos similares foi possível a elaboração de uma classificação das medidas mitigadoras, bem como a elaboração de diretrizes para projetos futuros.

É importante ressaltar, que embora alguns estudos tenham sido viabilizados e já aplicados com sucesso em obras lineares e outros tenham comprovação teórica bem coerente, os mesmos dependem da implantação, a fim de que venham a se tornar práticas consagradas.

6.1 Sugestão para trabalhos futuros

Como sugestões para pesquisas e trabalhos futuros, indicam-se:

1. Estudos de simulações computacionais de interferências eletromagnéticas entre dutos e linhas de transmissão.
2. Estudos de parâmetros reais a serem adotados nas simulações computacionais.
3. Estudo para comprovação da eficácia de medidas mitigadoras.
4. Planejamento de controle de obras.
5. Análise de risco para casos de interferências eletromagnéticas entre dutos e linhas de transmissão.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Resolução Normativa N° 67 da ANEEL, de 8 de junho de 2004. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2004067.pdf>> acesso em 11 abr. 2015.

API Dutos, Estudos de Interferência Eletromagnética no Ramal da Fazenda Rio Grande, referente ao contrato COMPAGAS 001/2013, RL-2013.01-COMPAG-750-API-003, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: Projeto de Instalações Elétricas em Baixa Tensão. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5422: Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica. 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12712: Projeto de Sistemas de Transmissão e Distribuição de Gás Combustível. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15649: Tubulação para Indústria de Petróleo e Gás Natural. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7117: Medição da Resistividade do Solo pelo Método dos Quatro Pontos (Wenner). 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15751: Sistemas de Aterramento de Subestações. 2009.

ANSI / IEEE STD. 80 – 2000: IEEE Guide for safety in AC substation grounding.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Indicadores Econômicos. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/pec/indeco/Port/ie1-51.xls>>, acessado em 10 abr. 2015.

BESSONOV, L. A. Eletricidade Aplicada para Engenheiros, 3. ed. Porto, Portugal: Lopes da Silva, 2000

BORTELS L. et al. A General Applicable Model for AC Predictive and Mitigation Techniques for Pipeline Networks Influenced by HV Power Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, Nº 1, janeiro de 2006.

BURMAN, V. Transporte Dutoviário de Gás Natural. Curso de Especialização em Engenharia de Gás Natural. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

CIGRÉ WG-32.02 – Guide on the Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines

CE 3:09.11.5–001 – Projeto de norma COBEL: Coordenação elétrica entre linhas aéreas de transmissão de energia elétrica de corrente alternada e tubulações metálicas enterradas com a camada isolante – Procedimento.

CPFL. Orientação Técnica: Ocupação de Faixa de Linha de Transmissão. 2007. Disponível em: <<http://www.cpf.com.br>> acesso em 12 maio 2015.

CIGRE. Guide on the Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines, 1995.

CORTELETTI, R. C. Desenvolvimento de Metodologia para Concepção de Traçados de Dutos de Transporte de Gás Natural. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas – UFOP, Ouro Preto, 2009.

COMPAGAS – Companhia Paranaense de Gás. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA ESTUDOS DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA NA RDGN. ET-65-200-CPG-048. 2013.

COMPAGAS – Companhia Paranaense de Gás. Manual do Consumidor Industrial. Disponível em: <<http://www.compagas.com.br>> Acesso em 30 out. 2014

Critérios do Operador Nacional ONS. Agosto de 2014. Resolução Normativa nº 409 da ANEEL. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010409.pdf>> Acesso em 30 out. 2014.

DIPRA. The Effect of Overhead AC Powerlines Paralleling Ductile Iron Pipelines. Ductile Iron Pipe Research Association, 1999.

DUTRA, A.C.; NUNES, L.P. Proteção Catódica: Técnica de combate a corrosão, 3 Edição, 1999.

ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above, 2005.

ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. EPRI AC Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above, 2a. edição, Palo Alto, 1982.

ELILSON, Estácio. Análise das Interferências Eletromagnéticas da LT 230 kV CIC Copel - Berneck em Gasodutos da Compagás. NSA-IG-003-1010. 2010.

EN 50443:2011. Effects of electromagnetic interference on pipelines caused by high voltage a.c. electric traction systems and/or high voltage a.c. power supply systems. EUROPEAN STANDARD. Dezembro de 2011.

EPRI/A.G.A Project RP742-1/PR-132-80 – J. Dabkowski, A. Taflove: Mutual design considerations for overhead AC transmission lines and gas transmission pipelines Vol. 1 – Engineering analysis.

EPRI/A.G.A Project RP742-1/PR-132-80 – J. Dabkowski, A. Taflove: Mutual design considerations for overhead AC transmission lines and gas transmission pipelines Vol. 2 – Prediction and mitigation procedures.

FUCHS, R. D. Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas. Vol. 2. Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro.

GIL, Antônio Carlos. Métodos em pesquisa social. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999.
_____. Como Elaborar Projetos de Pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GRCEV, L.; et. al. Induced Voltage in Metallic Pipelines near Power Transmission Lines, IEEE, Skopje, Macedonia, 2000.

GUTIERREZ, Amauri – Estudo de Interferência eletromagnética, contrato COMPAGAS 065/2014.

HAYT, W. H., Eletromagnetismo, Mc Graw-Hill, 1983.

IEC Engenharia de Corrosão. RELATÓRIO TÉCNICO DE COMISSIONAMENTO. RL-65-985-IEC-001 referente ao contrato COMPAGAS 179/2014. 2015.

IGEM-TD1. STEEL PIPELINES AND ASSOCIATED INSTALLATIONS FOR HIGH PRESSURE GAS TRANSMISSION. IGEN/TD/1 Edition 5. 2011.

IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990 – T. Takahashi, T. Kawase: Analysis of Apparent Resistivity in a Multi-Layer Earth Structure.

JOHNK, C. T. A. Engeneering Electromagnetic Fields and Waves, Estados Unidos da America, 1988.

LABEGALINI, P. R. et al. Projeto Mecânico das Linhas Aéreas de Transmissão. 2. ed. Itajubá, 1992.

LIMA. S. Infraestrutura vai investir R\$ 274 bilhões, diz BNDS. Folha de São Paulo, São Paulo , 22fev.2015.

Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro>>, acessado em 10 abr. 2015.

MALIK, N. H. A Review of the Charge Simulation Method and its Applications, IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989.

MARROIG, M. C. et al. Corrosão Associada ao Isolamento Térmico de Dutos. 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. 2003.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Relatório Final do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2013, ano base 2012. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf> acesso em 10 abr. 2015.

NACE INTERNATIONAL, Some Safety Considerations for Pipelines Near Overhead, Nova York, 2005.

NETO, A. O. W. et al. Novo Inibidor de Corrosão para Aplicação em Oleodutos. 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. 2005.

NÓBREGA, A. C. V. et al. Proposta de um Plano de Monitoramento e Controle de Corrosão para Dutos de Transporte. 6ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos. 2002.

NORMA TÉCNICA PETROBRAS. N-2180: Relatório para a Classificação de Locação de Gasodutos Terrestres. 2001.

NORMA TÉCNICA PETROBRAS. N-2737: Manutenção de Oleoduto e Gasoduto Terrestre. 2005.

NORMA TÉCNICA PETROBRAS. N-2171: Cálculo de Proteção Catódica por Corrente Impressa. 1985.

NORMA TÉCNICA PETROBRAS. N-2245: Levantamento de Dados de Campo para Projeto de Proteção Catódica – Dutos Terrestres. 1998.

NORTH AMERICAN PIPELINES. Electric Currents of Pipeline Corrosion, disponível em <http://www.napipelines.com/featured/2009/2009-07-feature-6.html>, em 05/02/2015.

ONS. Carga Própria de Energia. Disponível em: <http://www.ons.org.br/historico/carga_propria_de_energia_out.aspx>, acessado em 10 abr. 2015.

ONS. Glossário de Termos Técnicos. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/procedimentos/modulos/Modulo_20/Subm%C3%B3dulo%2020.1_Rev_1.0.pdf>, acessado em 2 abr. 2015.

PALESSA Engenharia de Corrosão Ltda. MEMORIAL DE CÁLCULO PARA MALHA DE ATERAMENTO DAS ERP's. Contrato COMPAGAS número 234/2013. 2014.

PINTO G. P. O Método GPR Aplicado a Localização de Tubulações Utilizadas no Abastecimento de Água na Região Urbana do Município de Belém-Pará. Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2010.

PPGEE-UFPE. Eletromagnetismo Avançado. disponível em <http://www.nomergcpf.xpg.com.br/ee982/aula18.html>, em 02/04/2015.

PÁDUA, E. M. M. Metodologia da Pesquisa: Abordagem Técnico/Prática, 13ª Edição, 2007.

SADIKU M. N. O. Elementos de Eletromagnetismo. Companhia Bookman Editora, 3ª. Edição, 2004.

SANTOS, M. G., ET AL. Influência de dutos metálicos aéreos na distribuição do campo elétrico gerado por linhas de transmissão operando em regime permanente, XVIII Congresso Brasileiro de automática, 2010.

SINGER, H.; STEINBIGLER, H.; WEISS, P. A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields. Technical University, Munich, Germany. 1973.

SCHIMIEGUEL, C. A.; CASTRO, F. J. R.; PELLICIOLLI, T. Estudo do Ambiente Periférico para Inspeção e Mapeamento de Dutos Metálicos Subterrâneos

SOARES, P. Brasil é o Que menos investe em infraestrutura entre maiores economias.

Folha de São Paulo, 22 fev. 2010. Disponível em:

<<http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u697052.shtml>>, acessado em 10 abr. 2015.

SWEDI M. H., JOHAR U. M. Transmission Line EMF Interference with Buried Pipeline: Essential & Cautions. International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN , Dhahran, Arábia Saudita, 2003.

RP-0169 – Norma Técnica NACE: Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems.

TG-327 – Relatório NACE: AC Corrosion State-of-the-Art: Corrosion Rate, Mechanism, and Mitigation Requirements.

TBG – Transportadora Brasileira de Gás. Disponível em: <<http://www.tbg.com.br>> Acesso em 30 out. 2014.

TENARIS. Tubos Para Condução (Line Pipe). Catálogo 2008.

YIN, Valier. Transmission Line EMF Interference with Buried Pipeline: Essential & Cautions. International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN , Dhahran, Arábia Saudita, 1989.