

CONFERIDO
PROC. Nº 11P.13748.07
RUB 7080
PRPG 19/08. II

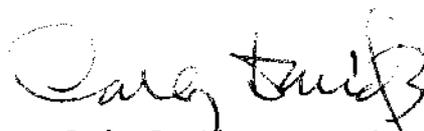
ERRATA

Eu, Carlos David Franco Barbosa, ex-aluno do curso de Doutorado em Engenharia Civil, informo que deve-se considerar a seguinte errata nas páginas 2 e 3:

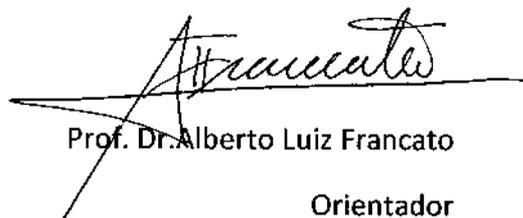
onde se lê: Recursos Hidráulicos, Energéticos e Ambientais

o correto é: Recursos Hídricos, Enegréticos e Ambientais.

Sem mais,



Carlos David Franco Barbosa



Prof. Dr. Alberto Luiz Francato

Orientador



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,

ARQUITETURA E URBANISMO

**IMPACTOS DO DESEMPENHO DAS EMENDAS DOS CABOS DE LINHAS
DE TRANSMISSÃO NA CONFIABILIDADE DE REDES ELÉTRICAS**

Carlos David Franco Barbosa

Campinas

2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

Carlos David Franco Barbosa

**IMPACTOS DO DESEMPENHO DAS EMENDAS DOS CABOS DE LINHAS
DE TRANSMISSÃO NA CONFIABILIDADE DE REDES ELÉTRICAS**

Tese apresentada à Comissão de pós-graduação Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hidráulicos, energéticos e Ambientais

Campinas 20 de maio de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE – UNICAMP

B234i	<p>Barbosa, Carlos David Franco</p> <p>Impactos do desempenho das emendas dos cabos de linhas de transmissão na confiabilidade de redes elétricas / Carlos David Franco Barbosa. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.</p> <p>Orientadores: Alberto Luiz Francato, Carlos Alberto Mariotoni.</p> <p>Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.</p> <p>1. Energia elétrica - Transmissão. 2. Cabos elétricos - Localização de falhas. 3. Cabos elétricos. 4. Sistemas de energia elétrica - Confiabilidade. I. Francato, Alberto Luiz. II. Mariotoni, Carlos Alberto. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.</p>
-------	--

Título em Inglês: Transmission lines cable splices performance impacts on electrical network reliability

Palavras-chave em Inglês: Electrical energy transmission, Electric cables Troubleshooting, Electric cables, Electric power systems - Reliability

Área de concentração: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora: José Antônio Jardini, Dorel Soares Ramos, Takaaki Ohishi, Tiago Zenker Gireli

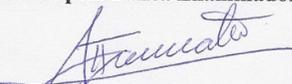
Data da defesa: 20-05-2011 Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

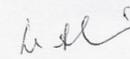
**IMPACTOS DO DESEMPENHO DAS EMENDAS DE CABOS DE
LINHAS DE TRANSMISSÃO NA CONFIABILIDADE DE REDES
ELÉTRICAS.**

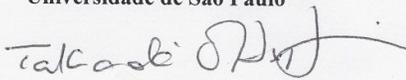
Carlos David Franco Barbosa

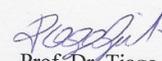
Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:


Prof. Dr. Alberto Luiz Francato
Presidente e Orientador(a)/Unicamp


Prof. Dr. Dorel Soares Ramos
Universidade de São Paulo


Prof. Dr. José Antonio Jardini
Universidade de São Paulo


Prof. Dr. Takaaki Ohishi
Universidade Estadual de Campinas


Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli
Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 20 de maio de 2011

(01)

Agradecimentos

“Not everything that counts can be counted, and not everything that can be counted counts” - Albert Einstein

Às Agências Governamentais e empresas ANEEL, Burndy, CTEEP, CPFL, Forjasul, ONS, Sadel, SAE Towers através de seus colaboradores e ao grupo de transmissão do Cigré Brasil pelos questionários respondidos e apoio, incentivo e idéias;

Aos professores José Sidney Colombo Martino, Paulo Gardel Kurka, Itamar Ferreira, José Luiz Antunes, Nilson Tadeu Mascia, Pablo Siqueira, João Eduardo Lopes e Tiago Forti pelas portas abertas;

Aos professores da FEC, FEM e FEEC pelo conhecimento passado nas disciplinas;

Aos professores das bancas de qualificação (Hermano Medeiros Ferreira de Tavares) e defesa (Dorel Soares Ramos, José Antonio Jardini, Takaaki Ohishi e Tiago Zenker Girardi) nas diversas sugestões e colaborações de valiosa importância;

Aos gestores Toyoharu Komatsu, Sergio Ishida, Osvaldo P. Menezes, Celso Cerchiari, Milton Diniz pelo apoio das iniciativas que possibilitaram este trabalho;

Aos colegas, engenheiros e colaboradores Acassio Barbosa, Alexandre Civalli, André Pissolatti, Danielson Leandro, Denis Mazzei, Eduardo Matsudo, Eduardo Seixas, Fabiano Farias, Fabio Usberti, Jair Pereira, German, Kasumi, Sergio Cruz, Sergio Fleming, Rogério Lawadolski pela disponibilidade de ajuda valiosa;

Aos meus orientadores Alberto Luiz Francato e Carlos Alberto Mariotoni pela paciência, sugestões, contribuições, amizade;

Aos meus sobrinhos Laís, Lucas, Rafael e cunhada Beth pela amizade e incentivo,

Aos meus irmãos Paulo Sérgio Franco Barbosa e Mauricio Franco Barbosa por diversos incentivos e amizade;

Aos meus filhos Carlos Eduardo e Ana Alice, por felicidade, amizade, compreensão,

Aos diversos familiares pelo apoio com palavras, atos e incentivos, amor,

Aos diversos colegas e amigos da Unicamp, CESP e outras empresas que trabalhei por acreditarem e apoiarem a iniciativa; aos outros cujos nomes seriam difícil de enumerar, por incentivo, apoio, sorriso, disponibilidade em ajudar, meus sinceros agradecimentos e votos que possam receber muito mais em retribuição.

Resumo

Esta tese tem como objetivo estudar métodos de planejamento da expansão da transmissão de energia elétrica em mercados de eletricidade re-estruturados, tanto em um ambiente tradicional quanto com a adoção de inovações tecnológicas. No trabalho são estudados procedimentos de campo para as linhas de transmissão, considerando economia e confiabilidade, principalmente em emendas à compressão para cabos ACSR (Aluminum Core Steel Reinforced). O trabalho descreve os resultados de pesquisas efetuadas com fabricantes e concessionárias usuárias das emendas à compressão e ainda sugere alguns procedimentos e rotinas de inspeções para melhorar a confiabilidade do sistema. Os resultados dos testes com as emendas, realizados em laboratório, serviram para dar suporte para a análise de falhas, subsidiando a avaliação das causas de falhas mais frequentes no ambiente competitivo. Por fim foram apresentadas tecnologias emergentes com possibilidade de redução da taxa de falhas nos sistemas de transmissão de energia elétrica bem como as recomendações de boas práticas para o setor.

Abstract

This thesis has as objective to study electricity transmission expansion planning

In re-structured markets, both traditional as well as with technological innovations. In the work are studied transmission lines field procedures considering economy and reliability, mainly ACSR (Aluminum Core Steel Reinforced) compression splices. The work describes compression splices field surveys with suppliers and users concessionaries and also suggest some procedures and inspections routines to improve system reliability. The results of laboratory splice tests helped the failure analysis and frequently failure causes on competitive environment. Finally it is presented emerging technologies with failure reduction possibilities for the electricity transmission systems and good practices recommendations for sector.

Lista de figuras

Fig. 1.1 Não conformidade de emenda pré-moldada em L.T. de alta tensão aérea.

Fig. 1.2 Ambiente de trabalho de substituição de emendas na linha construída

Fig. 2.1 Principais eventos mundiais recentes de falhas em larga escala

Fig. 2.2 Instalações de Transmissão

Fig. 2.3 Rede de Transmissão do Sistema Interligado Nacional (fonte: ONS)

Fig. 2.4 Acesso, Contratos e Tarifas Associadas

Fig. 2.5 Taxa de falhas como função do tempo de uso do equipamento e parâmetro de forma da distribuição de Weibull

Fig. 2.6 Taxa de falhas em emendas e demais componentes dos sistemas de L.T.

Fig. 2.7 Detalhamento da emenda por compressão de cabo ACSR

Fig. 2.8 Foto de Emendas a Compressão

Fig. 2.9 Roldana de passagem de terra

Fig. 2.10 Puxador equipado com linha de puxamento conectado a linha piloto

Fig. 2.11 Tensionador com condutor conectado à linha de puxamento e conexão de terra entre condutor tensionador e carreta de bobinas

Fig. 2.12 Passagem do cabo sobre a roldana

Fig. 2.13 Arranjo para o caminhão de emendas com condutores aterrados antes de realizar a emenda

Fig. 3.1 Seções Transversais da Luva de Aço em emendas de cabos ACSR

Fig. 3.2 Estado de Tensão na Região da Luva de Aço

Fig. 3.3 Esquema de tensões atuantes em luva desalinhada em regime elasto-linear

Fig. 3.4 Análise não linear do comportamento termo-mecânico de componentes em aço sujeitas ao fogo.

Fig. 3.5 Resultado Típico de um Ensaio de Tração

Fig. 3.6 Diagrama tensão-deformação esquemático para o alumínio e o aço.

Fig. 3.7 Diagrama tensão-deformação com σ_c para deformação = 0,2%

Fig.3.8 Bancada de Ensaios em cabos de Alta tensão

Fig. 4.1 Estado de Tensão na Região da Luva de Aço (SAP2000)

Fig. 4.2 Detalhe do Estado de Tensão na Região da extremidade esquerda da Luva de Aço

Fig. 4.3 Detalhes do Estado de Tensão na Região central do da Luva de Aço

Fig. 4.4 Estado de tensão esquemático em emenda desalinhada com deslocamento e flecha

Fig. 4.5 Microscopia óptica - luva de alumínio, corte longitudinal, aumento 50 x

Fig. 4.6 Microscopia óptica luva de alumínio, corte transversal, aumento de 50 x;

Fig. 4.7 Microscopia alma de aço, corte transversal, aumento de 100x, depósito superficial

Fig. 4.8 Microscopia óptica da alma de aço com corte longitudinal e aumento de 50 x e depósito superficial

Fig. 4.9 Microscopia óptica da alma de aço com corte longitudinal e aumento de 100 x e depósito superficial

Fig. 4.10 Microscopia óptica da luva de aço e cabo de aço com corte transversal e aumento de 100 x, grãos com predominância ferrítico (claro) e perlítico (escuro)

Fig. 4.11 Microscopia óptica do cabo de aço com corte transversal, aumento de 200x e depósito superficial

Fig. 4.12 Microscopia óptica do cabo de aço, corte transversal, aumento de 50x

Fig. 4.13 Microscopia óptica do cabo de aço com corte transversal e aumento de 100x

Fig. 4.14 Microscopia óptica do cabo de aço com corte transversal e aumento de 200x baixo teor de carbono – ferrítico predominante;

Fig. 4.15 Microscopia óptica da luva de aço com corte transversal e aumento de 100x

Fig. 4.16 Microscopia óptica da luva de aço com corte transversal e aumento de 200x ferrítico (claro), perlítico (escuro) aço de baixo carbono 1010 a 1020;

Fig. 4.17 Cabo rompido em campo (emenda à compressão)

Fig. 4.18 Cabo rompido em campo (medida do cabo dentro da luva de alumínio)

Fig. 4.19 Identificação na luva de alumínio (fabricante, matriz e rastreabilidade de montagem)

Fig. 4.20 Detalhe da emenda e fios no lado que ocorreu a ruptura

Fig. 4.21 Detalhes dos fios de aço rompidos mostrados também na fig. 5.20

Fig. 4.22 Detalhes dos a) fios de aço rompidos dentro da luva de alumínio e b) e tentos de alumínio rompidos (com setas mostrando possíveis fusões por alta temperatura localizadas)

Fig. 4.23 Corte da luva de alumínio para visualização e análise da qualidade

Fig. 4.24 Detalhe da extremidade não rompida e Corte da luva de alumínio

Fig. 4.25 Detalhe da extremidade rompida e Corte da luva de alumínio

Fig. 4.26 Extremidade rompida e dimensão do cabo de alumínio dentro da luva

Fig. 4.27 Microscopia óptica a) do fio de aço rompido longo e b) na junção da emenda

Fig. 4.28 Microscopia óptica dos fios de aço a) fio de aço sem ruptura b) fio de aço com depósito superficial

Fig. 4.29 Características básicas do cabo DRAKE

Fig. 4.30 Representação das a) tranças de Alumínio e Aço de cabos Drake b) posição dos extensômetros nas Luvas

Fig. 4.31 Cabo ACSR com emenda não conforme devido à luva de aço empenada

Fig. 4.32 Emenda prensada mostrando engaiolamento do cabo de alumínio

Fig. 4.33 Representação esquemática da colocação dos extensômetros nas luvas de aço (interna) e alumínio (externa)

Fig. 4.34 Representação da colocação dos extensômetros na luva de alumínio

Fig. 4.35 Ensaio de tração extensômetro E2

- Fig. 4.36 Ensaio de tração extensômetros E1, E2, E3, E4, E5, E6
- Fig. 4.37 Ensaio de tração extensômetros E7, E8, E9, E10, E11, E12
- Fig. 4.38 Caracterização de tensão versus deformação extensômetro E2
- Fig. 4.39 Deformação no tempo de extensômetro E2
- Fig. 4.40 Visualização de ensaio de cabo de alumínio extensômetro E3 (deformação no tempo)
- Fig. 4.41 Ensaio de tração extensômetro E8
- Fig. 4.42 Visualização de ensaio de ruptura extensômetro E8
- Fig. 4.43 Ensaio de cabo ACSR extensômetro E9
- Fig. 4.44 Ensaio de cabo ACSR extensômetro E9 tensão no tempo
- Fig. 4.45 Ensaio de tração extensômetro E10
- Fig. 4.46 Ensaio de tração extensômetro E10
- Fig. 4.47 Representação do posicionamento de extensômetros na luva de aço interna
- Fig. 4.48 Ensaio de tração extensômetro E1
- Fig. 4.49 Ensaio de tração extensômetro E1 Deformação no tempo
- Fig. 4.50 Ensaio de tração extensômetro E3
- Fig. 4.51 Ensaio de tração extensômetro E3 deformação no tempo
- Fig. 4.52 Ensaio de tração extensômetros E1, E2, E3 na luva de aço
- Fig. 4.53 Análise de modos de falha (FMEA) mostrando as causas mais importantes
- Fig. 4.54 Efeitos dos fatores eólicos em falhas de emenda

Fig. 4.55 Necessidade de monitoramento da temperatura e manutenção preventiva da emenda

Fig. 4.56 Determinação da manutenção a partir da confiabilidade ($R(t)$)

Fig. 6.1 A emenda explosiva pronta para detonação

Fig. 6.2. Emendas e Luvas implosivas terminadas

Fig. 6.3 Detonação simultânea de 10 emendas implosivas

Fig. 6.4 Emenda implosiva (esquerda) e à compressão tradicional (direita)

Fig. 6.5 Detector de não conformidade em peças de aço (fluxos magnéticos e distorção devido defeito)

Fig. 6.6 Curva de histerese mostrando em destaque o ponto de saturação que é o ponto de trabalho

Fig. 6.7 Equipamentos de monitoramento por efeito Hall com peso 217 kg (esquerda) e 70 kg (direita).

Fig. 6.8 Curva de calibração dos sensores hall na seção de cabo metálico

Fig. 6.9 Cabeça magnética montada em cabo

Fig. 6.10 Resultado de inspeção e pontos de maior interesse (A, B, C e D)

Fig. 8.1 Fluxograma de implantação de emendas à compressão

Fig. 8.2 Luvas de aço e de alumínio e Cabo preparado para montagem

Fig. 8.3 Folga nas medidas para acomodar a deformação da luva de aço

Fig. 8.4a Marcas para centralizar a luva de aço no cabo

Fig. 8.4 b Marcas para centralizar a luva de aço no cabo

Fig. 8.4b Marcas para centralizar a luva de aço no cabo

Fig. 8.4 c Marcas para centralizar a luva de aço no cabo

Fig. 8.5 Conferência das medidas da luva de aço após prensagem

Fig. 8.6 Marcação no cabo para centralizar a luva de alumínio

Fig. 8.7 Luva de aço sem comprimir sobre a luva de aço acabada

Fig. 8.8 Colocação de composto antioxidante(Sikronil) antes da prensagem da luva de alumínio

Fig. 8.9 Prensagem da luva de alumínio mostrando as marcas limites do fabricante

Fig. 8.10 Conferência das medidas da luva de alumínio após prensagem

Fig. 8.11 Detalhe do corte da luva distante do cabo de alumínio interno

Fig. 8.12 a Itens de Pontuação de defeitos em vistoria de redes

Fig. 8.12 b Itens de Pontuação de defeitos em vistoria de redes

Fig. 8.12 c Itens de Pontuação de defeitos em vistoria de redes

Fig. 8.12 d Itens de pontuação de defeitos em vistoria de redes

Fig. 8.12 e Itens de pontuação de defeitos em vistoria de redes

Fig. 8.13 Evolução temporal dos Índice de Pontuação de desempenho das empreiteiras

Fig. 8.14 Evolução temporal da pontuação de desempenho das empreiteiras

Fig. 8.15 Totalização da Pontuação de desempenho de empreiteiras

Lista de tabelas

Tabela 2.1 Vida útil em linhas de transmissão

Tabela 2.2 Probabilidade de sobrevivência de elementos de torres

Tabela 2.3 Técnicas de conexão de condutores de cabos de alta e extra alta tensões

Tabela 3.1 Resultados de Ensaios: Carga de Ruptura de Emendas de Fabricante

Tabela 4.1 Medidas da variação da resistência elétrica com a corrente e temperatura

Tabela 4.2 Ensaios de tensão de emendas retilíneas ACSR DRAKE Forjasul

Tabela 4.3 Ensaios de tensão de emendas empenadas ACSR DRAKE SADE

Tabela 4.4 Módulo médio de elasticidade do Aço e alumínio

Siglas

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ACSR	Cabo de alumínio com alma de aço
ANEEL	Agência Nacional de Energia e Eletricidade
AC	Corrente Alternada
CA	Cabo de Alumínio com Alma de Alumínio
CAA	Cabo de Alumínio com Alma de Aço
CC	tensão contínua, o mesmo que DC
CCPE	Comitê Coord. do Planej. da Exp. dos Sistemas Elétricos
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CPID	Comissão do Programa de Investimentos na Distribuição
CPST	Contrato de Prestação de Serviços de Transmissão
CTEE	Comitê Técnico para Estudos Energéticos
CTEM	Comitê Técnico para Estudos de Mercado
DC	Tensão contínua ou direta, o mesmo que CC
EDS	Every Day Stress, o mesmo que esforço diário
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
FACTS	Flexible Alternate Current Transmission System
FMEA	Análise de Modos de Falha e Efeitos
FMECA	Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade
FT	Funções de Transmissão
GCPS	Grupo Coordenador o Planejamento dos Sistemas Elétricos
IEC	Internacional. Electrotechnical Commission

kV	kilo Volt
LMP	Preço marginal locacional
LT	Linha de Transmissão
MME	Ministério de Minas e Energia
MTTC	Tempo médio de manutenção corretiva
MMTF	Tempo médio para falhar
MTBF	Tempo médio entre falhas
MTTM	Tempo médio de manutenção preventiva
MTTR	Tempo médio de reparo
MW	mega Watt
N-1	Contingência de rede com um elemento em falha
N-2	Contingência com dois elementos em falha
ONS	Organizador Nacional do sistema
PCH	Pequena central hidroelétrica
PIB	Produto Interno Bruto
PML ou LMP	Preço marginal locacional
PVI	Parcela Variável Por Indisponibilidade
SIN	Sistema Interligado Nacional
TUST	Tarifa de uso do sistema de transmissão
TUST-FR	Tarifa de uso do sistema de transmissão-fronteira
TUSTRB	Tarifa de uso do sistema de transmissão-rede básica

Sumário

1.	Introdução	33
1.1	Objetivos do trabalho	35
1.2	Organização do trabalho	36
2.	Transmissão e confiabilidade	39
2.1	Características de sistemas de energia elétrica	41
2.1.1	Geração	41
2.2	Transmissão e distribuição	43
2.2.1	Linhas de sub-transmissão	44
2.3	Características elétricas de linhas de transmissão	44
2.4	Histórico de sistemas de transmissão e padronização das tensões	45
2.4.1	Mundial	45
2.4.2	Brasil	47
2.4.3	Histórico de materiais usados em linhas de transmissão	49

2.4.4	Evolução do planejamento do setor elétrico no Brasil	50
2.5	Sistemas de Transmissão após a reestruturação do setor no Brasil	52
2.6	Relacionamento de energia com infra-estruturas críticas	54
2.7	Falhas sistêmicas de larga escala e seus custos	55
2.8	A regulação da confiabilidade da transmissão	58
2.9	Operação de sistema de transmissão	60
2.10	O desempenho da rede de transmissão	62
2.11	Investimentos em transmissão	63
2.12	Planejamento do sistema de energia elétrica	68
2.13	Padrões e critérios de planejamento	68
2.14	Previsões de demanda e incertezas	70
2.15	Aspectos diferenciados do Planejamento de transmissão no Brasil	71
2.16	Características adicionais do sistema de transmissão	72
2.17	Cálculo da tarifa TUST pela Metodologia Nodal e a sua regulamentação	75
2.18	Dificuldades com a Metodologia Nodal	76

2.19	Parcela Variável Por Indisponibilidade (PVI)	78
2.20	Dificuldades com a Metodologia Nodal para Geradoras Existentes	79
2.21	Dificuldades da TUST para Novas Centrais Geradoras	79
2.22	Falhas e confiabilidade	80
2.23	Efeitos de Modos de Falha e sua Criticidade (FMECA)	85
2.24	Mecanismos de Falhas	85
2.25	Confiabilidade e Taxa de falha	88
2.26	Parâmetros e Estimação de confiabilidade	89
2.27	Falhas e sua prevenção em redes de infra-estrutura críticas	91
2.28	Economia e variação anual da confiabilidade em sistemas elétricos	92
2.29	Confiabilidade local do ponto de suprimento	93
2.30	Sistema de transmissão de grande porte	94
2.31	Índices de confiabilidade no setor elétrico brasileiro	94
2.32	Nível de confiabilidade e índices	94
2.33	Interdependências em redes de infra-estrutura críticas	96
2.34	Mecanismos de falhas em emendas de cabos de linhas de transmissão	97
2.35	Eventos de falhas e rompimentos de cabos de linhas de transmissão	100
2.36	Confiabilidade do sistema de transmissão	101

2.37	Mecanismos de falha em cabos trançados e critério de retirada	102
2.38	Cabos de Linhas de transmissão e conexões	103
2.39	Tipos de conexão entre bobinas de cabos condutores	106
2.40	Resistência e efeitos de temperatura	107
2.41	Emendas das linhas aéreas	108
2.42	Diversidade de campo elétrico e resistividade nas emendas	110
2.43	Tipos principais de emendas	111
2.44	Emenda total pré-formada	112
2.45	Luvas de reparo	113
2.46	Características de conexão de condutores	114
2.47	Instalação das emendas em campo	114
2.48	Verificação e Revisão de Procedimentos de Execução de Emendas	116
2.49	Aceitações de deslocamento e flecha em emendas à compressão	119
2.50	A montagem das emendas em linhas de alta tensão aéreas	119
2.51	As instruções dos Fabricantes	119
2.52	Verificação das Medidas e Aspectos de Colocação	119
2.53	Lançamento dos cabos	130
2.54	Alinhamento da Luva	121

2.55	Carga nas Roldanas de Passagem Durante a Operação de Puxamento	122
2.56	Aterramento, ligação dos terminais e segurança da força de trabalho	124
2.57	Mecanismos de Falha em Cabos Trançados e Critério de Retirada	125
2.58	Principais Mecanismos de falha em cabos de linhas de transmissão	126
2.59	Cargas mecânicas sobre os cabos e empenamento das emendas	128
2.60	A fiscalização de implantações em campo	129
2.61	Indicadores de Desempenho das Firms Empreiteiras	130
2.62	Comentários e conclusões do capítulo	130
3	Planejamento de ensaios e pesquisas	137
3.1	Estados Limites de Peças Estruturais	138
3.1.1	Estados limites últimos ou de ruína	138
3.1.2	Estados limites de utilização	139
3.2	Métodos de Verificação da Segurança	139
3.2.1	Método clássico ou método determinístico das tensões admissíveis	139
3.2.2	Método probabilístico dos estados limites	140
3.2.3	Classificação das ações	141
3.2.4	Determinação da resistência dos materiais	142
3.3	Condicionantes para o Dimensionamento de Emendas a Compressão	143

3.3.1	Parâmetros e a Compatibilidade de Critérios Cabo-Emenda	143
3.3.1.1	Condições de Implantação e Operação	143
3.3.2	Distribuição de Tensões e Ruptura da Emenda à Tração	144
3.3.3	Escorregamento	144
3.3.4	Defeitos de Execução / Prensagem	145
3.3.5	Efeitos térmicos	146
3.3.6	Fadiga	147
3.4	Propriedades Mecânicas em Tração	148
3.5	Ensaio	156
3.5.1	Ensaio de desenvolvimento	156
3.5.2	Ensaio de tipo	155
3.5.3	Ensaio de recebimento	156
3.5.4	Ensaio de controle	156
3.5.5	Ensaio durante e após a instalação	156
3.5.6	Relação de ensaios	157
3.5.7	Dimensionamento de emendas e Norma DIN 48085-3	157
3.5.8	Normatização do Ensaio de Tração e Informações Adicionais	158
3.6	Planejamento dos ensaios de ruptura de emendas à compressão	160

3.6.1	Introdução	160
3.6.2	Questões Relevantes nos Ensaios	160
3.6.3	Planejamento anterior aos Ensaios	161
3.6.4	Planejamento Pós-Realização dos Ensaios	162
3.7	Plano de amostragem dos ensaios de ruptura	163
3.7.1	Introdução	163
3.7.2	Metodologia de Determinação dos Tamanhos dos Lotes (N)	164
3.7.2.1.	Fixação do N° de Amostras	166
3.8.	Análise Estatística dos resultados	166
3.8.1	Planejamento do Tratamento Estatístico dos Resultados	167
3.9	Conclusões do capítulo	168
4.	Resultados	171
4.1	Resultados da análise de simulações com elementos finitos	171
4.2	Resultados da Pesquisa com empresas de transmissão	174
4.3	Resultados dos Estudos de fiscalização de transmissão	175
4.4	Resultados dos Estudos das práticas de conexões em transmissão	177

4.5	Resultados das microscopias das emendas montadas	170
4.6	Resultados da análise de emendas com descentralização	185
4.7	Resultados dos ensaios de ruptura e medidas de temperatura	189
4.7.1	Medidas da Resistência elétrica e temperatura da emenda	189
4.7.2	Ensaio de Ruptura	190
4.8	Resultados dos ensaios de deformação (dados dos extensômetros)	193
4.8.1	Cabo 1 Dados dos extensômetros na luva de alumínio	195
4.8.2	Cabo 2 extensômetro colocado no cabo de aço	199
4.9	Análise dos modos de falha (FMEA)	202
4.10	Conclusões do capítulo	204
5.	Discussões e considerações	209
6.	Tecnologias emergentes	217
6.1	Emendas à compressão implosivas	218
6.1.1	Descrição de emenda implosiva	219
6.1.2	Comparação entre a compressão implosiva e a hidráulica	220
6.1.3	Aplicações	222

6.1.4	Qualificação e testes	223
6.1.4.1	Ciclagem de calor	223
6.1.4.2	Força de tensão	223
6.1.4.3	Resistência elétrica	223
6.1.4.4	Teste de Vibração	224
6.1.4.5	Corona Visual	224
6.2	Monitoramentos de não conformidades na alma de aço	224
6.2.1	Calibração do equipamento	227
6.2.2	Procedimento de inspeção	227
6.2.3	Observações na inspeção eletromagnética	229
6.3	Cabos termorresistentes (TAL)	229
6.4	Supercondutores	239
6.4.1	Fabricação de fios	231

6.4.2	Vantagens e potencial	232
6.5	Conclusões do capítulo	232
7.	Conclusões	235
8.	Anexos	241
8.1	Anexo 1	241
8.2	Anexo 2	247
9.	Referências bibliográficas	255

1. Introdução

A importância econômica e estratégica do sistema de transmissão em mercados de energia integrados com nítida sazonalidade e capacidade regularizadora plurianual, diferenciadas regionalmente, têm sido amplamente reconhecidas ao longo do histórico do setor elétrico, sendo particularmente acentuada em períodos de escassez hidrológica. As linhas de transmissão permitem atender regiões com demanda maior que a oferta de energia regional e mitigar riscos de escassez pela interligação de plantas de geração com diversidade locacional. Além disso, o sistema de transmissão permite reduzir a indisponibilidade de suprimento pelo aumento da diversidade de modos de geração com energias alternativas.

A importância da transmissão de energia elétrica fica evidente com a necessidade de aproveitamentos distantes dos centros consumidores e com a tendência da geração concentrada em poucas unidades de grande potência. Neste cenário, os sistemas de transmissão assumem caráter estratégico de aproveitamento das diversidades de geração, além dos econômicos. As plantas geradoras são interconectadas por linhas de transmissão com capacidade suficiente para manter o fornecimento em situações de emergência, sem comprometer a continuidade do fornecimento. O ganho de capital líquido, nesta redução de capacidade de geração, é bastante maior que o gasto na construção das linhas de transmissão, para interconexão das fontes geradoras e redes de sub-transmissão, existindo um potencial resultado de ganho líquido significativo para redução do custo da energia paga pelo consumidor.

A reestruturação do setor elétrico com maior participação do capital privado, ocorrida após 1995 no Brasil, bem como a des-verticalização das empresas em empresas de geração, transmissão, distribuição e comercialização trouxeram maior necessidade de resultados financeiros em menores horizontes de tempo, incluindo menores tempos de depreciação do ativo, acarretando implantações com menores custos e operação com critérios ajustados posteriormente, o que implica em carregamentos de valores superiores aos planejados nos critérios anteriores. No caso das empresas de transmissão, essa necessidade de maior retorno econômico tem provocado riscos operacionais maiores que os considerados no planejamento técnico-econômico do sistema de transmissão: as tendências atuais são de maiores níveis de corrente, tornando maior a necessidade de desenvolvimento de novos estudos que tragam suporte técnico adequado às decisões de implantar novos níveis de serviço, sem comprometimento demasiado da segurança do suprimento.

As empresas de construção e concessionárias de transmissão nacionais e internacionais têm constatado nos últimos empreendimentos de construção de linhas de transmissão, a ocorrência de não conformidades das luvas de emenda dos cabos condutores nos processos de prensagem. Este tipo de não conformidade está mostrado à direita na Fig. 1.1

A implantação correta e de alta confiabilidade do sistema de transmissão pode representar ganhos de desempenho e menores custos de operação e manutenção. A implantação correta das emendas também reduz a perda de potência, aumenta a vida útil do sistema de transmissão e diminui a probabilidade de falha e falta de suprimento. Atualmente, apesar de drástica redução da fiscalização em campo para redução de custos, a aceitação das linhas aéreas é feita após inspeção visual onde emendas fora de padrões de alinhamento são rejeitadas. Mesmo sem a linha estar ainda com pleno fluxo de energia, tais rejeições representam significativo aumento de custo e de atrasos na entrega das expansões, com o ambiente de trabalho adverso mostrado na Fig. 1.2.



Fig. 1.1 Não conformidade de emenda pré-moldada em L.T. de alta tensão aérea.



Fig. 1.2 Ambiente de trabalho de substituição de emendas na linha construída

1.1 Objetivos do trabalho

Este trabalho tem como objetivos: a) estudar as alterações observadas no ambiente de sistemas de transmissão de energia elétrica após a reestruturação do setor brasileiro de eletricidade que possam resultar em falhas; b) buscar esclarecer possíveis motivos e causas de menor confiabilidade e os respectivos métodos para eliminar ou diminuir os efeitos e conseqüências dessas causas, bem como identificar os menores investimentos possíveis, caracterizando a confiabilidade integrada.

O trabalho ainda faz uma reflexão considerando o planejamento integrado da geração e transmissão de energia elétrica com o uso de conceitos de confiabilidade em ambientes de mercados re-estruturados e busca propor sugestões de melhoria dos processos da implantação de campo e manutenção.

Estes objetivos tiveram suporte de uma pesquisa de campo com fabricantes e concessionárias usuárias de emendas, simulação com elementos finitos, ensaios de deformação e ruptura em laboratório, análise de microscopia óptica e de ferramentas de confiabilidade.

Procurou-se também, ao longo de todo trabalho, verificar pontos de melhoria que possam trazer os maiores aumentos de confiabilidade com menores investimentos possíveis.

1.2 Organização do trabalho

A organização do trabalho está descrita a seguir:

O primeiro capítulo faz a introdução ao assunto da tese e busca conceituar as dificuldades e necessidades que levaram a realização deste estudo, que são: a importância da transmissão de energia elétrica no cenário nacional; as principais alterações decorrentes da re-estruturação do setor elétrico brasileiro; as não conformidades verificadas em implantação e operação das redes e aspectos gerais da transmissão de energia elétrica.

No segundo capítulo, são apresentados aspectos gerais do histórico dos sistemas de transmissão de energia elétrica no mundo e no Brasil, a evolução da regulamentação do planejamento no Brasil além dos materiais metálicos usados nos cabos condutores, o planejamento e as falhas ocorridas após a re-estruturação do

setor e a nova regulamentação da transmissão de energia elétrica, aspectos importantes do novo ambiente e os agentes do setor de eletricidade brasileiro atual, a operação do sistema; indicadores de desempenho e decisões de investimento; o planejamento do sistema de eletricidade e os tempos envolvidos; as particularidades do planejamento da transmissão no Brasil. Na seqüência, estuda-se a tarifa de uso do sistema de transmissão, seu cálculo e regulamentação e as dificuldades e penalidades por indisponibilidade. Depois é feito estudo de Confiabilidade de Sistemas de Eletricidade, começando com estudo de modelos de taxas de falhas e confiabilidade, as etapas do ciclo de vida de produtos e sistemas baseados em taxas de falhas, modelos de análises de modos de falhas, bem como os mecanismos de falhas, parâmetros de confiabilidade e prevenção de falhas em infra-estruturas críticas. Além disso, é feito estudo de gerenciamento de riscos para melhorar a robustez do sistema, rompimento de cabos de transmissão e suas causas, vida útil de cabos, estudo de conexões e emendas à compressão, instalação em campo, lançamento de cabos e índices de empreiteiras. São estudadas as causas e os efeitos de possível diminuição da confiabilidade devido à re-estruturação do setor elétrico. São ainda estudados fatores que afetam as taxas de falha e também os mecanismos de falha em cabos de linhas de transmissão, as causas e impacto das saídas não planejadas e os custos das falhas sistêmicas de larga escala.

No terceiro capítulo, é feito um estudo sobre o planejamento de ensaios, a pesquisa de campo realizada com fabricantes e concessionárias, as simulações com elementos finitos, os estados limites de materiais e componentes, defeitos de montagem, propriedades mecânicas de tração, tensão e deformação de emendas de cabos em redes de transmissão, os tipos de ensaios de caracterização nas normas brasileiras, tipos de emendas e seu dimensionamento. Para concluir o capítulo é feito o planejamento dos ensaios de ruptura das emendas e a determinação do número de amostras que será usado.

No quarto capítulo, são estudados aspectos importantes dos resultados dos estudos e ensaios das emendas de compressão para linhas de transmissão aéreas. É feita análise dos resultados da simulação de não conformidades de implantação de emendas em campo, usando elementos finitos e buscando entender o

comportamento das emendas frente a empenamento não previstos pelo fabricante, mas que ocorrem em ambiente de pouca fiscalização. Também é relatado o resultado da pesquisa de campo, dos estudos da fiscalização e das normas de projeto e implantação de emendas. São mostrados resultados das análises microscópicas feitas em emendas rompidas com não conformidades e os resultados dos ensaios de ruptura.

No quinto capítulo, são feitas discussões, apresentadas sugestões de melhorias para aumentar a confiabilidade dos cabos baseados em qualidade de regulação, implantação e operação.

No sexto capítulo, são apresentadas pesquisas bibliográficas de algumas tecnologias emergentes capazes de minimizar as não conformidades observadas tais como emendas implosivas, monitoramento de cabos por efeito eletromagnético, cabos de alumínio termo resistentes e supercondutores.

Finalmente no sétimo capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e comentadas possibilidade de trabalhos futuros nessa linha de pesquisa.

2. Transmissão e confiabilidade

A partir da metade do século XX, com a crescente industrialização e demanda de eletricidade, bem como as vantagens de economia de escala e a estatização no Brasil, as empresas de eletricidade juntaram esforços e recursos com seus sistemas individuais de geração e transmissão em novas tecnologias de linhas de transmissão em alta tensão, obtendo maior confiabilidade a um custo mais baixo. Se uma parte do sistema falhasse, outra parte poderia suprir a energia até a manutenção ser terminada. A rede passou a ser operada em coordenações centralizadas por região. Para realizar a operação segura do sistema interligado regionalmente, os operadores independentes centralizados priorizavam a operação interconectada e a segurança do sistema. Isto significa manter a geração instantânea, as linhas de transmissão conectadas e as subestações disponíveis e sincronizadas.

A maior complexidade decorrente da re-estruturação do setor de elétrico, a partir de 1995 no Brasil, com um número maior de agentes, incluindo grandes comercializadores, comprando e vendendo em um número muito maior destas operações, fizeram a previsibilidade do sistema mais difícil e aumentaram a probabilidade de ocorrência de conflitos em atuações de contingências.

O operador independente do sistema deve ter governança operacional com regras estáveis, claras, entendidas, seguidas, auditáveis, aumentando a dificuldade de ocorrência de distorções de mercado, impedindo conflitos de interesse e divergências entre todos os agentes e com isto permitindo competição e aumento da eficiência em todo sistema. A competição no acesso e uso das melhores partes do sistema de transmissão é difícil de ser restringida e o operador independente do sistema deve permitir livre acesso a infra-estrutura de transporte independente de favoritismo, agendando antecipadamente o uso por certo período de tempo e disponibilizando todas as informações para todos agentes interessados.

A sobrecarga do sistema deve ser evitada, impedindo comercialização de geração localizada com transporte que possa causar congestionamento e reduzir a confiabilidade do suprimento e aumentar o risco de falha sistêmica. Para evitar essa sobrecarga permite-se colocar o sistema fora do menor custo possível, ou seja, do ótimo da operação.

O valor cobrado pelo uso do sistema de transmissão pode variar com a localização e o tempo de uso e ser baseado em oferta e demanda, com preços variáveis dependendo da infra-estrutura usada, de equipamentos indisponíveis e do custo de congestionamento da transmissão. O custo marginal locacional fornece uma melhor sinalização dos preços em relação à necessidade de curto e longo prazo melhorando a eficiência no uso dos recursos em capacidade da rede e investimentos em expansão.

Os serviços de geração, transmissão e distribuição des-verticalizados com as re-estruturações do setor elétrico, permitem aos agentes comercializar livremente seus excedentes e faltas, aumentando as dificuldades no gerenciamento da operação do sistema de transmissão.

O operador independente do sistema passa a ter dificuldades e desafios, tais como o gerenciamento do congestionamento da transmissão, as perdas por efeito da resistência ôhmica e os serviços ancilares. O congestionamento ocorre devido aos

limites nos fluxos de potência. As tarifas devem prever as perdas de potência nas resistências ôhmicas e os serviços necessários para manter a operação segura e confiável.¹

2.1 Características de sistemas de energia elétrica

Os sistemas de energia elétrica podem ser considerados como geração, transporte e distribuição. É importante conhecer as características principais de cada um deles para melhor entendimento da pesquisa realizada.

2.1.1 Geração

A energia gerada em forma de eletricidade precisa chegar aos centros de consumo e as que mais usam o sistema de transmissão são as originárias de fontes renováveis devido às características de estarem disponíveis longe destes centros.

De forma geral, fontes renováveis são as que não consomem de forma irreversível os recursos naturais. Dessa forma, energia eólica, solar, e hidráulica são fontes renováveis que são continuamente recicladas pela natureza. Apesar disso, as

¹ Estudos adicionais em planejamento de expansão em mercados re-estruturados são Bajay (2003), Bajay (2006), Buechler (2005), Bushnell e Stoft (1996), Chao, e Huntington (1998), Eto (2004), Finon, e Midtun (2004), Gomez e Rothwell (2003), Hogan (1993). IEEE (1990), Ilic (1998), Ilic e Skantze (2001), Joskow (1997) Joskow (2005), Karady (2006), Murray (1988), Newberry (2005) e Pansini (2004).

hidroelétricas são deixadas fora dessa categoria por razões de incentivo fiscais uma vez que essa forma de geração não necessita mais de incentivos fiscais para se tornar competitiva. A energia renovável², apesar de não necessitar de combustível, pode ter custo de implantação maior que as fontes movidas a combustíveis fósseis, daí a eventual necessidade de incentivos fiscais. Outra vantagem da energia renovável é seu impacto ambiental bastante menor tanto em poluição, quanto em aquecimento global, de uma forma geral.

Uma desvantagem de algumas formas de energia renovável é o fato delas não serem despacháveis, tais como energia solar e eólica, que apesar de poderem ser armazenadas tem custos de armazenamento muito altos para garantir sua viabilidade econômico-financeira.

Todas as fontes de energia renovável têm necessidade de serem instaladas em locais específicos em que existe possibilidade de geração técnico-econômica viável, o que as fazem ser viáveis apenas em alguns lugares do mundo e em algumas localizações onde suas fontes são encontradas de forma abundante. Para gerações localizadas, distantes dos centros consumidores do ponto de geração, a energia deve ser transportada por redes de transmissão de alta tensão (a menos que sejam colocadas diretamente na rede de distribuição) o que pode causar algum impacto ambiental devido às regiões que devem ser desmatadas para passagem das linhas com distanciamentos suficientes para garantir isolamento e segurança. Mesmo a energia gerada por biomassa deve ser gerada próxima de centros produtores intensivos de produtos agrícolas.

Os parques eólicos são construídos em regiões que, além de se obter energia eólica de alta potência e duração, possam ser colocadas diversas turbinas eólicas com distância de três diâmetros de pás entre as turbinas na direção perpendicular ao vento e na direção do vento a distâncias de dez diâmetros de pás.

² Ver Jannuzzi (2000) e Goldenberg e Villanueva (1998)

Os impactos ambientais desses parques eólicos são o ruído gerado e o efeito estético. Outro inconveniente é essa energia não ser despachável e mais difícil de prever com antecedência de que as hídricas e solares. Nesse caso, linha de transmissão interligando a geração com os centros consumidores devem ter segurança maior que as linhas de transmissão para energias renováveis convencionais e despacháveis como a hídrica.

2.2 Transmissão e distribuição

Segundo Fuchs (1998), as tensões nos terminais dos geradores são da ordem de 15 a 25 kV e devem ser elevadas para que possam ser transmitidas em longas distâncias usando cabos de menores bitolas e perdas relativamente baixas. Essa tensão é elevada, podendo atingir tensões superiores a 525 kV. A perda característica de uma linha de transmissão depende do valor econômico obtido em projeto (valores da ordem de 5 a 10% da potência a ser transportada são padrões, entretanto podem chegar até 20%), definindo a tensão e bitola a serem especificados.

Nos centros consumidores essas tensões são abaixadas para 69 kV, fazendo uso de linhas de sub-transmissão até as subestações de distribuição onde são reduzidas para tensões da ordem de 15 kV.

Ainda segundo Fuchs (1998), as linhas de altíssimas tensões vão de 230kV até 750 kV com distâncias da ordem de 600 a 800 km enquanto as linhas de 138KV a 230KV tem distâncias típicas da ordem de 300 km.

As linhas também podem ser classificadas de acordo com seu comprimento:

- Abaixo de 80 km são denominadas de linhas curtas

-Entre 80 km e 240 km a linha é denominada de linha média

-Acima de 240 km a linha é denominada de linha longa

Essa classificação de comprimento pode ser usada na modelagem das linhas.

Os componentes principais das redes de linhas de alta tensão são torres, fundações, condutores, isoladores, aterramento, conectores de blindagem contra descargas atmosféricas.

2.2.1 Linhas de sub-transmissão

As linhas de sub-transmissão interconectam as subestações de alta tensão com as estações de distribuição dentro de uma cidade. Segundo Fuchs (1998), as tensões usuais de sistemas de sub-transmissão são 138KV, 69kV e 34,5 kV. Os comprimentos máximos são da ordem de 80 a 100 km. As redes de sub-transmissão costumam ser interligadas com topologias (radial, anel, mista) adequadas para garantir a continuidade do suprimento mesmo com falha de uma linha (critério "N-1").

2.3 Características elétricas de linhas de transmissão

A função principal das linhas de transmissão é transportar energia com mínimas perdas, da geração até os centros de consumo em localização distante. Os principais pontos de projeto são resistência série, capacitância paralela, indutância série e condutância paralela.

Os efeitos indutivos e a capacitância paralela dependem da forma geométrica dos condutores e sua disposição na linha. A condutância paralela não é considerada no

modelo de linhas de transmissão devido à corrente de fuga ser muito menor que a corrente nominal. A resistência série é dependente da composição do condutor em uma dada temperatura.

Os modelos elétricos de linhas curtas e médias são feitos com parâmetros concentrados:

-No caso de linhas curtas, a capacitância paralela não é considerada e nesse caso o modelo elétrico da linha é representado por um circuito equivalente monofásico com resistência R e reatância X em série.

-No caso de linhas médias, elas podem ser representadas por um circuito monofásico contendo resistência em série com a reatância indutiva, em paralelo com duas capacitâncias iguais para terra.

No caso de linhas longas, onde o comprimento é maior que 250 km, os parâmetros passam a ser uniformemente distribuídos ao longo da linha. As equações diferenciais de tensões e correntes descritas como função da distância e de tempo podem ser resolvidas para encontrar a impedância série e a capacitância paralela.

Estes fatores definem características importantes nas linhas de transmissão, inclusive propagação de variações e conseqüente necessidade de velocidade de acionamento de proteções.

2.4 Histórico de sistemas de transmissão e padronização das tensões

2.4.1 Mundial

A produção de energia elétrica a partir da energia mecânica em escala comercial ocorreu no final do século XIX: a invenção da lâmpada incandescente por Thomas

A. Edison em 1880, provocou expressivo crescimento ao setor de energia elétrica. A inauguração da central elétrica de Pearl em 1882, também por Edison, inicia o uso de complementaridade da iluminação pública noturna e o suprimento de energia diurno para o início da industrialização com motores na cidade de New York, aumentando a demanda por eletricidade³.

A partir do aumento de demanda surgem dificuldades com transporte e distribuição da energia elétrica em corrente contínua. Até então, a energia elétrica era consumida na mesma tensão que era produzida em corrente contínua. Havia necessidade de condutores com secções cada vez maiores inviabilizando economicamente a expansão da rede e havia necessidade de construir gerações novas bastantes próximas umas das outras e próximas dos centros de consumo. Surgia ai outra dificuldade: os novos potenciais hidroelétricos viáveis estavam a distâncias cada vez maiores e eventualmente fora de alcance.

O transformador a corrente alternada inventado em 1885, contornou esta dificuldade, permitindo elevar ou abaixar a tensão, com alto rendimento e transmissão em níveis de tensões elevadas com menos perda de energia devido ao efeito Joule.

Alguns empreendimentos importantes dessa época:

1886 – Linha monofásica de 29,5 km para Roma, transportando 2700 HP;

1888 – linha na Alemanha com comprimento de 180 km com tensão de 11kV, trifásica.

³ Estudos adicionais sobre Histórico de sistemas de transmissão pode ser feito em Fuchs (1979)

Em 1888, Tesla e Ferraris inventaram os motores de indução à corrente alternada. O setor de energia elétrica teve crescimento expressivo, principalmente devido às características vantajosas do sistema alternado na geração, transporte, distribuição e consumo. O sistema de corrente contínua ainda é usado em de processos eletrolíticos, acionamento de motores de velocidade variável (tração elétrica) e laminações precisas em siderurgia.

Em 1908, iniciou-se o uso da tensão de 60 kV; em 1910, 110 kV; em 1918, 150 kV. Em 1922 iniciou-se a operação da primeira linha em 230 kV, em 1926, de 287 kV. Esta tensão foi superada em 1950, com uma linha de 1000 km de comprimento e tensão de 400 kV na Suécia. Em 1955 construíram-se as linhas em 345 kV nos Estados Unidos e estudos e experiências com linhas de 500 kV, sendo a primeira construída em 1962. De 1964 a 1967, no Canadá, foram construídas as primeiras linhas de 735 kV.

2.4.2 Brasil

O potencial hidroelétrico do Brasil é bastante elevado, porém com centros de carga nem sempre próximos às centrais hidroelétricas, exigindo a construção de longas linhas de transmissão para o seu aproveitamento levando energia elétrica aos centros consumidores⁴.

A evolução das linhas e suas tensões de transmissão foram lentas até a primeira metade do século XX. A primeira linha de transmissão no Brasil foi construída em 1883, em Diamantina, Minas Gerais, para transportar a energia produzida por duas rodas d'água e dois dínamos Gramme, com 2 km de distância e, nessa época, era a linha mais longa do mundo, com esta energia acionando bombas hidráulicas em uma mina de diamantes.

⁴ Estudos adicionais sobre o tema de potencial hidráulico brasileiro podem ser feitos em Tolmasquim (2005).

Em 1901, inaugurou-se a Central Hidroelétrica de Santana do Parnaíba, da “San Paulo Light and Power Ltd.” em 40 kV. Em 1914, a mesma empresa introduziu o padrão 88 kV para transporte da energia pela Usina Hidroelétrica de Itupararanga. Esse padrão é mantido até hoje incluindo para sub-transmissão. Em 1947 foi inaugurada a primeira linha de 230 kV no Brasil, com 330 km, para interligar os sistemas da Rio Light e São Paulo Light, inicialmente em 170 kV e em 1950, em 230 kV.

Depois dessas implantações, vieram as linhas de 230 kV do sistema da CHESF; 161 e 345 kV da CEMIG e FURNAS, 460 kV da CESP, as linhas de 500 kV de FURNAS e 750 kV de Itaipu já na década de 1970.

A IEC – *Internacional. Electrotechnical Commission* – tem procurado a padronização das tensões nas linhas de classe extra-elevada, recomendando: 330 até 345/362 kV; 380 até 400/420 kV; 700 até 750/765 (800) kV (tensão nominal/tensão máxima permissível em regime de operação permanente). Por seu turno, nas classes de tensões inferiores, a normalização continua de forma regional, ou nacional⁵.

No Brasil, as tensões padronizadas preferenciais para linhas de tensão elevadas são 33/34,5 kV, 66/69 kV, 132/138 kV, 220/230 kV.

Há ainda uma extensa rede de linhas em 88 kV pertencente ao sistema de São Paulo na região do Paranapanema.

A introdução de novos padrões de tensão para classe de tensões extra-elevadas só se justifica quando a demanda de energia é tal que justifique a sua duplicação, neste caso as linhas de 220/230 kV devem passar imediatamente a 380/420 kV e mesmo para 500 kV, enquanto que sistemas com linhas em 330/345 kV devem passar para 735/750 kV.

⁵ Estudos adicionais sobre padronização das tensões de linhas transmissão podem ser feitas em Fuchs (1979)

2.4.3 Histórico de materiais usados em linhas de transmissão

O cobre foi o material mais utilizado para transmitir energia elétrica, no início do desenvolvimento do setor elétrico em 1880. As dimensões dos cabos de cobre foram estabelecidas principalmente em função das solicitações mecânicas. Os condutores utilizados eram de maior diâmetro que o necessário para a condução de corrente, devido à relação entre a alta condutividade e a resistência mecânica do cobre, surgindo a necessidade de revisão dos critérios de projetos de cabos aéreos. Devido ao peso dos condutores, os comprimentos dos vãos, a distância entre duas estruturas, era pequena e aumentavam o custo total das linhas de transmissão.

Antes da virada do século, o alumínio começou a substituir o cobre para transmissão e distribuição de energia elétrica; para efeito de comparação o alumínio perde do cobre em condutividade volumétrica, com uma relação condutividade/peso duas vezes maior que a do cobre e relação resistência/peso 30 % maior.

As primeiras linhas de transmissão usando cabos de alumínio foram construídas na Califórnia entre 1895 e 1898. A primeira linha de transmissão com cabo de alumínio de sete fios foi construída em 1899 e ficou em operação por mais de 50 anos.

No início do século XX, já havia necessidade de um condutor com melhor relação resistência/peso. Em 1907, um novo cabo composto de alumínio e aço foi introduzido, o *Cabo de Alumínio com Alma de Aço – CAA*, combinando o baixo peso e a alta corrente do alumínio com a resistência mecânica do aço galvanizado. A aceitação foi rápida e foi muito utilizada em todo o mundo, devido à ótima condutividade do cabo CAA, sua excelente relação resistência/peso e à facilidade de manuseio. A partir dos anos 20, foi o cabo mais utilizado para a eletrificação rural nos Estados Unidos.

Em 1939, um novo cabo de alumínio, magnésio e silicone, *Cabo de Alumínio com Alma de Alumínio – CA* foi desenvolvido para melhorar as propriedades mecânicas e elétricas do CAA, tais como o peso e resistência à corrosão, entretanto reduziu-se também a resistência à fadiga.

2.4.4 Evolução do planejamento de transmissão no Brasil

Com as diferentes integrações históricas ocorridas e com a re-estruturação do setor elétrico a partir de meados da década de 90, o planejamento da expansão no setor elétrico no Brasil passou por duas etapas distintas:

1) Planejamento em ambiente de monopólio estatal, determinativo e sujeito às políticas públicas governamentais;

2) A partir de 1995 o planejamento da expansão no setor elétrico brasileiro adquire características planejamento *majoritariamente indicativo* (empreendimentos de transmissão, na rede básica, continuaram determinativos), devido a entrada de agentes privados, tendo também algumas decisões descentralizadas.

Na fase estatal, criou-se o Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos – GCPS em 1982, com as 35 empresas concessionárias, coordenadas pela ELETROBRÁS, desenvolvendo planejamento da expansão do Setor Elétrico. O GCPS incluía o Comitê Técnico para Estudos Energéticos (CTEE), o Comitê Técnico para Estudos de Transmissão (CTST), o Comitê Técnico para Estudos de Mercado (CTEM) e a Comissão do Programa de Investimentos na Distribuição (CPID).

Nesta época, o planejamento da expansão do sistema elétrico era formulado em três etapas:

a) Estudos de Longo Prazo: Com horizonte de até 30 anos, identificando macro-decisões de desenvolvimento do sistema elétrico, planejando a composição futura

do parque gerador, eixos do sistema de transmissão e expansão de médio prazo. A atualização desses estudos era de 5 a 6 anos

b) Estudos de Médio Prazo: O horizonte de 15 anos estabelecia programas de referência de geração, transmissão, e necessidades de recursos financeiros. A atualização desses estudos era de 2 a 3 anos.

c) Estudos de Curto Prazo: Horizonte de 10 anos, realizava o ajuste da expansão do sistema de acordo com variações conjunturais, mercado e atrasos no cronograma. A atualização era anual, sendo gerado o Plano Decenal de Expansão do Setor Elétrico.

Na reestruturação do Setor Elétrico em meados da década de 90, o planejamento energético era responsabilidade do Ministério de Minas e Energia (MME), mas sua função deixa de ser prioritária, com uma orientação de mercado, buscando reduzir as incertezas envolvidas e aproximar a trajetória da expansão de soluções eficientes.

A Lei n^o 9.478, de 06/08/97, instituiu o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), ligado à Presidência da República e presidido pelo MME, assessora a Presidência da República na formulação de políticas e diretrizes de energia, e rever periodicamente as matrizes energéticas.

O MME criou, em 10 de maio de 1999, através do Art. 1^o da Portaria n^o 150, o Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos - CCPE, para coordenar a elaboração do planejamento da expansão dos sistemas elétricos brasileiros, com caráter indicativo para a geração. O CCPE elaborava e apresentava propostas relativas à expansão do sistema. O planejamento da expansão da transmissão, elaborado pelo CCPE, tinha caráter determinativo para as obras consideradas inadiáveis e para garantir condições de atendimento do mercado,

constituindo o Programa Determinativo da Transmissão; para as demais obras de transmissão, em longo prazo, o planejamento do CCPE era indicativo.

2.5 Sistemas de Transmissão após a reestruturação do setor de eletricidade no Brasil

Após a reestruturação do setor elétrico brasileiro, tem-se observado que alguns eventos de falha em sistemas de transmissão têm causado efeito cascata, podendo levar a falhas de grandes proporções. Algumas causas comuns dessas falhas de larga escala, em mercados reestruturados, podem ser mencionadas:

-O treinamento inadequado e perda de pessoal experiente dos operadores do sistema;

-O ambiente de operação de rede mais vulnerável, conseqüente de diminuição do excesso de capacidade planejado e das potenciais maiores volatilidades e comercialização entre sub-mercados regionais, no caso da maioria dos países com mercados competitivos;

-Vulnerabilidade das redes de transmissão quanto às falhas, devido a contingências operacionais, com ocorrência de mais de uma falha dentro do período necessário para o sistema recuperar de uma única falha, ou seja, a ocorrência de falhas múltiplas concomitantemente, inviabilizando a prática usual de planejamento com contingência N-1, ou seja, o sistema é capaz de funcionar mesmo com um elemento em falha.

Por outro lado tem-se observado eventos de falhas sistêmicas de proporções cada vez maiores e maiores custos de interrupção de eletricidade (custos da energia que

se deixa de oferecer) e custos sociais de difícil mensuração devido aos custos intangíveis associados.

Segundo o Operador Nacional do Sistema [ONS (2011)], o Brasil tem hoje mais de 76 mil km de linhas de transmissão, o que o coloca entre os quatro maiores no ranking mundial em extensão na área de transmissão configurado por linhas com tensões de 138, 230, 345, 440, 500, 750 kV AC e ± 600 kV DC. Estas linhas de transmissão integram as regiões e interligam os quatro sub-mercados de energia elétrica existentes no país diminuindo os riscos de escassez devido à hidrologias desfavoráveis e devido à falhas operacionais.

A coordenação da operação do sistema interligado nacional exige alto grau de confiabilidade operacional das linhas de transmissão e, também das emendas implantadas. Interrupções para manutenções preditivas, preventivas e corretivas podem ter altos custos financeiros, sendo até mesmo de vidas humanas, devido à periculosidade inerente às operações envolvidas. As interrupções podem também provocar desgastes de imagem das empresas envolvidas na cadeia de suprimento de energia. Neste aspecto, a confiabilidade das emendas das linhas de transmissão, torna-se de importância primordial para o funcionamento adequado do sistema de energia elétrica do país. Deve-se considerar também que os custos de não conformidade, depois de implantadas as linhas, ficam sendo bastante mais elevados.

Para melhorar essa condição, é necessária uma revisão dos procedimentos de implantação das linhas de transmissão de energia elétrica considerando economia, confiabilidade e redução da probabilidade de falta de suprimento.

2.6 Relacionamento de energia com infra-estruturas críticas

A capacidade de sobrevivência de um sistema pode ser expressa como combinação de confiabilidade, disponibilidade, segurança e proteção ao ser humano. Cada componente da infra estrutura crítica irá estressar uma combinação diferente destes quatro fatores para assegurar a operação apropriada do sistema completo contra falhas deles próprios (componentes com mau funcionamento, inter-relacionamentos normais, mas complexos entre os sistemas que tendem a falhar) e ataques externos (ambientais, propositais, etc.). Os modelos estruturados permitem apresentar a confiabilidade do sistema como sendo derivada de determinadas confiabilidades de seus componentes. A probabilidade de sobrevivência do sistema depende explicitamente de cada componente constituinte e de seus inter-relacionamentos, bem como das inter-relações entre sistemas. A análise da confiabilidade pode prover um melhor entendimento sobre a verossimilhança das falhas ocorrerem em um sistema e pode prover visões determinísticas para desenvolver melhorias sistêmicas sobre vulnerabilidades inerentes e definidas nos componentes do sistema e entre sistemas. Isto inclui sistemas de energia (potência elétrica, petróleo, gás natural), telecomunicações, sistemas de suprimento de água, transportes (rodoviário, ferroviário, aéreo, aquático), bancos e financeiras, emergenciais e serviços governamentais. Na nova economia estas infra estruturas interconectadas têm se tornado cada vez mais frágeis e sujeitas a interrupções que podem ter conseqüências regionais, nacionais e globais.

Entender, analisar e melhorar a robustez e resiliência destas infra-estruturas requer pontos de vista múltiplos e um vasto conjunto de habilidades interdisciplinares. De forma resumida, são necessários engenheiros (civis, eletricitas, industriais, mecânicos, de sistemas) para entender detalhes tecnológicos das infra estruturas e realimentação dinâmicas, especialistas computacionais, em tecnologias de informação, em telecomunicações e redes para entender os enlaces eletrônicos e computacionais entre as infra estruturas. Os economistas são necessários para

entender o ambiente de negócio dos proprietários e operadores dos setores público e privado. Os cientistas sociais, advogados, analistas de regulação, especialistas em políticas públicas.

2.7 Falhas sistêmicas de larga escala e seus custos

Os custos de falhas sistêmicas de grandes extensões e duração interrompem lazer e trabalho, serviços vitais de saúde (mesmo considerando fontes redundantes) e de suprimento de água, com danos na infra estrutura de produção de bens de capital.

A literatura de custos de falhas sistêmicas de larga escala (“Black out”) é esparsa e baseada em técnicas locais. Geralmente, os custos de falhas sistêmicas de larga escala são estimados de forma não padronizada e específica em artigos de imprensa nem sempre científicos. Usualmente esses custos trazem prejuízos aos consumidores pela ocorrência de falhas no sistema de energia elétrica. Poderia ser pensado na interrupção de receita dos fornecedores de energia elétrica, com impacto econômico bem menor. O impacto econômico agregado desses eventos varia bastante, com custos na faixa de bilhões de dólares⁶.

Segundo estudos de Crisp (2003), em 1998 na Nova Zelândia ocorreu uma falha sistêmica de larga escala (“Black out”) de dois dias com custo estimado de US\$ 50 Milhões (1998 US dólares). A interrupção de fornecimento de 1997 em Nova York

⁶ O assunto de falhas sistêmicas de larga escala (“black outs”)pode ser estudado com maiores detalhes em Almeida e Prada (2005), Donatelli (2005), [Dowlatabadi \(2004\)](#) Kammen e Pacca (2004), Sheldon (2003), Zimmerman (2007),

causou perdas tangíveis de US\$ 1bilhão (ajustado para dólares de 2002) e no Nordeste dos EUA em 2003 na faixa de dois até US\$ 10 bilhões de dólares⁷.

Os casos de interrupção de serviços na Suécia – Dinamarca aconteceram no dia 23 de Setembro de 2003, com desligamento de 1850 MW na Dinamarca e 3000 MW na Suécia. Mais de dois milhões de pessoas no sul da Suécia e em Kopenhagen tiveram a energia interrompida e serviços restabelecidos após seis horas e meia.

Na Itália ocorreu uma falha em 28 de Setembro de 2003, que foi a pior em mais de 50 anos, com aproximadamente 19600 MW de carga elétrica perdida em área de 277000 km quadrados, 56 milhões de pessoas tiveram seus serviços de eletricidade desligados e restabelecimento em 24 horas.

No nordeste dos EUA e sul do Canadá uma falta de energia generalizada ocorreu em 14 de Agosto de 2003 afetando os estados de New York, Ohio, Michigan, Pensilvânia, New Jersey, Connecticut, Vermont, Massachusetts e Ontário. Mais de 60000 MW de carga de eletricidade foi perdida em uma área quadrada de 9300 km quadrados. Por volta de 50 milhões de pessoas tiveram seus serviços de eletricidade desconectados, sendo restabelecidos em 48 horas. A falha sistêmica dos EUA em agosto de 2003⁸ afetou mais de 50 milhões de pessoas.

As causas⁹ foram também divididas em falhas devido a eventos isolados únicos e eventos múltiplos. Os principais eventos de causa única foram: falha do

⁷ O assunto de falhas sistêmicas de larga escala (“black outs”)pode ser melhor detalhado em Almeida e Prada (2005), Crisp(2004), Dobson (2004), European Comm. (2006), Farrel (2004), Zimmerman e Wagner (2004),

⁸ Este assunto de falhas sistêmicas de larga escala (“black outs”) está bem detalhado em Crisp(2004) e Farrel (2004).

⁹ Este assunto de falhas sistêmicas de larga escala (“black outs”) está bem detalhado em Crisp(2004) e Farrel (2004).

equipamento (29%), erro humano (5,8%), falta de capacidade (4.1%), fogo (3.3%) e vandalismo (2,5%). As principais falhas em saídas devido às falhas múltiplas foram clima (59,1 %), equipamento (22,7%), desconhecida (9.1%) e erro humano (4.5 %).

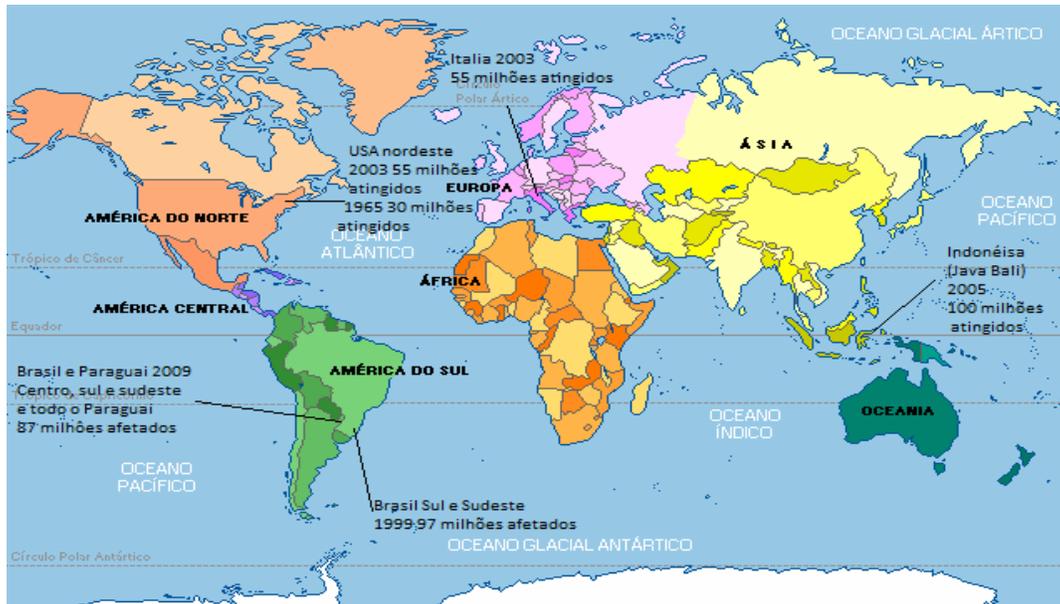


Fig. 2.1 Principais eventos mundiais recentes de falhas em larga escala [Baseado em Prada e Almeida (2007)]

A ocorrência de falhas múltiplas levou a um número mais elevado de clientes¹⁰ sem energia em relação ao evento anterior mais devastador (639.040 contra 158.942), duração média mais elevada de horas (165 contra 39) e o mais elevado MW interrompido (2.139 contra 653). Os números médios mostraram um padrão ligeiramente diferente: O número mediano dos clientes perdidos foi mais elevado para saídas únicas (63.500 contra 36.006), entretanto, a duração mediana era mais elevada para múltiplas saídas (13.3 horas contra 7 horas).

¹⁰ Este assunto de falhas sistêmicas de larga escala ("black outs") está bem detalhado em Crisp(2004).

Os dados referem-se aos sistemas de potencia de 100-400 kV (Nordel, 1999) baseadas nas estatísticas dos anos 1990 - 1999. O número médio anual total foi de 1765 falhas; sendo que as linhas e os cabos aéreos responderam por 975 destas falhas sendo 342 (aproximadamente 19 por cento) do número total das falhas causadas por chaves de manobras ou equipamento da proteção.

No Brasil, os estudos de custos de interrupção são bastante escassos, considerando-se um valor na ordem de 1000 US\$ / MWh no final da década de noventa e tendência de aumento crescente da importância e custo da eletricidade. Esses valores são médios, dependendo do local e duração do evento de interrupção.

Segundo estudos de Almeida e Prada (2007) em 18/04/1986 houve ocorrência de falha de duração de 2,40 horas afetando 45 milhões de pessoas em seis estados do sul e sudeste. Em 18/08/85 ocorreu outra falha sistêmica de larga escala com efeitos menores devido a ter ocorrido em um Domingo. Em 13/12/94 houve interrupção do fornecimento de Itaipu com rápido restabelecimento; em 26/03/96 houve uma interrupção de 1,4 horas em Minas, Goiás e Brasília. Em 24 e 25 de 04/1997 ocorreu uma falha no sistema S/SE/CO necessitando de dois dias para recompor o sistema, com interrupção de 15% da carga. Em 11/03/1999 houve interrupção do sistema que interliga Itaipu com até 4,5 horas de demora de restabelecimento nos estados de Rio de Janeiro e Espírito Santo. Em 21/01/2002 ocorreu interrupção de duração de 113 minutos e custo estimado de 1,54 US / kWh e um prejuízo médio de US\$108.000.000,00 (cento e oito milhões de dólares relativos ao ano de 1990), considerando apenas aspectos tangíveis dos custos¹¹.

¹¹ O assunto de falhas sistêmicas de larga escala ("black outs") pode ser melhor detalhado em Almeida e Prada (2005), Crisp(2004), Dobson (2004), European Comm. (2006), Farrel (2004), Zimmerman e Wagner (2004),

Estes números crescentes demonstram a necessidade de maior regulação dos sistemas de eletricidade, principalmente os de transmissão, devido à dimensão de seu impacto. Esta regulação também difere da tradicional onde os aspectos mais relevantes são auditorias de falhas e aplicação de penalidades simplesmente; é preciso haver sinergia entre o órgão regulador e a concessionária permitindo aprendizado conjunto e redução de vulnerabilidade.

2.8 A regulação da confiabilidade da transmissão

Os padrões operacionais para regular a confiabilidade da rede de transmissão aplicam-se a todos os sistemas de eletricidade para assegurar que existe excesso de capacidade suficiente para acomodar condições de operações severas ou eventos extremos. Tais padrões não são projetados para encontrar confiabilidade operacional absoluta, assim isto pode requerer um nível de investimento que nem é prático ou efetivo em custos. Ao invés disso, eles são projetados tipicamente para encontrar a confiabilidade dentro de limites específicos.

Atualmente, os padrões de operação para as redes de transmissão empregam tipicamente um aspecto determinístico de contingência, tal como o padrão N-1, e até recentemente muitas redes de transmissão tinham capacidade redundante para obter confortavelmente estes padrões de operação. Entretanto, arranjos regulatórios mais efetivos implementados com a reestruturação de mercado diminuíram muito esta capacidade de transmissão redundante.

As sugestões para fazerem estes padrões mais eficazes incluem:

- Melhorar os padrões determinísticos garantindo a utilização do padrão N-1 (significando que a rede garante seu funcionamento adequado entregando

eletricidade em uma dada frequência e tensão mesmo quando um elemento da rede entra em falha);

- Fazer com que os padrões de confiabilidade voluntários sejam mandatórios aumentando a verossimilhança de padrões existentes nos mercados de eletricidade re-estruturados;

- Revisar as premissas e metodologia de cálculo dos padrões de eletricidade para refletir a nova dinâmica das condições de operação resultantes da re-estruturação dos mercados de eletricidade, incluindo empregar análise de cenários e de risco probabilísticos, para simular e avaliar o comportamento do sistema em várias condições e desenvolver estratégia efetiva de respostas;

- Desenvolver estratégias de gerenciamento de riscos pró-ativas para aumentar a confiabilidade das redes de transmissão nos mercados competitivos.¹²

2.9 Operação de sistema de transmissão

Os mercados de energia elétrica re-estruturados têm transações bilaterais, do pool e dos serviços ancilares. As transações bilaterais são feitas entre um Comercializador e um comprador diretamente, decidindo preços e quantidades, o operador do sistema coordena as necessidades de transporte. As transações são feitas usualmente em leilões de compra e venda envolvendo geradores e compradores (distribuidoras ou clientes), onde um gerador faz uma oferta de certa quantidade a ser vendida. Os serviços ancilares são contratados pelo operador independente do

¹² Estudos mais aprofundados em confiabilidade de transmissão podem ser feitos em Allan e Billinton (1988), Allan e Billinton (1996), Allan (2006), Alvarado (2006), Chowdhury (2005), IEEE (2008) e Shahidehpour (2002)

sistema e divide os custos de forma adequada com os compradores. Um desses serviços pode ser o suprimento de potência reativa para controle da tensão; outros desses possíveis serviços que ainda não são feitos no Brasil são potência real para controle da frequência e compensação das perdas ôhmicas.

Antes dos mercados competitivos, a operação do sistema era feita em ambiente caracterizado por estabilidade relativa, previsibilidade, capacidade de transmissão maior e fluxos inter regionais limitados. A reforma do mercado e regulação mais efetiva alterou a operação da rede de transmissão, com novos desafios para os operadores de sistema.

A redução de investimentos ocorrida após 1980 levou a uma redução na margem de segurança da capacidade de transmissão. Por outro lado, a reforma dos mercados, em âmbito mundial, aumentou o uso da rede com uma maior volatilidade do uso, devido ao aumento da comercialização (no Brasil com a separação da comercialização, do despacho e operação centralizada este efeito pode ser bastante amenizado). As redes de transmissão não foram planejadas e projetadas para isso, sistemas de transmissão têm se tornado mais frágeis e aumenta o desafio de balanceamento em tempo real. Os arranjos regulatórios, investimentos e incentivos para gerenciamento eficiente das redes de transmissão podem influenciar a efetividade da operação dos sistemas e a capacidade de gerenciar eventos extremos e de emergência de forma efetiva.

A operação efetiva do sistema é primordial para o desempenho bem sucedido de um mercado competitivo de eletricidade bem como as regras da operação que são decorrentes das características físicas da eletricidade de não poder ser eficientemente armazenada. As faltas de balanços elétricos em um ponto dentro de uma rede de transmissão interconectada podem ter repercussões imediatas e severas para a qualidade e capacidade de suprimento da eletricidade através da rede interconectada. A demanda e o suprimento devem ser balanceados em tempo real na rede interconectada para assegurar que o suprimento seguro atinja suas

necessidades de tensão e de frequência. O modo mais eficiente de encontrar esta necessidade é através de coordenação central na operação do sistema.

Além disso, os operadores de sistema são responsáveis pela execução de procedimentos de emergência tais como gerenciar eventos extremos minimizando o impacto no suprimento e protegendo a infra-estrutura crítica de eletricidade.

Os novos riscos e desafios para manter a operação dos sistema confiavam em mercados de eletricidade competitivos, as implicações na operação efetiva do sistema, as ações tomadas para melhorar a efetividade da operação do sistema, a coordenação de mercados regionais melhorada, as implicações para o projeto e execução de procedimentos de emergência e o papel de ajuda efetiva na operação em um mercado competitivo na maioria dos países, e não no Brasil, ainda são questões estudadas e pesquisadas, incluindo para reduzir o gerenciamento de congestionamento e poder de mercado.

2.10 O desempenho da rede de transmissão

As redes de transmissão são tratadas como monopólios naturais fisicamente separados de outros componentes da cadeia de valor e regulados separadamente. A regulação procura criar incentivos para a operação eficiente e para o seu desenvolvimento; os investimentos têm sido considerados questões críticas e preocupantes.

Um desafio especial para os reguladores é encontrar um balanço adequado entre incentivos para minimizar custos e taxas de rede e a expansão das redes de transmissão, a perspectiva de redução de custos como foco principal de regulação é questão preocupante, outros fatores como desempenho operacional, manutenção e

investimentos a serem otimizados levam a decisões operacionais com perdas de eficiência substanciais e custos financeiros maiores para clientes.

Os preços marginais locacionais podem melhorar a informação operacional sobre o desempenho das redes de transmissão, permitindo que reguladores e participantes de mercado identifiquem mais claramente e acessem opções mais efetivas em custos para o aumento e investimento em novas linhas de transmissão. Isto pode também ajudar os reguladores a desenvolver incentivos baseados em desempenho, com maiores oportunidades de serviços de rede.

As aprovações de construção, localização e ambientais também afetam novos investimentos. Caso os processos de aprovação forem ineficientes e inconsistentes criarão incertezas e riscos regulatórios dificultando o entendimento das necessidades do sistema. As decisões de regulação devem ser transparentes, consistentes e, devendo também incentivar o desempenho eficiente da rede e encorajando o investimento no instante correto e na dimensão correta. Os preços também devem refletir os custos e este processo deve ser melhorado. O bem estar social pode medir o desempenho do mercado de energia definindo o custo da energia e o benefício que a energia traz para a sociedade, medido pelo desejo da sociedade pagar essa energia. Com a demanda da energia sensível (elástica) ao preço, o benefício social é uma função inversa da carga, a qual o consumidor está desejoso de comprar. Caso a demanda não seja sensível ao preço, o bem estar social é a função inversa da quantidade de dinheiro pago pela energia.

2.11 Investimentos em transmissão

Os investimentos em transmissão são motivados pela oportunidade de reduzir os custos da energia elétrica com aproveitamento de recursos energéticos mais distantes e redução dos custos sociais de congestionamento das redes. Os

investimentos ótimos buscam compromisso entre investir em transmissão adicional, na redução associada de congestionamento e custos de perdas, bem como no aumento da confiabilidade do sistema¹³.

No caso de mercados competitivos na maioria dos países, o investimento em transmissão é um gasto com um ativo de longo ciclo de vida e o congestionamento é um fluxo que depende do fornecimento futuro e das condições de demanda no mercado de eletricidade e de entrada (preços de combustíveis). Neste caso, os benefícios econômicos de um investimento de transmissão são incertos no instante que ele é feito e também sobre um longo período futuro.

Essa incerteza pode afetar os preços locais e decisões de despacho em cada sub-mercado e reduzir os congestionamentos e a eficiência econômica. Os investimentos em transmissão envolvem criação ou expansão de interconexão entre redes de corrente alternada (AC) separadas, interconexões de alta tensão em tensão contínua entre duas redes com oportunidade de aumentar o fluxo de potência da área de preços baixos para as áreas de preços altos, além do efeito de ser uma proteção contra instabilidades nas redes AC. As infra-estruturas de interconexões têm implicações na confiabilidade, especialmente quando elas são longas e podem se tornar gargalos e contingências, que dificultam a avaliação da rede estar ou não atingindo o critério de confiabilidade estabelecido.

Aumentar o transporte de energia elétrica com investimentos em transmissão depende das políticas de investimentos e expansão da transmissão e geração. A experiência internacional mostra que alguns operadores socializam os custos na tarifas do serviço de transmissão, com uma parcela de 25% do custo sendo rateados por todos os mercados conectados devido ao aumento da confiabilidade de todos.

¹³ Estudos adicionais sobre gerenciamento de congestionamento na maioria dos países com mercados competitivos pode ser visto em Kumar (2005), Oren (2000), Post (1995) e Wang (2008),

Segundo Joskow (2005), existem quatro padrões de investimentos em infra-estruturas de energia:

- a) Investimento público;
- b) Investimento privado regulado;
- c) Investimento em transmissão direcionado pelo mercado;
- d) Modelo híbrido de transmissão mercantil e regulada.

A regulação deve prover índices de confiabilidade e de preços para estimular comportamentos adequados aos agentes sem criar distorções entre geração, transporte e confiabilidade. As saídas devem ser planejadas e deve haver penalidades adequadas para as saídas com riscos elevados de efeitos importantes. O melhor desempenho do sistema precisa ser incentivado e pode ser otimizado em termos de confiabilidade segundo os estudos de Joskow e Tirole (2004)

O investimento público inclui investimento através de capital público. Elege-se um administrador da transmissão, com isto aumentam-se as responsabilidades governamentais e induz ineficiências de investimento e operacional.

A recuperação dos custos ou alocação deles no investimento de transmissão deve ser baseada em custos incrementais e a alocação destes custos deve ser baseada em uso ou em benefício, mesmo sendo bastante difícil de ser calculada considerando o compartilhamento dos benefícios resultantes da transmissão. A base do investimento baseado em mercado é o preço spot nodal ou o preço marginal locacional (LMP) da eletricidade. O preço marginal locacional (LMP) varia de acordo com as condições de operação do sistema.

Na maioria dos países com mercados competitivos, e não no Brasil, os limites no carregamento da linha de transmissão resultam na diferença do preço marginal não só da linha congestionada, mas devido ao contágio do efeito na rede de transmissão para outros nós também. Algumas características desejáveis para os investidores são: o tipo de capital necessário para o investimento, lucro líquido, valor por ação, tempo de retorno do capital, capital investido e fluxo de caixa, enquanto que para o consumidor as características desejáveis são: a modicidade tarifária, qualidade do serviço, confiabilidade, controle da tensão, interrupções. A diferença de preço marginal locacional entre dois nós é decorrente de um par gerador-carga entrarem em uma transação e o custo adicional incorrido por estas duas partes e a ser pago pelo operador do sistema de transmissão. Daí a diferença de preços marginais de longo prazo (LMP) ser chamada de custo de aluguel do congestionamento, supostamente providenciando um sinal econômico e incentivo para localização de onde o investimento em transmissão é necessário para aliviar o congestionamento. Estes investimentos em transmissão devem ser feitos para restabelecer a confiabilidade planejada segundo o critério do operador do Sistema, podem estar sendo violadas como consequência das alterações nos padrões de demanda, investimentos de geração e saídas de plantas de geração, pois a confiabilidade no planejamento e confiabilidade de operação não segue necessariamente os mesmos critérios.

Na maioria dos países com mercados competitivos, e não aplicável totalmente no Brasil, a organização da regulação, do mercado e das características do desempenho da rede de transmissão deve considerar atributos e indicadores tais como:

- a) Custos de operação e manutenção da rede;
- b) Custos das perdas e serviços de suporte auxiliares;
- c) Custos de poder de mercado e de outras distorções decorrentes da operação e atrasos de investimentos na rede;

d) Disponibilidade da rede e velocidade de restabelecimento do serviço depois de saídas;

e) Confiabilidade da rede e perdas de carga;

f) Eficiência da mobilização e disponibilidade do capital para expansão das redes dentro do sub-mercado para atingir confiabilidade e objetivos econômicos e sociais;

g) Eficiência na introdução de inovação em software e hardwares para melhorar o desempenho de rede.

O planejamento de serviços pode conter serviços auxiliares ou ancilares, gestão de ativos, gerenciamento de carga, conservação e manutenção da infra-estrutura.¹⁴

A evolução do arcabouço regulatório, as novas tecnologias do setor elétrico, as forças competitivas de mercado, os objetivos sociais são bastante importantes para o planejamento. Além das considerações de engenharia o planejamento deve considerar economia, alinhando o planejamento de engenharia com planos financeiros e de negócios e tais objetivos ficam mais evidentes em mercados competitivos atuais onde houve a re-estruturação do setor elétrico.

¹⁴ O assunto de serviços é detalhado em Kumar e Chaturvedi (2008) Turvey e Anderson (1977), Yishan (2005), Zeng (1997) e Zeng (2006)

2.12 Planejamento do sistema de energia elétrica

A função de planejamento do sistema é vital porque isto determina como o sistema e os equipamentos associados irão funcionar. Os agentes interessados em planejamento do sistema de suprimento são empresas de energia elétrica verticalmente integradas, operadores independentes do sistema, agências governamentais e Ministério de Minas e Energia, Ministério de Ciência e Tecnologia, bancos de desenvolvimento internacionais, usuários de grande porte e investidores.

O planejamento pode ser em longo e curto prazo, de geração, transmissão, buscando o menor custo, de acordo com produtos e serviços desejados. O planejamento de geração e transmissão visa ter opções diversas de suprimento e o planejamento de menor custo inclui opções para limitar ou adequar a carga pelo lado da demanda. Os engenheiros de planejamento energético têm o plano operacional de algumas horas (curtíssimo prazo ou tempo real), o plano de curto prazo (da ordem de até 5 anos) e o plano de longo prazo (de dezenas de anos: na geração da ordem de 30 anos e da ordem de 15 anos na transmissão).

2.13 Padrões e critérios de planejamento

Usualmente os sistemas são planejados e projetados para operar dentro das faixas necessárias, com uma contingência única (falha única e operação com N-1), e parâmetros operacionais dentro dos critérios de emergência após ocorrência de falhas únicas. Os padrões e critérios de planejamento podem incluir a probabilidade máxima de perda de carga aceitável, demanda não atendida esperada, margens de reserva mínimas requeridas, probabilidade de ocorrência de contingências únicas,

faixas de operação permitidas (tensão, frequência, fluxo de potência em regimes normais, de emergência e restauração).

Alguns projetos, tais como reforços e repontencializações, têm custos relativamente baixos e não requerem expansão geográfica da rede, sendo importantes onde as redes têm restrições por impactos ambientais e sociais. Esses projetos podem melhorar o desempenho das redes de transmissão e incluem componentes a serem adicionados à rede ou trocados, como por exemplo, chaves e relés, monitoramentos remotos, equipamentos de controle, substituição de transformadores, subestações, capacitores, recondução dos enlaces existentes, aumento do nível de tensão em determinados enlaces de transmissão, aumento de automação de supervisão e controle, avaliação das contingências e seu tratamento.¹⁵O planejamento da geração preocupa-se principalmente com margens de reservas de capacidade e confiabilidade de suprimento. Os planejadores de transmissão identificam um conjunto de opções de cenários e verificam como essas opções e combinações afetam o sistema, tais como análise de estabilidade, fluxo de carga, curto circuitos e sobrecargas.

O planejamento de menor custo pode ser tratado como planejamento integrado de recursos, considerando a oferta de geração, e fatores do lado da demanda tais como controle da carga, políticas de eficiência energética, mudanças de hábitos e de tecnologias.

Para esse planejamento são considerados custos fixos e variáveis do sistema de potência. Os custos fixos incluem depreciação, taxa de juros, lucros, enquanto os custos variáveis incluem custos de combustível, custos de operação da planta e

¹⁵ Os padrões e critérios de planejamento podem ser estudados mais detalhadamente em Hogan (2003), Gill (1998), Joskow (2006), Joskow.e Tirole (2000), McDonald e Schrattholzer (2001) , Newbery.(2004), Outhred (2006), Seevers (1995), Wilson R. (2002) Zhang e Billinton (1997), Zhang, Z et all. (2003)

impostos. Estes valores devem ser projetados para o instante atual usando técnica de valor presente líquido, para facilidade de comparação.

Pode-se fazer uma análise custo benefício, usada para classificar projetos mutuamente exclusivos. São também usados métodos de análise de decisão multi-objetivo e multi-critério, quando necessários. Esses métodos combinam valores econômicos com ambientais e de viabilidade técnica. Pode-se realizar uma análise de “trade-offs” onde se relacionam retornos e conseqüências indesejáveis (externalidades negativas) incorridas e busca-se minimizar as externalidades sem redução dos retornos.

Também se pode fazer uma análise de riscos e incertezas, principalmente as de origem financeiras. A robustez da decisão procura verificar se ela é passível de arrependimento posterior, enquanto a exposição é uma perda possível sob condições adversas de realização. Para aumentar a robustez da decisão e reduzir a exposição aos riscos, os planejadores desenvolvem mecanismos de proteção e de mitigação dos riscos.¹⁶

2.14 Previsões de demanda e incertezas

Em sociedades mais avançadas o crescimento do consumo de eletricidade é menor quando comparado com países em desenvolvimento em que o crescimento é maior

¹⁶ Estudos adicionais em portfólios e mitigação de riscos podem ser feitos em Awerbuch e Berger (2003), Baldick e Kahn(1993), **Blumsack (2006)**, Luenberger (1997), Markowitz(1952), Markowitz (1990), Newberry (2009), Nuttall Piwko (2004), Nuttall (2009), Shahidehpour (2002), Sheblé(2006), Shrestha e Fonseca (2007), Taylor (2006), Tolmaskim (2005) e Zhang (2003) “

que a taxa de crescimento do PIB. Para realizar estes estudos são usados modelos econométricos e extrapolações baseadas em séries históricas e regressões.

Também são considerados índices macroeconômicos de crescimento da população, PIB, fator de uso de eletricidade por setor, novas tecnologias e rendimento.

2.15 Aspectos diferenciados do Planejamento de transmissão no Brasil

No caso brasileiro, o planejamento da expansão tem aspectos que diferenciam as premissas em relação aos países com sistemas elétricos interligados:

- a) Predominância hidrelétrica dependente das vazões fluviais (sazonal e plurianual) com dificuldade de equilibrar custos de riscos de déficits e custos de excesso de capacidade instalada;
- b) Diversidade das cargas no espaço do território nacional e longas distâncias aos centros consumidores;
- c) Diversidade hidrológica das bacias fluviais e possível complementaridade de afluências e otimização da geração;
- d) Necessidade de maior coordenação do planejamento e das decisões de expansão da geração e da transmissão para a otimização da operação;
- e) Diferenças regionais e participação de agentes de natureza distintas, incluindo públicos e privados.

2.16 Características adicionais do sistema de transmissão

Os benefícios da transmissão são percebidos minimizando custos de produção, permitindo operação em despacho de geração em ordem de mérito, minimizando a energia não suprida, melhorando o suprimento e a qualidade da energia com robustez e resiliência contra saídas não programadas e programadas. Na empresa tradicional o investimento de transmissão é feito após simular a operação com e sem as novas linhas de transmissão usando modelos baseados em custo. Os investimentos devem ser efetuados caso os custos com a geração fora de mérito e perdas excederem os custos de capital para investimento na expansão e na operação.

De uma forma geral nos mercados competitivos de energia (e não no Brasil), as tarifas devem ser proporcionais a diferença dos preços marginais nodais ajustados diferencialmente para restringir fluxos de acordo com a capacidade de transmissão disponível. Os preços zonais são preferenciais, em relação aos nodais, e o preço zonal representa uma função média de um grupamento dos nós próximos. Os métodos baseados em custo de transmissão ao invés da capacidade de adicionar benefícios podem não sinalizar corretamente o valor do investimento. O nível ótimo de investimento é encontrado por cargas adicionadas através de redução de custos de operação futuros. O benefício do consumidor é maximizado pela minimização do custo total de produção incluindo custos de geração e transmissão, desse modo, pode-se fazer uma otimização global considerando-se custos de geração e de transmissão agregadamente.

As empresas verticalizadas tinham o retorno do capital investido e uma parcela de lucro garantido, o custo e as incertezas do mercado eram absorvidas pelo consumidor. Os mercados re-estruturados de energia são mais competitivos com objetivo de menores custos para os consumidores finais, mas com possibilidade de aumento da margem de lucro e os riscos assumidos pelo investidor.

O plano torna-se de mais curto prazo e dependentes de outros agentes de mercado, além dos governamentais. O planejamento governamental pode diminuir as incertezas de mercado e de aumentos de preços, desde que sem favoritismos, com competitividade no mercado.

A prestação de serviço público de transmissão (Rede Básica) se dá mediante concessão, sendo que a concessão de transmissão é dada para as instalações em si. A outorga da concessão de transmissão é feita por licitação com existência de competição na entrada, buscando a menor receita para prestação dos serviços de públicos de transmissão. As instalações licitadas são repassadas ao ONS, que coordena a operação do sistema elétrico interligado (SIN).

Os equipamentos de transmissão são regulamentados pela ANEEL, em contrapartida à receita auferida pelas concessionárias. Para as concessões de transmissão, as instalações da prestação do serviço devem estar disponíveis e as saídas de operação resultam em descontos na receita e penalidades crescentes de acordo com o tempo indisponível.

A Rede Básica tem as instalações de transformação de rebaixamento das tensões da transmissão – iguais ou superiores a 230 kV – para as tensões de distribuição. O serviço de transmissão passa a ser pago única e exclusivamente pelas concessionárias de distribuição beneficiadas, com parcela da TUST, denominada TUST Fronteira (TUST-FR). A outra parcela componente da TUST, a TUSTRB, refere-se às instalações de transmissão, integrantes da Rede Básica, ou seja, com tensão igual ou superior a 230 kV.

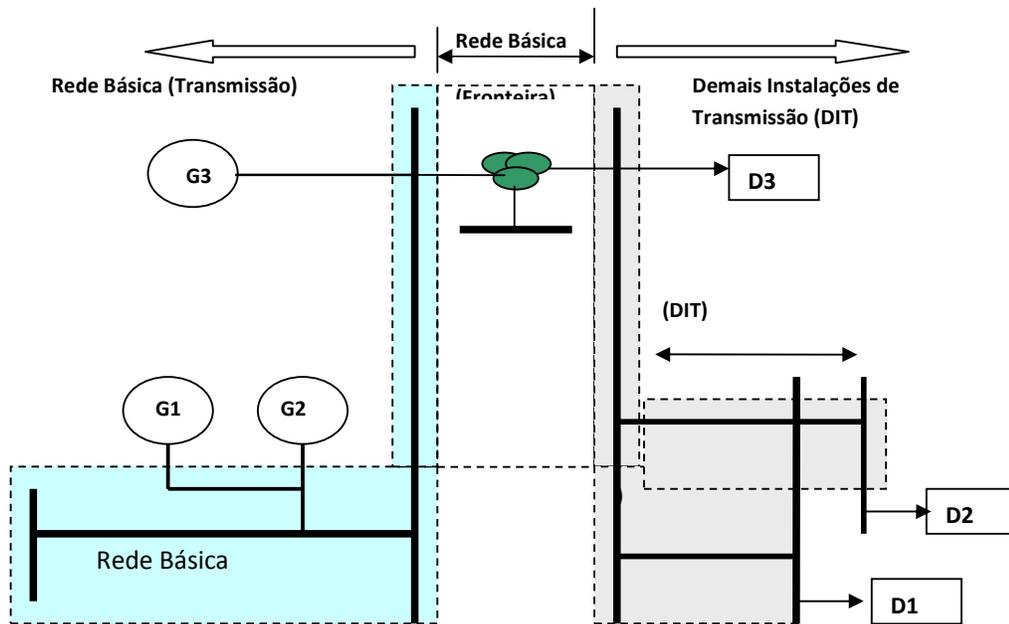


Fig. 2.2 Instalações de Transmissão (Fonte: ONS)

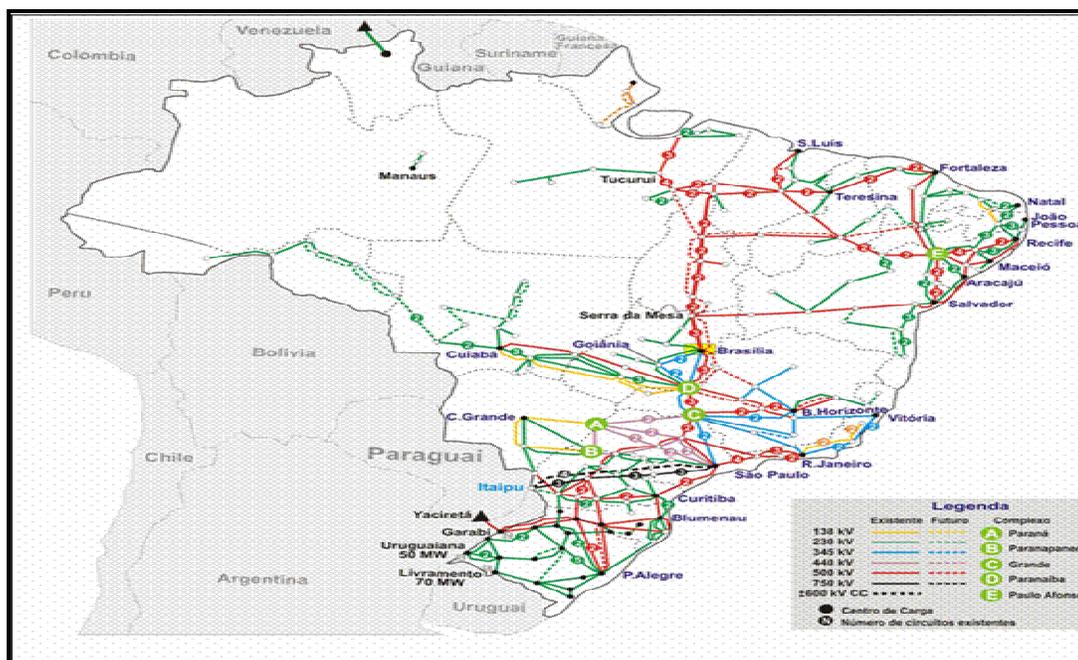


Fig. 2.3 Rede de Transmissão do Sistema Interligado Nacional em 2010 (fonte: ONS)

2.17 Cálculo da tarifa TUST pela Metodologia Nodal e a sua regulamentação

Os usuários dos sistemas de transmissão e distribuição pagam tarifas de uso deles, com uma parcela da tarifa representando o custo do transporte da energia gerada ou consumida e associada aos investimentos das concessionárias na construção dessas redes. Essa parcela é chamada *tarifa-fio* ou TUST-fio e é calculada na simulação do Programa Nodal (Metodologia Nodal).

O programa nodal trabalha com fluxo de carga linear, sendo a máxima potência consumida por ponto de suprimento no horário de ponta e a geração com o despacho proporcional aos montantes de potência contratados na rede básica por sub-mercado.

A tarifa obtida não recupera a totalidade dos encargos necessários, nem possibilita o rateio desejado entre carga e geração, devendo-se adicionar a parcela denominada “selo” (selo postal) de ajuste, mantendo a relação locacional das tarifas e recuperando a Receita Anual Permitida com o desejado rateio.

Alguns critérios foram estabelecidos pela ANEEL, no cálculo da TUST, calculada com o uso do programa nodal:

- Rateio dos Encargos de Uso com 50% para o consumo e 50% para geração;

- Fluxo de potência considerando o despacho das usinas geradoras proporcionalmente às suas potências instaladas;

- Custo unitário proporcional a capacidade do circuito no Contrato de Prestação de Serviços de Transmissão (CPST) entre a empresa transmissora e o ONS;

-Utilização de fator de ponderação, para atenuar a volatilidade espacial e temporal da TUST, ponderando o custo de cada fração de circuito pela relação fluxo passante e capacidade do circuito;

-A TUST no horário fora da ponta é nula (até final de 2010).

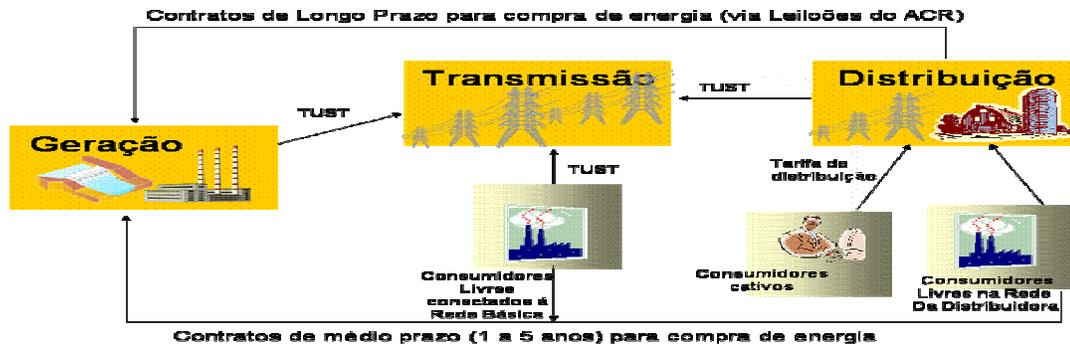


Fig. 2.4 Acesso, Contratos e Tarifas Associadas (Fonte: ONS)

O critério do horizonte anual de cálculo é pequeno em relação aos tempos de implementação de gerações e da contratação de longo prazo regulada pela Lei nº 10.848/2004; (30 anos para Hidráulicas e 15 para Térmicas). A parte principal da TUST, TUST-RB deve-se às instalações de transmissão da Rede Básica com tensões iguais ou superiores a 230 kV, gerando tarifas aplicáveis a todos os usuários. Essa receita é composta da RAP a ser paga às concessionárias de transmissão, de parte do orçamento do ONS, de uma Parcela de Ajuste, das diferenças de arrecadação do período anterior e previsão de receita para pagar instalações de transmissão entrando em operação.

2.18 Dificuldades com a Metodologia Nodal

A variabilidade da TUST (risco) acabou sendo transferida para os consumidores cativos (Distribuidoras) e consumidores livres conectados à rede básica. O cálculo da tarifa de transmissão usando a metodologia Nodal apresentou resultados conflitantes com a alocação de custos, em relação à emissão dos sinais econômicos corretos para os agentes de geração e consumo de energia elétrica. Os elementos com altos carregamentos deveriam ter sinal mais forte sinalizando necessidade de expansão da rede.

O despacho proporcional realizado pelo Programa Nodal não reflete a realidade da operação do sistema:

a) As tarifas de transporte de carga nas regiões Sudeste e Sul sinalizado incentivos a investimentos em novas centrais geradoras regiões (sinalizando de forma coerente);

b) No Nordeste e no Norte, o sinal econômico das tarifas, incentiva o aumento do transporte (TUST-RB menores que a parcela da geração em final de 2010).

O sinal é correto para a região Norte (exportadora), mas errado para o Nordeste (predominância em importação, incluindo em 2006 em que recebeu energia 4,5% de sua carga por intercâmbio). A tarifa que em ano apontava distância elétrica elevada entre um determinado gerador e um centro de carga, altera com a construção de novas linhas de transmissão, tendo reflexo no valor da TUST. Esses investimentos vultosos sendo realizados provocam a volatilidade tarifária observada no segmento de transmissão brasileiro.

Ainda ocorrem alterações de grande porte no sistema de energia elétrico brasileiro, tais como a grande expansão da carga/geração e expansão da rede de transmissão, dimensões continentais, baixa densidade demográfica e de consumo. Apesar dos avanços regulatórios em transporte de energia elétrica e sua tarifação, é evidente a necessidade de aprimoramento da metodologia de cálculo da TUST, reduzindo a distorção do sinal locacional¹⁷.

2.19 Parcela Variável Por Indisponibilidade (PVI)

No atual modelo, as concessionárias de transmissão contribuem com o ONS através do *Contrato de Prestação de Serviço da Transmissão (CPTST)*, a ANEEL, passou a utilizar a chamada Parcela Variável (PV) para incentivar a qualidade do serviço de transmissão de energia elétrica. A Parcela Variável foi criada para permitir a redução da indisponibilidade de linhas de transmissão, transformadores e equipamentos de controle de tensão, componentes estes denominados Funções de Transmissão (FT). Esta Parcela Variável tem como objetivo incentivar a adoção de gestões na Expansão, Operação e Manutenção do sistema elétrico para maximizar a disponibilidade das FT, reduzindo impactos indesejáveis na operação, tais como desligamentos simples ou de grandes proporções, além disso, busca-se também a modicidade tarifária. Entretanto os valores de penalidades aplicados em 2010 são bastante altos podendo inviabilizar a empresa.

¹⁷ Este item pode ser melhor estudado em Jesus e Teixeira (2005) e Lima (2007)

2.20 Dificuldades com a Metodologia Nodal para Centrais Geradoras Existentes

Apesar da boa aceitação pelos agentes geradores alterando a sistemática de cálculo da TUST para os empreendimentos de geração participantes de leilões de energia nova, existem algumas ressalvas (SRT-ANEEL, 2007):

A metodologia Nodal tem apresentado alguns resultados que conflitam com as premissas básicas de uma metodologia de alocação de custos, associadas à emissão dos sinais econômicos corretos para os agentes de geração e consumo de energia elétrica, mesmo com as alterações implementadas. O objetivo foi aumentar o sinal locacional dado pelo programa Nodal na TUSTRB, mas não foi alcançado, pois depende do despacho considerado para os geradores do caso base e houve uma melhoria do sinal locacional nos ramos onde os carregamentos estão baixos e uma degradação para os ramos onde os carregamentos estão elevados. Esta sinalização está contrária ao que deveria ocorrer, pois é nos elementos com carregamentos altos onde deveria estar o sinal mais forte visto que são estes carregamentos que sinalizam para uma expansão da rede.

2.21 Dificuldades da TUST para Novas Centrais Geradoras

A utilização de metodologias baseadas em análises lineares incrementais, como a metodologia nodal, facilita o entendimento e possibilita a análise qualitativa do problema. No entanto, metodologias lineares aplicadas a sistemas dinâmicos não-lineares podem apresentar inadequações que exigem cuidado na utilização.

Um inconveniente é o efeito oscilatório causado pelas alterações de grande monta de importador para exportador que acontecem entre análises subseqüentes, a TUST calculada para um determinado agente a partir da rede, das cargas e das gerações num ano pode ser diferente da calculada no ano seguinte.

A configuração, que num ano apontava distância elétrica elevada entre um gerador e um centro de carga, pode ser muito alterada pela construção de novas linhas de transmissão, tendo reflexo no valor da TUST. Essa situação associada aos investimentos de elevada monta e significância, levam à condição de volatilidade tarifária atualmente observada no segmento de transmissão brasileiro.

Diferentemente de sistemas de transmissão maduros, como os encontrados nos países altamente industrializados, ainda ocorrem alterações de grande monta no sistema brasileiro: grande expansão da carga/geração e a conseqüente expansão da rede de transmissão, agravadas pelas dimensões continentais e distância da geração para os centros de consumo. Para melhorar a utilização dos recursos energéticos, são necessários investimentos relativamente maiores no sistema de transmissão para integrar os centros de geração aos de carga. Assim, atualmente é observado que a participação relativa do sistema de transmissão no custo total do sistema elétrico nacional aumenta, conforme indicado pelo progressivo aumento da RAPs e, em conseqüência, das tarifas de transmissão¹⁸

¹⁸ O tema também pode ser estudado em Angst e Kirchner (2005).

2.22 Falhas e confiabilidade

Os modelos usuais tratam de falhas independentes, falhas dependentes, saídas forçadas e efeitos relacionados ao clima. A falha é identificada como estado de emergência ou estado em falha, sendo que as ações corretivas irão retornar o sistema para o estado normal (restabelecimento da normalidade) com o reparo ou a substituição dos componentes em falha.

O tempo decorrido até o sistema ou componente falhar é uma variável aleatória, com uma distribuição de probabilidade característica e dependente de cada componente. Se X_t é uma variável aleatória representando o tempo até a falha do sistema, equipamento ou componente, a função confiabilidade $R(t)$ no instante t é descrita segundo as características de falha desse componente, equipamento ou sistema e pode haver uma expressão analítica $f(t)$, descrevendo a densidade de probabilidade de X_t .

A confiabilidade deste sistema é uma função $R(t)$, com valor variando entre 0 e 1 e é a probabilidade de que o item sobreviva a um dado intervalo de tempo, ciclos, distancia percorrida. A probabilidade de sobrevivência é denominada de confiabilidade; a confiabilidade $R(t)$, a densidade de probabilidade de falha $f(t)$ e a probabilidade acumulada de falha $F(t)$ podem ser expressas pela taxa de falha do item.

No caso de item irreparável, a confiabilidade é a duração esperada do desempenho sem falhas nas condições do projeto dos componentes e redundâncias previstas do sistema. No caso de itens reparáveis, tais como sistemas de energia elétrica, a confiabilidade é a probabilidade de desempenho sem falhas durante um intervalo de tempo, nas condições do projeto.

A função confiabilidade $R(t)$ fornece parâmetros para medir o sucesso do sistema durante seu funcionamento:

a) Em itens irreparáveis, que falham uma única vez, a medida do sucesso é chamada tempo médio para falhar ou MTTF (*mean time to failure*);

b) Em itens reparáveis com resultado considerado bom quanto novo, a medida mais usada é o tempo médio entre falhas MTBF (Mean Time Between Failure);

c) A manutenibilidade $M(t)$ é o tempo até o final do reparo considerando o tempo médio de reparo MTTR (*mean time to repair*);

d) A disponibilidade do sistema associa os parâmetros anteriores considerando simultaneamente a dificuldade do reparo (MTTR) e a robustez em relação às falhas (MTBF).

A distribuição de Weibull explica o comportamento de um sistema com falhas ocorrendo entre diversos modos e competindo pela primeira ocorrência de falha, como em sistemas de energia elétrica; geração, transmissão e distribuição de eletricidade.

Outros modelos buscam explicar comportamentos sistêmicos:

a) O modelo gamma é usado quando a falha do último item provoca a ocorrência da falha do sistema;

b) Os modelos normal e lognormal são usados quando a falha é resultante de soma ou de multiplicação de ações de diversos mecanismos de falha.

A distribuição de Weibull foi desenvolvida pelo físico sueco Waloddi Weibull, em 1937 e publicada no Journal of Applied Mechanics da American Society of Mechanical Engineering, em 1951. A distribuição de Weibull com três parâmetros é dada pela confiabilidade e tempo médio entre falhas (MTBF). As funções de densidade de probabilidade de falhas $f(t)$ e de taxas de risco $h(t)$, também podem ser obtidas pela teoria da confiabilidade.

Os parâmetros da distribuição de Weibull são:

- a) t_0 = tempo sem falhar (localização);
- b) θ = tempo após t_0 em que ocorrem 63,2% das falhas (escala);
- c) γ = comportamento combinado dos modos de falha (fator de forma).

A taxa de falha é definida pela probabilidade condicional da ocorrência de falha no intervalo de t a $t+dt$, dado que não houve falha até o instante t , dividido pelo intervalo dt .

As taxas de falhas de um sistema podem ser representadas em três fases: inicial (mortalidade infantil), intermediária e final (obsolescência), sendo que as três fases compõem a chamada “curva da banheira”. As taxas de falhas permitem medir o nível de saídas não planejadas de determinado equipamento no sistema de transmissão no decorrer do tempo. As falhas seguem padrões de comportamento classificados segundo o fator de forma da função de distribuição da taxa de falhas:

- a) $\gamma < 1$: mortalidade infantil ou taxa de falhas decrescente;
- b) $\gamma = 1$: falhas aleatórias ou taxa de falhas constante, ou ainda maturidade;

c) $\gamma > 1$: falhas por fadiga, envelhecimento, mortalidade senil; taxa de falhas crescentes.

Com a taxa de falha é possível classificar os diferentes mecanismos de falha encontrados nos sistemas e em qual processo deve ter ocorrido a não conformidade. Por exemplo: falhas por *Mortalidade Infantil* são decorrentes de erros em processos tais como especificação e projeto; fabricação, montagem, Comissionamento e ativação. A ocorrência destes eventos resulta em uma distribuição de densidade de probabilidade de falha acentuada no início da vida útil.

Na parte da curva de taxa de falhas conhecida por *Mortalidade Infantil* ocorre perda brusca da capacidade funcional no início da vida do item. Essas falhas decorrem de erros em várias etapas e processos produtivos tais como especificação e projeto; suprimento, estoque e transporte; fabricação, inspeção e controle de qualidade; integração e Comissionamento.

Na Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) são identificadas e documentadas todas as funções e seus modos de falha, assim como os efeitos adversos produzidos por estas. A FMEA envolve a identificação de aspectos funcionais com o nível desejado de desempenho, desvio funcional, a causa da falha, os efeitos e impactos resultantes da perda da função principal e a severidade do impacto da falha. Pode-se também identificar os sintomas das falhas, e elaborar um roteiro de localização e manutenção, os mecanismos e as taxas de falha.

A FMEA é utilizada em projetos de instalações de alta segurança, identificando-se e minimizando-se os modos de falha críticos no início do desenvolvimento do sistema.

A busca da causa raiz de cada modo de falha é primordial para a eliminação de falhas nesta etapa.¹⁹

2.23 Efeitos de Modos de Falha e sua Criticidade (FMECA)

Quando o número de falhas potenciais é muito elevado, a FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) pode ser aplicada a itens selecionados, identificando os modos de falha críticos para justificarem ações adicionais.

A perspectiva bayesiana considera a ocorrência de um evento de falha dado que houve outro anterior, com formulação de modelo estocástico da relação temporal dos eventos. A probabilidade de falha múltipla pode ser considerada na relação entre o instante de falha de um componente de proteção e a falha do processo e pode ser avaliada com a probabilidade bayesiana. Estudos adicionais em falhas podem ser feitos em Simões Filho (2006).

2.24 Mecanismos de Falhas

O estudo dos mecanismos de falhas sistematiza os comportamentos não conformes de equipamentos e as atividades preventivas e corretivas adequadas, com a taxa de

¹⁹ Estudos mais aprofundados sobre qualidade, confiabilidade e suas ferramentas pode ser feito em Datla. (2007), Moubray (1997), Oakland (1994), O'Connor (2002) e Ramakumar (1993).

falha estocástica decorrente dos fenômenos envolvidos, tais como clima, qualidade, funcionalidade e desempenho.

Os principais modos de falhas estruturais são classificados segundo a norma IEC 60300-3-11 como sendo acidental, ambiental e fadiga com fraturas devidas ao carregamento cíclico. Os principais modos de falha relacionados ao comportamento humano são distração, esquecimento e engano.

O estudo de falhas é feito com uso da variação temporal da probabilidade de falha funcional do item, na unidade de tempo.

2.25 Confiabilidade e Taxa de falha

A probabilidade do item sobreviver a um dado intervalo de tempo, ciclos ou distancia percorrida é denominada confiabilidade, ou probabilidade de sobrevivência.

A taxa de falha possibilita classificar os mecanismos de falha encontrados nos sistemas:

- a. Uns itens mostram idade bem definida de desgaste, ocorrendo aumento rápido na probabilidade condicional de falha, por unidade de tempo a partir dessa idade;
- b. Outros mostram crescimento constante da probabilidade condicional de falha, por unidade de tempo; e
- c. Outros não apresentam nenhuma degradação funcional ao longo da vida útil.

Os principais mecanismos dos modos de falha são mortalidade infantil, desgaste progressivo, falha intempestiva e desgaste por fadiga que são mecanismos encontrados em diversos componentes, materiais e sistemas de diversas tecnologias.

As variações nos ciclos produtivos geram curva de *densidade de probabilidade de falha* em forma de sino invertido. O ponto inicial onde esta curva começa a crescer identifica a *vida útil* do item e o valor médio da curva de densidade caracteriza a *vida média*. A função de distribuição de probabilidade usada para representar este comportamento é a lognormal, devido sua forma de sino inclinado. Outras distribuições, como a muito usada a distribuição de Weibull, também pode modelar diversos mecanismos de falha.

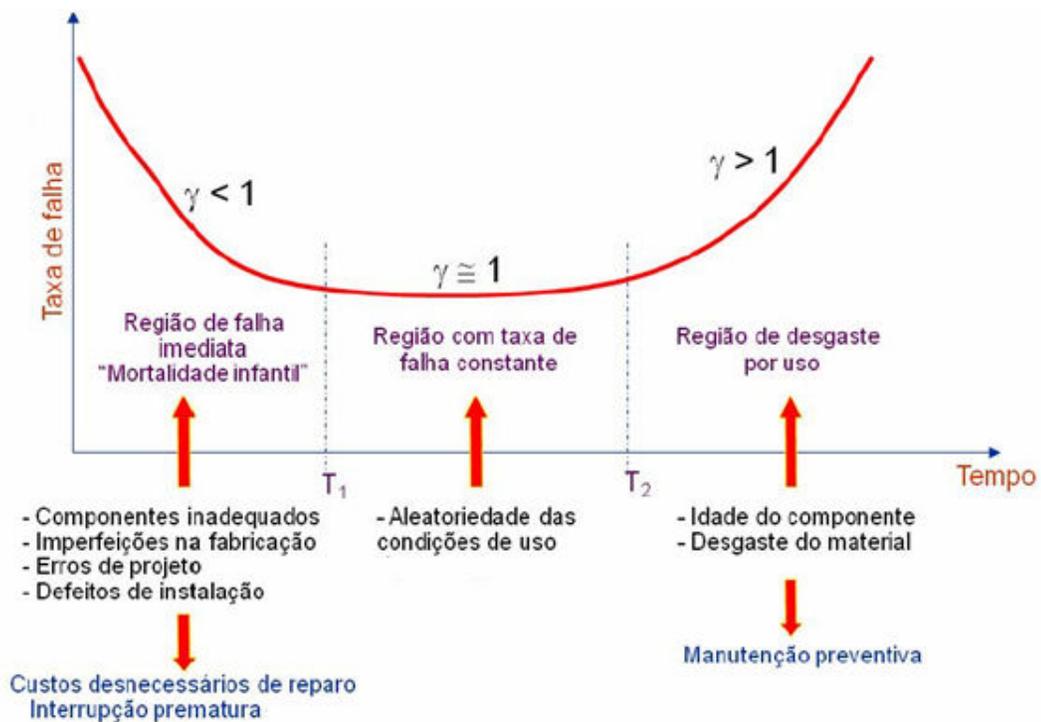


Fig. 2.5 Taxa de falhas como função do tempo de uso do equipamento e parâmetro de forma da distribuição de Weibull .

As formas usuais de evitar a mortalidade infantil e garantir desempenho adequado durante a vida útil são feitas pela análise da confiabilidade (estatísticas que descrevem a evolução temporal da qualidade, ou seja, a confiabilidade da população de componentes), manutenibilidade, produtividade e planejamento otimizado da manutenção.

As topologias mais usuais em estudos de confiabilidade são conexões série e conexão paralela, por simplicidade de modelagem e simulação. As topologias tipos barramento, anel, estrela e híbridas, podem ser úteis com uso de algoritmos adaptados das associações série e paralelo no cálculo da confiabilidade do sistema.

Com as confiabilidades dos componentes, dos equipamentos pode-se calcular a confiabilidade de sistemas, incluindo os de energia elétrica, que dependem desde aspectos de regulação técnico-econômica até do modo dos arranjos das topologias de Geração, Transmissão e Distribuição

2.26 Parâmetros e Estimação de confiabilidade

Os parâmetros de confiabilidade e as taxas de falha são obtidos indiretamente, necessitando de estimação e outros parâmetros mais facilmente observáveis e disponíveis nos dados históricos de manutenção. Em atividades operacionais, os parâmetros são taxas de consumo; nas inspeções preditivas, são taxas de falho potenciais; em inspeções funcionais, são as taxas de falha e eventos que provocam falhas múltiplas; em substituições preventivas, é definidos a vida segura ou econômica. As variáveis de ocorrências e durações de eventos em um determinado intervalo de observação, tais como o tempo médio de manutenção preventiva ($MTTM = T_p$); tempo médio de manutenção corretiva ($MTTC = T_c$); tempo médio de reparo ($MTTR = T_r$); frequência de manutenção preventiva ($F_p = 1/T_p$); frequência de

manutenção corretiva ($F_c = 1/T_c$) e frequência de indisponibilidade forçada da função são usados para deduzir a confiabilidade.

O impacto do clima na taxa de falha pode ter implicações e conseqüências adversas, como por exemplo, clima tropical extremo expõe o equipamento a altas temperaturas e umidade, tempestades tropicais, furacões, ciclones e altos potenciais de intempéries. Em tais circunstâncias, as falhas de equipamentos são mais elevadas que sob circunstâncias amenas e moderadas. Na sobrecarga, a condição de carregamento (corrente elétrica) pode aumentar a probabilidade da falha. Além disso, o maior carregamento dessas linhas impõe impedância mais elevada associadas ao sobreaquecimento, com aumento da probabilidade de ocorrência da falha.

Os climas tropicais de fatores extremos podem se associar à incidência mais elevada de relâmpagos. As empresas de transmissão atuantes em regiões com climas de alta incidência de relâmpagos podem ser obrigadas a trocar equipamentos com menor idade que empresas operando em climas amenos. Eventos anormais de sobre-tensões induzem falhas mais prejudiciais que envelhecimento em longo prazo.

As taxas de falha em linhas aéreas de transmissão, por intempéries, dependem do projeto da linha e do uso de cabos pára-raios para proteção de raios. A maioria das redes é projetada com fio-terra aéreo, devido à incidência elevada destes raios.

2.27 Falhas e sua prevenção em redes de infra-estrutura críticas

As falhas principais são as esperadas, em cascata, modo comum e escalonamento. As falhas esperadas têm taxas estimadas por ensaios e testes e são usadas na previsão de ocorrências e dos seus custos futuros, planejamento da manutenção e do capital para novos investimentos, compondo a gestão de ativos. Nessas

estimativas considera-se a utilização, o treinamento e disponibilidade de pessoal, suprimentos na hora exata e infra-estruturas de geração diversificadas.

As falhas em infra-estruturas críticas interdependentes podem ser descritas em termos de três categorias gerais:

a) Falha em cascata – Um evento de interrupção de uma infra-estrutura causa interrupção em uma segunda infra-estrutura interdependente;

b) Falha em escalonamento – Uma interrupção em uma infra-estrutura exacerba a falha da outra, independente das características da segunda infra-estrutura, ou seja, o tempo de recuperação e restabelecimento da infra-estrutura dependente aumenta porque a infra-estrutura principal não está disponível;

c) Falha com causa comum - Uma interrupção de duas ou mais infra-estruturas ao mesmo tempo resultante de uma causa comum (por exemplo, um desastre natural afetando duas infra-estruturas ao mesmo tempo),

As formas de prevenção das falhas vão do planejamento, projeto, manutenção em diversas formas de mitigação de riscos de falhas. As medidas para diminuir a vulnerabilidade das infra-estruturas críticas podem ser variáveis quanto ao tipo e dependentes do sistema.

Existem diversas medidas de gerenciamento de riscos operacionais em sistemas produtivos:

a) Impedimento do risco em um tipo específico de atividade;

b) Redução do risco, p.ex. usando medidas preventivas;

c) Retenção do risco, por exemplo, uma escolha intencional ou não intencional de não fazer nada a respeito de certo risco específico;

d) Transferência de risco para outro tipo de indivíduo ou de organização, por exemplo, seguradoras;

e) Compartilhamento de riscos, ou seja, a combinação de retenção de risco e de transferência de riscos.

2.28 Economia e variação anual da confiabilidade em sistemas elétricos

Os grandes consumidores e clientes valorizam a confiabilidade mais que os menores, dependendo também do tipo de atividade. O custo da confiabilidade é relacionado com a atividade e o pico de carga em kW de cada cliente. A confiabilidade do sistema varia de ano em ano, em um ano muito bom tem-se um índice de indisponibilidade de 45 minutos, no ano seguinte pode haver um índice de indisponibilidade de 10 horas. A variância da confiabilidade tende a ser menor para áreas com um maior número de clientes; por outro lado, os clientes individuais tendem a serem mais voláteis, seguidos de confiabilidade dos alimentadores, confiabilidade da subestação, confiabilidade regional, confiabilidade nacional, desde que os sistemas tenham sido bem planejados e executados.

A importância da variância anual da confiabilidade torna-se maior com o maior uso de contratação com garantia de fornecimento. Esses contratos colocam as empresas frente a uma maior exposição a riscos, que precisam ser conhecidos, avaliados e gerenciados. Os contratos baseados em desempenho penalizam e recompensam fornecedores baseados na confiabilidade e as variações anuais devem ser entendidas para melhores negociações e gerenciamento desses contratos.

À medida que a indústria de eletricidade torna-se mais competitiva, os itens de confiabilidade nos contratos passam a ser mais importantes. A possibilidade de escolha dos supridores - fornecedores possibilitada pela re-estruturação do setor fazem com que esses consumidores pensem em relações de compromisso de preços de eletricidade e confiabilidade oferecida. Assim, alguns clientes irão pagar mais pelo fornecimento de alta confiabilidade, o que se pode tornar um atrativo adicional de retorno para o negócio.

2.29 Confiabilidade local do ponto de suprimento

São considerados eventos de maior probabilidade de ocorrência ao invés de eventos com menor probabilidade e tempos de retorno muito grandes. A confiabilidade do suprimento é expressa em carga interrompida ou frequência de ocorrência dessas interrupções e sua duração.

Além de testes probabilísticos são feitos testes determinísticos, com violação de padrões de tensão e funcionamento com um elemento a menos no sistema, ou ainda mais extremos, chamados teste de contingência N-k.

Os métodos de avaliação da confiabilidade de sistemas com complexidade decrescente são análise de custo benefício, análise probabilística e análise determinística:

A análise baseada em valor de custo benefício considera o valor do nível adequado de confiabilidade de serviço e no custo marginal da confiabilidade incremental nesse ponto.

A análise determinística considera as respostas do sistema às contingências específicas de falhas únicas e simultâneas (múltiplas).

Análise Probabilística considera o impacto ao cliente (interrupção de suprimento ou de interrupção de carga) e pode ser considerada como índices probabilísticos da confiabilidade.

2.30 Sistema de transmissão de grande porte

Os planos de expansão do sistema de transmissão são avaliados com relação ao critério de confiabilidade que limita o risco de queda do sistema e falhas de grande escala.

Os critérios de teste permitem impedir a instabilidade e desligamentos em cascata (condições de pico de carga, linhas e geradores em manutenção, tipo de falha, limites permitidos ao sistema), o que também podem fornecer informações de onde o sistema de transmissão deve ter reforços.

Para entender e determinar a vulnerabilidade do sistema a falhas simultâneas ou múltiplas; eventos desse tipo são simulados, testados e minimizados os riscos dessas ocorrências.

Os sistemas de proteção também devem considerar os critérios de risco e devem ser planejados e testados exaustivamente para tais ocorrências, para reduzir o risco de falhas do sistema de proteção. Além disso, estes sistemas de proteção precisam ter confiabilidade muito maior que o sistema que está sendo protegido.

2.31 Índices de confiabilidade no setor elétrico brasileiro

A frequência de eventos com impactos inaceitáveis no sistema ou no cliente, a duração desses eventos e sua severidade, podem ser indicadores da confiabilidade. Também é importante a diferenciação em tempo e severidade, ou seja, é necessário caracterizar completamente o evento indesejável em todos os atributos principais. Para sistemas de transmissão é necessário obter as medidas de duração e da frequência do evento indesejável para caracterizar a confiabilidade. Os índices de confiabilidade permitem medir a confiabilidade marginal obtida por reforços e existem dois tipos principais de índices, do consumidor e do sistema.

2.32 Nível de confiabilidade e índices

Após o projeto da estrutura são feitas simulações de eventos de cargas progressivas até atingir a capacidade limite de cada item. A probabilidade de ocorrência desses eventos específicos passa a ser mais bem conhecida e possível de ser predita para lugares específicos onde essas estruturas estarão implantadas, bem como das condições de carga elétrica analisadas.

A probabilidade da disponibilidade da linha é dependente da fundação, das estruturas, dos condutores, isoladores, componentes tracionados, carregamento elétrico, probabilidades de ocorrência de eventos de sobrecargas mecânicas. A vida útil característica pode ser observada na Tabela 2.1.

Da estatística básica, a soma da probabilidade de falha com a probabilidade de sobrevivência sem falhas é numericamente igual a um, ou seja, a probabilidade anual de sobrevivência = $1 - a$ probabilidade anual de falha. Em um número grande de anos, tem-se a probabilidade de

sobrevivência sobre um período de tempo grande. Aplicando o conceito para os componentes da estrutura da rede e considerando uma vida de serviço de 50 anos, obtém-se a probabilidade de sobrevivência de cada componente da rede, como por exemplo, as mostradas na Tabela 2.2.

Tabela 2.1 Vida útil em linhas de transmissão [Fonte: Willis (2001)]

Fio de terra	35 anos
Cabo de energia	50 anos
Projeto de fundação	25 anos
Pernas em determinada localidade	120 anos

Tabela 2.2 Probabilidade de sobrevivência de elementos de torres [Fonte: Willis (2001)]

Ps das pernas	65%
Ps do fio esticador n dos condutores	63%
Ps do fio esticador no braço de OPGW	23%
Ps da fundação	13%

2.33 Interdependências em redes de infra-estrutura críticas

A interdependência é um conceito associado à confiabilidade de sistemas em redes, medindo a influência de um sistema (por exemplo, suprimento de energia elétrica) em outro sistema (p.ex. telecomunicações, redes logísticas, saneamento, abastecimento de água) e a influência entre dois sistemas de diferentes tipos de interdependência incluindo geográfica, física, cibernética e lógica.

A probabilidade de falha de um sistema paralelo é o produto das probabilidades provocando um aumento na confiabilidade. Isto explica porque no caso do setor elétrico, a inter-conectividade e redundâncias pode reduzir o impacto de falhas e saídas de grandes clientes. Em um sistema com um número maior de circuitos em paralelo, um único nó tem probabilidade mais baixa da perda de suprimento. Em sistemas série a probabilidade de falhas do sistema é a soma das probabilidades de falha em cada segmento do sistema. Então em sistemas de transmissão de energia, um circuito pode ter taxa de falha dependente dos seus elementos ao longo da rede (condutores, torres e isoladores). Quanto mais longo o condutor, mais elementos em série no circuito e mais elevada a probabilidade de falha potencial, ou seja, menor a confiabilidade. Para sistemas com linhas maiores, a parte de menor confiabilidade é referente às linhas, e é maior que as devido às subestações, ou seja, a probabilidade de ocorrência de falha é maior nas linhas que nas subestações, o que torna o tratamento da confiabilidade mais difícil por serem parâmetros distribuídos.

Além disso, pode-se medir confiabilidade com diversos modos dificultando a comparação de estatísticas obtidas por autores diferentes. Outro fator de dificuldade é que as redes têm padrões de redundância diferentes em níveis de tensão diferentes, ou seja, as redundâncias devem ser maiores em altas tensões onde uma perda pode impactar um número maior de pessoas. A confiabilidade é usada para medir o desempenho da rede ao longo do tempo e existem incentivos ou penalidades associados a esse desempenho; implicando em otimização conjunta de

robustez, resiliência com mínimos custos, que é o que chamamos de confiabilidade integrada.

Nestes estudos²⁰, a classificação das opções energéticas em termos de vulnerabilidade considera concentração e centralização de combustível, manutenção local, custos, tempo de construção e de reparo de unidades geradoras e dos sistemas de transmissão. A co-geração, as pequenas hidroelétricas e geotérmicas foram bem avaliadas, enquanto as formas de geração menos bem avaliadas foram células combustíveis e marés. Nesses estudos ficou enfatizada a evidência de que os sistemas de energia renováveis, (p.ex. eólica e solar), ainda necessitam associar com sistemas de larga escala para garantia de suprimento confiável de grandes cidades e indústrias. Também foi observado que as empresas de eletricidade recuperam-se rapidamente das falhas sistêmicas de larga escala e que clientes com necessidades especiais (por exemplo, hospitais e aeroportos) tipicamente tem geradores redundantes e diversidade de alimentação de entrada. Os custos de gerenciamento de riscos, como os de redundância contra falhas, requerem sistemas de tecnologias complementares que podem reduzir o efeito desses eventos de falhas com relativamente pouco custo adicional.²¹

2.34 Os mecanismos de falhas em emendas de cabos de linhas de transmissão

A resistência elétrica da junção irá degradar, aumentando vagarosamente junto com o restante do mecanismo de degradação da junção. Em alguns casos, a resistência elétrica inicial de uma emenda aérea aumenta acima dos limites padrões, devido a

²⁰ Farrel (2004)

²¹ Estudos adicionais de custos de falhas, estruturas resilientes podem ser realizados em Beshir (1996), Crisp (2003), IEA (2004), IEEE Gold Book (2007), NERC (2009), Nolasco (2007), Pansini (2004), Save (1995), Yishan (2005) e Willis (2001).

métodos de instalação falhos (Fonseca, 2005)...

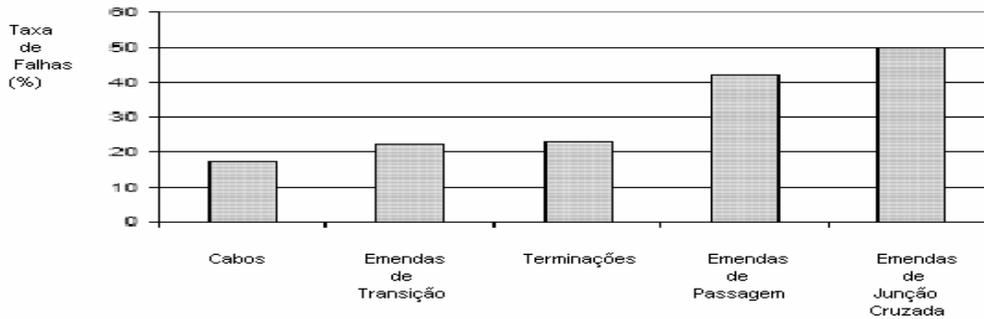


Fig. 2.6 Taxa de falhas em emendas e demais componente dos sistemas de L.T [fonte Berlijn e Roeflofs (1997)]²²

Segundo estudos de Berlijn e Roeflofs (1997), as taxas de falhas em emendas e demais integrantes do sistema de transmissão estão mostrados na Fig. 2.6.

As falhas em junções e conexões em linhas de alta tensão são resultado de diversos mecanismos dependendo dos parâmetros operacionais e ambientais. Um mecanismo predominante é a relaxação gradual da força de contacto, a qual leva a uma resistência elétrica de contacto maior, resultando em um aumento da temperatura da junção. Esta relaxação pode ser resultado de diversos problemas incluindo “thermo-racheting”, abrasão (“fretting”) e corrosão galvânica.

Nestas condições, a resistência elétrica da emenda irá ter um alto valor por um longo tempo, antes que os mecanismos naturais de envelhecimento acelerem o aumento da resistência e da temperatura da emenda até o rompimento. Além disso, com a situação de alta resistência pode ocorrer corona na emenda, com conseqüências indesejáveis para o sistema como aumento de perdas e de interferências.

²² Obs. Foram feitos 166 tipos de testes, são mostradas as porcentagens individuais de cada componente em que ocorreu a falha, ou seja, taxa de falha porcentual de cada um

As vibrações devido à presença de forças eólicas também são causas de envelhecimento acelerado no sistema de transmissão. O dano mais comum causado por efeito de vibrações eólicas em linhas de transmissão aéreas é o rompimento de fios individuais do condutor e da alma de aço, por fadiga. Essa fadiga ocorre em pontos onde o movimento dos fios condutores e da alma de aço são restringidos. Quanto maior for a restrição do movimento maior será a fadiga, principalmente no sentido vertical. Desta maneira, a ruptura de fios será mais freqüente na proximidade dos grampos de suspensão e pode-se presumir que, em emendas, o efeito da pouca mobilidade dos fios dentro da região da emenda também faz com que estes fios acabem por romper (Fonseca, 2005). As velocidades de vento e suas pressões nos cabos devem ser determinadas de acordo com normas específicas e referências internacionais.

Por outro lado, em estudos de Ampacidade, o vento além de produzir a vibração eólica, também resfria a parte externa do condutor dificultando a análise térmica visual ou instrumental do ponto de fadiga. Quando o carregamento aumenta de forma súbita, devido a uma necessidade de suprimento extra de energia ou de alteração da configuração do sistema, pode ocorrer uma ruptura total do cabo no ponto defeituoso.

Na região da emenda o aquecimento é maior e a dissipação é mais difícil e segundo os estudos de Berlijn (1997), a maior taxa de falhas nas emendas ocorre após diversos ciclos de variação de tensões elétricas e ciclos térmicos que podem causar o envelhecimento acelerado, degenerativo e falha na L.T.

É possível estimar o custo da energia perdida em um conector quase em falha em um ambiente industrial médio. Como a resistência do conector aumenta com o tempo, a dissipação de potência aumenta. O custo cumulativo da potência perdida ultrapassa o preço do conector dentro de um ano²³ (US\$0,30 em Linha de 200 A).

²³Ver Timsit (2003)

Além da perda de potência, outro efeito é o da confiabilidade e o custo da não confiabilidade. A perda de energia devido a degradação do conector nem sempre é aparente em inspeção visual mesmo usando técnicas de infravermelho. Um conector em falha pode rapidamente causar desligamento da L.T.

O custo real de um conector de compressão usado em um ambiente para o qual ele não foi projetado excede US\$50,00 depois de 10 anos de operação. Esse custo médio é aplicado se o conector falha ou não e representa aproximadamente 170 vezes o preço original do conector. Esse custo considera não apenas perdas de energia, mas também inspeção e reparo.

2.35 Eventos de falhas e rompimentos de cabos de linhas de transmissão

Nos EUA tem sido relatadas causas de rompimento de cabos principalmente com quedas de árvores, devido à faixa de servidão mal cuidada, e esses eventos têm sido responsáveis inclusive por “blackouts” de larga escala. Também tem sido relatadas intempéries com raios provocando o rompimento de cabos.

No Brasil esses dados são pouco divulgados para não ferir a imagem das empresas estatais ou com pouco tempo de privatização, Segundo estudos de Almeida e Prada (2005) os blackouts de 11/03/1999 (interrupção da interligação de Itaipu a São Paulo com até 4,5 horas de restabelecimento RJ e ES.) e de 21/01/2002 (falha de 113 minutos e custo de 1,54 US/kWh, prejuízo de US\$108.000.000,00 relativos a 1990 e aspectos tangíveis) foram devido a rompimento de cabos devido a curto circuito monofásicos. Esses dois eventos foram classificados com a máxima severidade com prejuízos elevados de acordo com Prada e Almeida (2007).

Além dos raios, outros tipos de eventos causadores de rompimentos nas linhas de transmissão tem sido:

- Fortes ventanias (rajadas de vento);
- Ocorrência de granizo;
- Taxas de Precipitação muito elevadas em chuvas;
- Possível ocorrência de eventos como tornados entre outros.

As tempestades severas têm sido causas de falhas em linhas de transmissão com destruição de grande número de estruturas (torres).

2.36 Confiabilidade do sistema de transmissão

Um percentual entre 75 a 85 % da indisponibilidade anual de um consumidor decorre de problemas de distribuição; entretanto, uma falha no sistema de geração ou de transmissão pode deixar sem energia um número muito maior de clientes. As empresas normalmente excluem desse cálculo as interrupções devido a eventos extremos, estes eventos são caracterizados por uma falha em um número superior a 10 % dos consumidores. O evento começa quando a notificação da primeira interrupção é recebida e termina quando todos os clientes tiverem seu serviço restabelecido.

Efeitos climáticos adversos, tais como ondas de calor, são nocivos pelo fato que além de aumentar o consumo de energia elétrica em ar condicionado, também dificulta a troca de calor dos cabos devido ao aumento da temperatura nos locais onde passam as linhas. Em caso de alta umidade do ar, o consumo do ar condicionado aumenta ainda mais por ter sua eficiência diminuída.

Essa associação de eventos pode causar uma condição de falha sistêmica de larga escala, provocando o corte do fornecimento a um grande número de consumidores e eventos extremos sucessivos.

2.37 Mecanismos de falha em cabos e retirada por envelhecimento

O critério de retirada do cabo antigo e troca por um novo deve ser cuidadosamente casado com o critério de mecanismos de falha para uma aplicação particular.

Os principais fatores de fadiga dos cabos são:

- 1- Fadiga do metal;
- 2- Abrasão interna ou externa;
- 3- Corrosão interna ou externa;
- 4- Falha devido a corte, engaiolamento, sobrecarga de tensão.

Os desempenhos dos fios dependem da forma de construção e do material utilizado, dos tamanhos de qualquer roldana e da tensão de operação, que afetarão a fadiga do metal.

Os Índices de sistema elétrico podem ser divididos em índices de interrupção de carga e índices de problemas do sistema. Os índices de interrupção de carga medem a severidade dessas interrupções baseadas nas cargas interrompidas e podem ser classificados, por exemplo, como energia interrompida (ou energia não

suprida), potência interrompida, horas de carga interrompida e frequência de ocorrência de interrupção da carga, dentre muitos outros.

2.38 Cabos de Linhas de transmissão e conexões

Historicamente o transporte da energia pelas linhas de transmissão representa da ordem de 25 a 30%, dos investimentos da indústria da energia elétrica. Os condutores ideais para linhas aéreas de transmissão devem ter alta condutibilidade elétrica (para minimizar perdas), baixo custo, alta resistência mecânica, baixo peso, baixa oxidação e corrosão por poluentes. O alumínio e suas ligas é um dos materiais com o maior número dessas propriedades.

O investimento em condutores de alumínio é da ordem de 25% do investimento usando condutores de cobre equivalentes. A resistência mecânica do Alumínio é 25% inferior à do cobre e é compensada com o uso dos cabos de alumínio-aço, com pouca alteração de custo devido ao baixo custo do aço comparado ao alumínio.

As linhas de transmissão aéreas são as maiores estruturas eletromecânicas existentes, para transportar energia de forma segura, compostas de componente metálico cerâmicos com propriedades diversas como flexibilidade, resistência mecânica à tração, isolamento, rigidez dielétrica, baixas taxas de deterioração.

Essas estruturas são projetadas para suportar altas tensões mecânicas devido ao peso próprio, efeitos eólicos e demais intempéries. A separação espacial das linhas energizadas é feita para evitar efeitos indesejáveis como corona e raios. As dimensões principais das estruturas são determinadas por estudos de coordenação de isolamento; flecha da catenária dos condutores, forma de sustentação e diâmetro dos condutores.

A existência de um “bundle”, cada qual com uma fase da alta tensão, permite diminuir o efeito de corona e aumentar a capacidade de transporte de corrente. O efeito corona ocorre quando a tensão ultrapassa 3kV/mm, que é o limite da rigidez dielétrica do ar em condições atmosféricas normais e esse efeito tem conseqüências indesejáveis tais como a perda de potência, além de interferência eletromagnética e ruído audível.

Em condições atmosféricas adversas tais como chuva, neblina, geadas e neve o efeito das perdas de potência por efeito corona tornam-se maiores que em atmosfera seca. O efeito corona pode ser reduzido quando se aumenta a superfície do cabo, tal como quando se usa “bundle” composto de fios trançados.

Os condutores aéreos são desencapados para ter menor custo e manutenção mais fácil. O custo do condutor de alumínio é menor e tem peso menor comparado aos condutores de cobre, mesmo considerando a maior área para condução da eletricidade. O tipo de cabo mais usado em linhas de transmissão é o ACSR (Aluminum cable steel reinforced) que são fios condutores de alumínio trançados em volta de uma alma de aço central. A condução da eletricidade é feita no alumínio e o aço oferece a resistência mecânica adicional.

O uso de alma de aço dentro do cabo de alumínio é para obter uma alta razão de resistência mecânica em relação ao peso próprio. Um condutor trançado tem maior flexibilidade e é mais fácil de ser fabricado que um condutor sólido, além da menor perda devido ao efeito pelicular.

As principais normas brasileiras das características desses tipos de cabos são:

– EB-219 – fios de alumínio para fins elétricos;

– EB-292 – fios de aço zincado para alma do cabo de alumínio;

– EA-193 – cabos de alumínio (CA).

Os cabos ACSR são fabricados com comprimentos de até 2 km e devem ser emendados para atingir as distâncias necessárias para o transporte da energia. Para isso são usadas conexões com emendas mecânicas feitas por compressão, por implosão ou pré-formadas, que são tratadas logo adiante neste trabalho.

O condutor de alumínio com núcleo de fibra carbono (ACCC) tem as mesmas características mecânicas com a vantagem de ser mais leve que o ACSR e ter menor deformação (menores alongação e flecha da catenária) com o aumento da temperatura. A principal desvantagem é o custo superior a três vezes o equivalente de alma de aço, limitando seu uso em projetos com parâmetros tradicionais de carga e temperatura. A caracterização e designação dos cabos deve ser feita pela área nominal da secção de alumínio, expressa em milímetros quadrados, pela formação dos fios, pelo tipo (CA ou ACSR), pela classe de encordoamento correspondente e, eventualmente, pela referência comercial. No Brasil, a designação dos cabos de alumínio (CA) é feita usando o código canadense de referências comerciais. Para os cabos CA, as palavras-código são nomes de flores, e, para os cabos CAA, aves, em ambos os casos os nomes são usados na língua inglesa.

Ampacidade é o nome dado à capacidade de transporte de corrente que em instalações de linhas aéreas é determinada pela resistência do condutor e pelo calor dissipado da superfície desse condutor (efeito joule), que ocorre por radiação e convecção. A radiação depende do coeficiente de radiação do material e a convecção depende da constante de transferência de calor da superfície, o qual também depende da forma geométrica dessa superfície.²⁴

²⁴ Estudos mais detalhados sobre Cabos e Ampacidade podem ser feitos em ABNT (1986a), ABNT (1988b), ABNT (1988c), ASTM (1998), Costello e Miller (1980), Gaudry(1998). Hall. e Deb (1988), Krawitz (1982), Nagamani (1998), Pesch. e Von Olshausen (1999) Southwire Company (1994), Teixeira (2001) e Thue (1999).

2.39 Tipos de conexão de cabos condutores

A emenda mecânica por compressão é feita com ferramentas hidráulicas para a crimpagem das duas pontas dos cabos dentro da luva e usa-se o mesmo tipo de material do cabo para as luvas. Na crimpagem hexagonal é fabricada uma luva arredondada com o mesmo diâmetro do condutor e que é formatada pela compressão hidráulica em forma hexagonal resultando um material muito bom condutor e sólido devido à compressão. Para proteger de campos perigosos, aumentados nas proximidades da fronteira, as luvas são cobertas com um tubo protetor.

As vantagens e desvantagens e os campos de aplicação para cada uma delas são:

- a) As conexões soldadas, usando luvas soldadas são usadas principalmente para condutores de cobre. A luva pode ser sólida ou oca (para cabos preenchidos com óleo) e devem ter diâmetro igual ou maior que o condutor.

A versão de igual diâmetro é usada para conexões de altíssima tensão desde que a distorção do campo para a instalação da junção é menos pronunciada que com luvas de maiores diâmetros. A conexão é feita em baixas temperaturas (menores que 450 Celsius) para limitar as tensões térmicas na isolação em redor. As conexões devem ser soldadas mais quentes, caso haja possibilidade de ter curtos circuitos em temperaturas superiores a 160 Celsius.

- b) A fusão é preferível para cabos de Alumínio com isolação de papel, apesar deles raramente serem usados em alta tensão. Desde que as luvas não são necessárias para fusão, esta técnica sempre produz junções de condutores com o mesmo diâmetro. Conexões soldadas convencionais não são apropriadas para

cabos com polímeros, devido às altas temperaturas aplicadas por um longo período no processo.

c) As conexões Cadweld usam formas pré-fabricadas e pó de metal, e são adequadas para conexão sintética. Esta operação demora alguns segundos e desenvolve-se uma pequena quantidade de calor. Ela pode ser usada tanto em cabos de alumínio e de cobre e é particularmente adequada com grandes secções retas devido à sua excelente capacidade térmica e mecânica. Existe uma restrição em cabos de extra alta tensão onde não podem ser produzidas conexões de mesmo diâmetro, devido a potencial de efeitos corona.

d) Crimpagem arredondada-colocada posteriormente à crimpagem hexagonal; A luva de alumínio redonda é comprimida sobre o comprimento total da luva hexagonal.²⁵

2.40 Resistência e efeitos de temperatura

A resistência (R) de um condutor é proporcional a resistividade (ρ) do seu material do comprimento (l) e inversamente proporcional a área da seção reta circular (A).

$$R = \rho l / A \dots\dots\dots(2.1)$$

²⁵ Estudos adicionais em linhas e emendas podem ser feitos em ABNT (1981) ABNT (1985), Eletrobras (1987), EPRI (1979) , EPRI (1981), Fitzgerald (1987) Fuchs(1979), Frate(2000), Gregory. e Lindsey(1988), IEEE (2004), Ilic (2004 e Kiessling (2003) e Zhong (1986).

A resistividade do material depende da sua temperatura de operação e existem coeficientes negativos ou positivos, a maioria positivos, ou seja, a maioria dos condutores aumenta a resistência com a elevação da temperatura ($\Delta \Theta$).

$$R_{\theta} = \rho(1 \pm \Delta\theta) \dots \dots \dots (2.2)$$

A potência dissipada no material metálico devido à resistência tende a elevar a temperatura fazendo o condutor dissipar mais. O projeto da linha de alta tensão e de suas emendas deve considerar essas perdas e buscar minimizá-las, entretanto o projeto considera predominantemente o fator econômico, apesar de que um padrão usado é que essas perdas fiquem abaixo de 5% na temperatura especificada no projeto, em alguns casos estas perdas podem chegar a 20%.

Outros fatores que podem causar variações na resistência são o efeito dos condutores trançados, o arranjo dos condutores no cabo e a temperatura.

À medida que a temperatura aumenta a resistência do condutor também aumenta.

2.41 Emendas das linhas aéreas

Segundo o estudo de Pavlik (1989), as emendas de condutores são componentes sem vínculo às cadeias estruturais, aplicados exclusivamente aos cabos de energia ou de terra. As emendas existentes no mercado são do tipo de compressão, implosão ou pré-formadas. As luvas de emenda são destinadas a emendar os lances individuais durante a construção ou restabelecer os cabos seriamente danificados.

Uma emenda serve para dois propósitos: como membro de tração e como membros de contacto elétrico, sendo importante que os dois propósitos sejam alcançados com

características equivalentes as do cabo. Sua adequação à função e sua durabilidade dependem da instalação cuidadosa e adequada. Os fatores do desenvolvimento e concepção desses componentes acessórios são projeto, materiais e instalação:

- a) Projeto - A emenda ideal efetua a perfeita união das características elétricas, químicas e mecânicas entre os cabos condutores envolvidos. No projeto divide-se a teoria dos ensaios práticos: a teoria refere-se ao estudo do comportamento no campo elétrico nas regiões de transição entre os cabos. As considerações práticas levam em conta materiais, condições de ensaios e de montagem em campo²⁶.

- b) Materiais - A conexão adequada dos condutores necessita ter estabilidade térmica na faixa de temperatura de operação para evitar danos físicos na emenda em operação normal e na ocorrência de curtos circuitos no sistema.

- c) Instalação - A emenda é uma conexão entre cabos efetuada em campo em condições adversas sem o controle de qualidade de um laboratório. A seqüência de montagem prevista no projeto e verificação da limpeza dos cabos e materiais usados deve ser rigorosamente seguida. O uso da pasta antioxidante do tipo Sikronil é altamente recomendado por seus efeitos de proteção e de redução da resistência do conjunto.

A emenda deve ter pelo menos 95% da resistência mecânica do condutor (tensão de ruptura mínima RBS- Rated breaking Strength) ABNT (1981) e norma ANSI C119 4 (1998) seção 4.4.3

²⁶ O assunto pode ser melhor estudado em Di Troia (2005), Mc Cullough (2003) e Norma Din 48085.

2.42 Diversidade de campo elétrico e resistividade nas emendas

As emendas de padrões convencionais têm estrutura diferente da coaxial do cabo, devido à mudança de perfil do condutor pela presença da associação em série de materiais isolante do cabo e da emenda. No caso de estruturas não coaxiais, além da componente longitudinal que surge ao longo da emenda desde o condutor até a blindagem do isolamento, há sobreposição criando uma estrutura não coaxial. Em uma emenda convencional existem três regiões críticas onde o gradiente longitudinal deve ser calculado e mantido dentro de certos limites através do controle da sua geometria. Estas regiões ocorrem quando o perfil do isolamento ou do condutor sofre mudanças, ou seja, no campo de isolamento, na chamada “ponta de lápis” e na rampa do conector.

Nas emendas com campo elétrico defletido, há o uso de isolamento polimérica, técnica já usada em emendas subterrâneas. A principal técnica de projeto em uma emenda de campo defletido é o conhecimento da intensidade de campo elétrico nas proximidades das regiões de transição dos materiais dielétricos.

As emendas de alívio de resistividade não linear seguem o mesmo princípio das emendas com campo elétrico defletido associado à técnica de alívio contínuo de tensões ao longo do dielétrico. Neste tipo de emendas, o campo elétrico é defletido por meio de aplicação adequada de fitas auto-glomerante condutora e o dielétrico é reconstituído pela aplicação de fitas auto-glomerante isolantes.

A pasta sikronil possui característica resistiva não linear, ou seja, sua resistividade diminui quando a corrente aumenta permitindo coeficiente de temperatura negativo contrário ao do cabo, tendo efeito de reduzir os efeitos de aquecimento na emenda. As emendas com isolamento resistivo não linear tem aplicação prática em tensões de isolamento de até 69kV.

2.43 Tipos principais de emendas

Os principais componentes em linhas aéreas de alta tensão são cabos, torres, isoladores e além destes as luvas de emenda, luvas de reparo, amortecedores de vibração eólica, espaçadores fixos e amortecedores também são componentes adicionais que devem ter padrões de qualidade adequados ao bom funcionamento do sistema. Os principais componentes e tipos das emendas são:

- a) Luvas de emenda - As luvas de emenda conectam lances individuais na construção ou restabelecem os cabos danificados sob manutenção. As emendas mais usadas no mercado são de compressão ou pré-formadas.

As características eletromecânicas são:

- condutibilidade equivalente a 61% IACS correspondendo a 2.8 micro Ohms/cm quadrado,
- carga de ruptura igual a 95% do cabo.

- b) Luvas de compressão - As luvas de compressão destinadas a cabos de alumínio-aço são compostas de duas partes, uma interna para emendar a alma se aço e outra externa para conectar o manto de Alumínio do cabo.



Fig. 2.7 Detalhamento da emenda por compressão de cabo ACSR

c) A luva de emenda do cabo de aço deve ser de aço ou de aço inoxidável e protegida com luva de alumínio para evitar a corrosão. Para a instalação das luvas de compressão deve ser aplicada a pasta antioxidante.

As extremidades da luva externa devem ser cônicas para evitar amassamento ou corte das camadas externas do cabo. As emendas são presas ao cabo com matrizes acionadas por prensa hidráulica.

No processo de compressão inicialmente é prensada a luva da alma e posteriormente a do manto. A luva do manto deve ser pré-enchida com pasta anti-óxido. A prensagem da luva da alma é realizada do centro para as extremidades e a do manto desde a marcação no mesmo sentido.

Os defeitos da luva de emenda tipo compressão podem se minimizados com a aplicação de reparo pré-formado (“splice shunt”).

2.44 Emenda total pré-formada

A emenda total pré-formada reconstitui elétrica e mecanicamente as características originais do condutor. É constituída por agrupamentos de varetas, formando subconjuntos para a alma, enchimento e emenda do manto.

A emenda da alma de aço é aplicada, após a remoção dos fios de alumínio do cabo no comprimento idêntico a mesma.

As varetas do enchimento são aplicadas sobre a emenda da alma para re-estabelecer o diâmetro externo do condutor. A emenda condutora aplicada sobre a emenda da alma e do enchimento é de maior comprimento, para re-estabelecer

condução elétrica dos fios removidos do cabo. É obrigatório proceder a limpeza de cabos novos ou usados e a aplicação de pasta anti-óxido. As emendas totais pré-formadas têm vantagem de não exigir equipamento especial e reduzir o custo da mão de obra por serem instaladas manualmente.

2.45 Luvas de reparo

Quando ocorre a danificação parcial do manto de alumínio, este pedaço do cabo pode ser reforçado com luvas de reparo. Elas podem ser de compressão ou pré-formadas.

Existem dois tipos principais de luvas de reparo:

- a) Luvas de reparo por compressão - As luvas de reparo de compressão são compostas de dois segmentos semicirculares, encaixados entre si e comprimidos sobre o condutor com prensa hidráulica.

O uso de luvas de reparo tipo compressão limita-se a somente a reparo do condutor nos vãos entre os suportes, Não podem ser instalados em distâncias inferiores a 10 m do grampo.

- b) Luvas de reparo pré-formadas - As luvas de reparo pré-formadas comparadas às de compressão são capazes de restaurar o condutor em dois casos de danos; restabelecer o condutor de alumínio danificado durante a montagem ou por avaria mecânica sem considerar a fadiga.

A luva de reparo pré-formada paralela é utilizada para evitar o sobre aquecimento da luva de compressão. Frequentemente, ocorre que a luva de compressão instalada

incorretamente, ou em serviço por vários anos, começa acusar resistência à passagem de corrente elétrica ou escorregamento mecânico. A luva de reparo pré formada paralela aplicada sobre a luva de compressão assume a passagem da corrente, aumentando ainda simultaneamente a resistência mecânica. São fabricadas segundo cada tipo de cabo e emenda instalada segundo dimensões desta, tais como comprimento, conexidade das extremidades, etc.

As emendas implosivas têm surgido como uma nova oportunidade e serão mais bem detalhadas em capítulo específico de novas tecnologias.

2.46 Características de conexão de condutores

Requisitos mínimos para capacidade de transporte de corrente e força mecânica especificados em padrões tais como a norma VDE 0220.

A força mecânica residual de compressão nas luvas deve ser suficiente para suportar tensões durante implantação, as tensões de flutuação de energia eólicas locais e de variações de temperatura.

2.47 Instalação das emendas em campo

A instalação de emendas é um procedimento crítico na construção de uma linha de transmissão. As instruções do fabricante, para a inserção adequada das terminações dos fios na luva e número correto de prensagens para uso, devem ser observadas para resultar em uma emenda com tensão de ruptura mecânica adequada.

Tabela 2.3 - Técnicas de conexão de condutores de cabos de alta e extra alta tensões [Fonte: Pavlik (1989)]

Categoria	Processo	Aplicação	Características
Soldado	Com Luvas	Condutores de Al.	Diâmetros iguais ou maiores que cabo
Termicamente	Fundida	Condutores de Al. ocos com isolamento de papel	Diâmetro igual, o calor da fusão é demasiado para conectores e cabos com compostos orgânicos
	Solda Cadweld	Todos condutores s/ canal vazado	Diâmetros sempre iguais
Produzido Termicamente	Crimpado hexagonal	Todos condutores	Tubo protetor externo diâmetro maior
	Crimpado arredondado	Todos condutores	Igual diâmetro

A centralização apropriada das juntas do condutor dentro da emenda é bastante importante, a relação diâmetro x comprimento deve ser maior que 5 vezes e caso não haja centralização esta relação fica prejudicada com sobre aquecimento e ruptura do cabo.

As compressões devem ser feitas na seqüência especificada pelo fabricante da junção e devem ser usados compostos que ajudem o contacto elétrico e previna a

corrosão, permitindo maior potencial mecânico de travamento de acordo com o especificado pelo fabricante da emenda.

A limpeza dos fios é necessária para melhorar a conexão; o uso de ultra-som e solventes de limpeza tais como tri cloro etileno e tri cloro etano é o melhor método de limpeza dos fios. Onde não se pode fazer a limpeza com ultra-som deve-se fazer a limpeza com escova e o tri cloro etano deve ser usado e o solvente deve ser trocado por um novo em cada lance de cabo. O cabo deve ser seco com ar comprimido e não é recomendado o uso de ácidos para a limpeza dos cabos. O ácido deixa homogênea a superfície demasiadamente e reduz a aspereza que vai permitir uma boa conexão mecânica e elétrica, deve-se escovar a região com uso de escova dura de aço.

A ação de compressão da luva de aço sobre o conjunto de cabos de alumínio (introduzida pela prensa hidráulica) garante a resistência posterior à tração do conjunto (cabos e emendas). Adicionalmente, a luva externa (alumínio) garante a maior parte da transmissão da corrente elétrica, bem como contribui com parcela de resistência à tração da emenda²⁷.

2.48 Verificação e Revisão de Procedimentos de Execução de Emendas

A prática de execução de emendas conforme procedimento de empresas brasileiras de vanguarda no setor foi verificado à luz de procedimentos padrões e recomendações internacionais.

É interessante enfatizar os cuidados recomendados na limpeza dos cabos de alumínio na região que ficará no interior da luva, e igualmente a necessidade de

²⁷ No anexo A1 é mostrado um fluxograma com o procedimento de montagem e fotos deste procedimento feitas em laboratório

limpeza na superfície interior da luva de alumínio também devem ser enfatizados uma vez que:

- 1) Condutores de alumínio sujos dentro da luva aumentam a resistividade da emenda;
- 2) Com corrente a emenda se torna mais aquecida que o condutor;
- 3) Mudanças cíclicas na corrente causam mudanças térmicas que expandem e contraem a emenda, podendo originar degradação da resistência mecânica por fadiga.

2.49 Aceitações de deslocamento e flecha em emendas à compressão

Na província Canadense de Alberta, a regulação não exige das empresas de implantação providenciar nenhuma proteção para limitar a deformação durante a instalação do condutor. As emendas foram permitidas passar livremente sobre as roldanas (“travellers”) e somente as emendas que exibiram deformação acima de 5% de seu comprimento foram removidas e trocadas.

O padrão utilizado na República da China é que a deformação da emenda não deve exceder 2% do comprimento da emenda. Não há escorregamento nem do alumínio nem do aço dentro da emenda. Na republica da China, a capacidade requerida da luva é ser maior que 90% da capacidade de ruptura do cabo.

2.50 A montagem das emendas em linhas de alta tensão aéreas

As características mecânicas mais importantes para a utilização de um metal são o limite elástico, a resistência e o alongamento na ruptura. O limite elástico é a máxima tensão que o material pode suportar sem que se produzam deformações plásticas ou remanescentes, além de certos limites. A resistência é a máxima força de tração que a barra suporta, dividida pela área de seção transversal inicial do corpo-de-prova e o alongamento na ruptura é o aumento do comprimento do corpo-de-prova correspondente à ruptura, expresso em porcentagem.

O equipamento necessário para colocar as emendas em campo é composto de uma prensa hidráulica e compressor, juntas de compressão (matrizes), grampos de fixação, blocos de pressão, cabos de ligação e condutor nu. O equipamento deve ter capacidade mecânica e elétrica adequadas para o trabalho envolvido.

A figura 2.8 mostra emendas típicas de linha de transmissão.

O composto anti-oxidante é aplicado sobre a luva de aço, para evitar a corrosão. No STANDARD HANDBOOK FOR ELECTRICAL ENGINEERS, Section 14-Transmission Systems; pagina 14-88 [1], há uma série de recomendações de execução, sendo que boa parte delas coincide com a prática executada no Brasil



Fig. 2.8 Foto de Emendas a Compressão

2.51 As instruções dos Fabricantes

A instalação de emendas é um procedimento crítico na implantação de linhas de transmissão, pelo que as instruções dos fabricantes devem ser seguidas com inspeção e fiscalização para verificar o uso adequado das ferramentas de prensagem.

A matriz fechando totalmente com a prensagem é operação cuja qualidade é crítica. A limpeza dos condutores antes da inserção das luvas é necessária para o contacto elétrico dos elementos condutores. Condutores sujos irão produzir contactos ruins e acarretarem falhas. Mesmo os condutores novos têm camada de óxido de alumínio na sua superfície e devem ser limpos imediatamente antes da prensagem. O óxido de alumínio é isolante e necessita ser removido para haver um bom contacto elétrico. Quando condutores estão em estoque por longo período de tempo, o processo de limpeza é especialmente crítico. É recomendável desenrolar as camadas externas de tramas e limpar a camada interna antes de comprimir a emenda.

As instruções do fabricante para a inserção adequada das terminações dos fios na luva e número correto de prensagens devem ser observadas para obter uma emenda com tensão de ruptura mecânica adequada.

2.52 Verificação das Medidas e Aspectos de Colocação

A execução da emenda é muito importante e deve ser observada por um inspetor, devendo verificar as medidas marcadas. As luvas devem ser medidas no comprimento, diâmetro e demais características importantes antes e depois da

prensagem. Deve ser verificada se a prensagem está sendo feita adequadamente antes de soltar a prensa. Devem ser observadas as dimensões externas após a prensagem com um micrometro para verificar a especificação de compressão. Isso irá confirmar se a matriz fechou de forma apropriada. A qualidade da compressão deve ser confirmada pelo uso do micrometro. O inspetor deve verificar se a luva completa está reta, dentro de tolerâncias especificadas e aprovadas.

2.53 Lançamento dos cabos

O número de praças de lançamento de cabos necessárias para emendar os condutores depende da topografia, limitações do equipamento e comprimento máximo das bobinas disponíveis. É prática comum proibir puxar as emendas de compressão sobre as roldanas de passagem. Adota-se o uso de grampos de madeira para juntar dois condutores na praça de tensionamento até que o condutor esteja lançado e esticado.

Outra forma de lançamento de linha aérea consiste de emendar os comprimentos de condutor na praça de tensionamento, com as emendas de compressão projetadas para ser puxadas sobre as roldanas. Este modo tem a vantagem das emendas serem feitas em uma única praça, reduzindo o número de operações necessárias. Devem ser realizados estudos preliminares da linha a ser lançada para determinar a máxima tensão de lançamento e os ângulos máximos a serem encontrados com as torres locais e suas alturas.

As emendas devem passar pelas roldanas, cuja cavidade para a passagem do condutor deve ser projetada para permitir isso; se a cavidade for muito estreita para passar a emenda pode resultar em alargamento da fenda de passagem e a sua ruptura. Todas juntas ou emendas devem ser feitas de acordo com a recomendação do fabricante para assegurar a máxima resistência à tração na junção ou emenda.

Quando um fio trançado é flexionado sobre uma roldana, a alteração na curvatura produz tensões de curvas nos fios individuais e os movimentos relativos e as cordas produzem fricções internas e variações na distribuição espacial das cordas. O máximo esforço de curvatura ocorre nos fios mais próximos do centro. Entretanto o ponto de maior ocorrência de falhas é na superfície do cabo. Essas falhas são atribuídas a esforços de curvatura, mas na verdade são resultantes das forças de contato superficiais dos fios.

A fiscalização é feita por vistorias relativas aos requisitos técnicos e legais e analisa as conformidades dos serviços e obras, relacionados com as normas, especificações e contratos vigentes.

A operação de puxar os condutores é crítica devido ao alumínio deformar muito sob tensão. Esta deformação é conhecida como “fluência” e já ocorre quando a tensão é aplicada inicialmente e mesmo sendo baixa. Essa tensão de “puxamento” deve ser mantida tão baixa quanto possível.

A catenária deve ser checada durante a operação de construção da rede e deve ser adequada para cada lance de cabo e a cada temperatura ambiental e do cabo

2.54 Alinhamento da Luva

O inspetor deve verificar o alinhamento da luva após a prensagem que deve estar reta, ou dentro de tolerâncias especificadas e aprovadas. As práticas brasileiras não especificam limites de aceitação, sendo que internacionalmente no Canadá e na República da China existem os padrões de aceitação citados anteriormente.

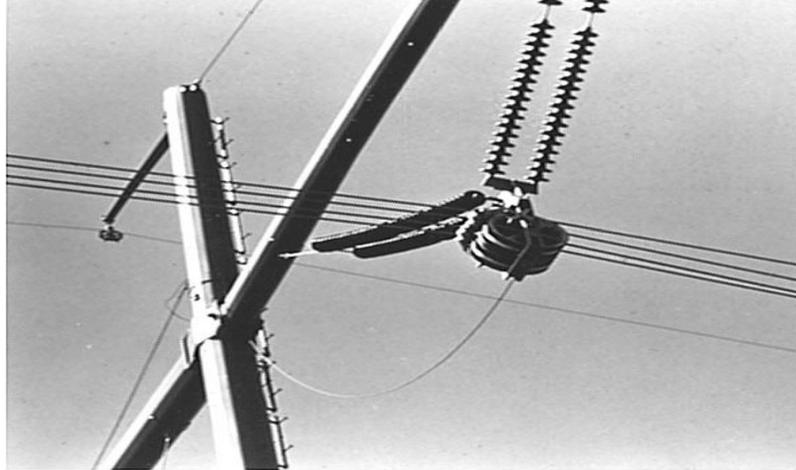


Fig. 2.9 Roldana de passagem de terra (Fonte: IEEE)

2.55 Carga nas Roldanas de Passagem Durante a Operação de Puxamento

Se as estruturas têm a mesma elevação e não existem ângulos na linha, somente a primeira e a última roldana necessitam ser consideradas. Entretanto, em terrenos não homogêneos devem ser também ser consideradas as cargas nesses pontos intermediários.

Considerando pressões a serem tratadas entre os condutores e roldanas de lançamento, deve-se notar que a pressão por unidade de comprimento entre o condutor e o sulco (fenda) é uma função da tensão (T) no condutor, o diâmetro da roldana para o lado superior do sulco (fenda) (D_s), e o diâmetro do condutor (DC). A pressão é independente do ângulo radial de contacto através da roldana e da carga resultante na roldana.

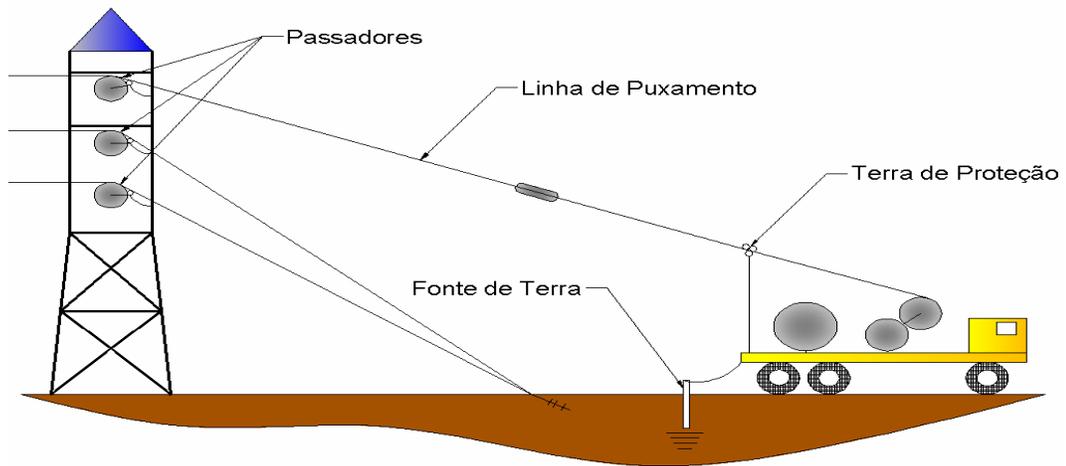


Fig. 2.10 Puxador equipado com linha de puxamento conectado a linha piloto (Fonte: IEEE)

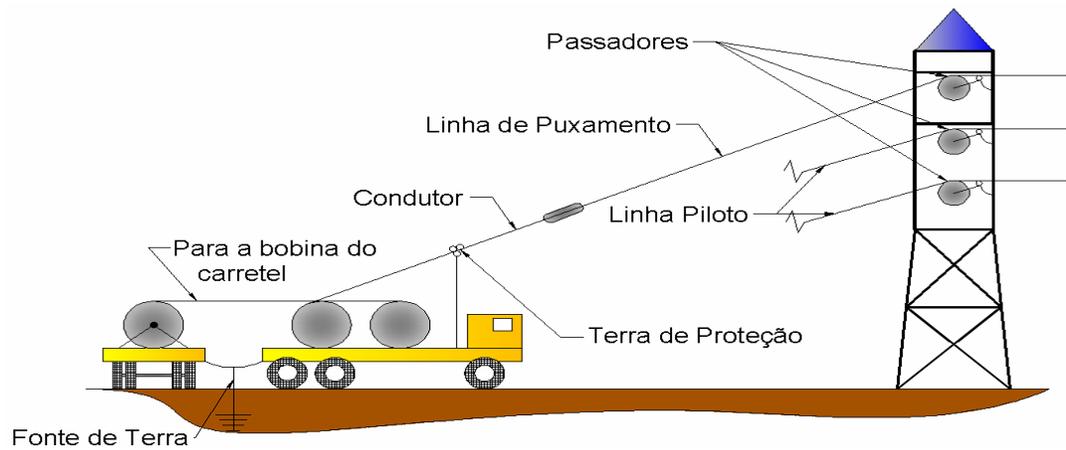


Fig. 2.11 Tensionador com condutor conectado à linha de puxamento e conexão de terra entre condutor tensionador e carreta de bobinas (Fonte: IEEE)

A pressão a ser suportada pode ser expressa em razão dos seguintes parâmetros:

P = pressão sofrida,

T = Tensão no condutor,

DS = Diâmetro do fundo do sulco da roldana,

DC = diâmetro do condutor ou da linha de puxamento.

Os limites ou guias para condutores são de 500-700psi para roldanas alinhadas, e valores menores para as desalinhadas. Para obter uma curvatura razoável nas linhas e roldanas a máxima pressão unitária permitida para as linhas de puxamento do aço é de 2000 psi para a roldana de neoprene e de 3500 psi para o uretano.

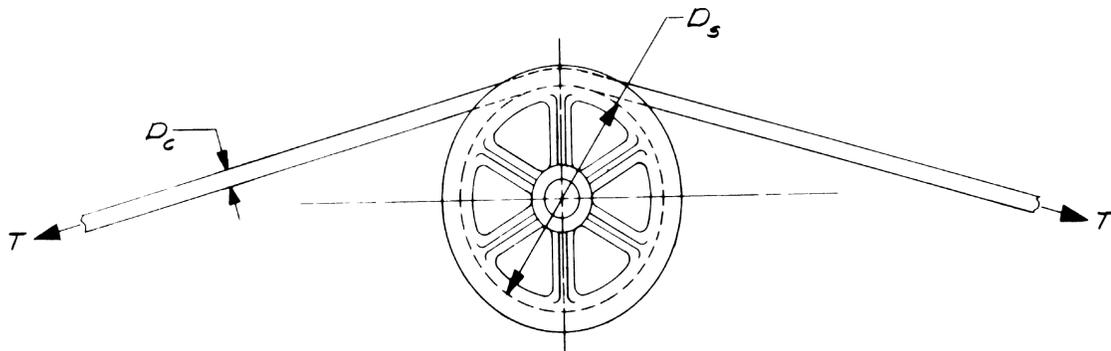


Fig. 2.12 Passagem do cabo sobre a roldana (Fonte: IEEE)

2.56 Aterramento, ligação dos terminais do condutor e segurança da força de trabalho

É extremamente importante tomar precauções para prevenir o pessoal de evitar ficar em série com os dois condutores ou em série do cabo pára raios com algum outro condutor que possa ser energizado. Esse tipo de acidente pode ser prevenido em uma área de trabalho equipotencial pelo aterramento e colocação de ligações para terra, conforme mostrado na Fig. 2.13.

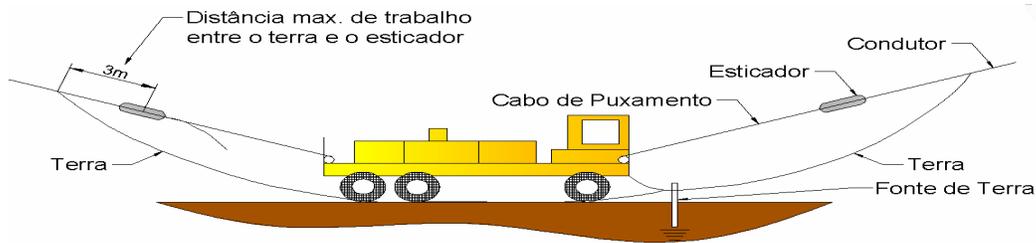


Fig. 2.13 Arranjo para o caminhão de emendas com condutores aterrados antes de realizar a emenda (Fonte: IEEE)

O ponto de terra deve ser localizado em cada lado, dentro de 3 metros da área de trabalho, onde os condutores e sub-condutores e fios de terra são emendados no nível do chão. Os dois lances de cabo finais, a serem emendados, devem ser conectados para um eletrodo conectado ao terra no caso de emendados no nível do chão. É recomendado que as emendas devam ser realizadas em uma plataforma isolada ou em um aterramento condutivo metálico ligado às malhas de terras existentes. Quando a malha de terra é usada, é recomendável que a malha de aterramento seja conectada a um caminho de baixa impedância para terra. Os veículos de emendas devem ser aterrados antes de fazer emendas nos condutores. O sistema de terra deve ser deixado no lugar até que os condutores emendados são levantados para deixar limpa a praça de emendas. Quando a emenda esta terminada a conexão das fases e sub-condutores deve ser removida antes de elevar o condutor acima da praça de emendas e da área de toque do pessoal de solo.

2.57 Mecanismos de Falha em Cabos Trançados e Critério de Retirada

As tensões por forças radiais induzidas, exercidas pelas tranças externas do cabo, produzem alta força de contacto entre duas tranças (ou cordões trançados) adjacentes. Essas forças são responsáveis por tensões muito altas nos fios individuais e responsáveis pelo início e propagação das falhas por fadiga. Este é o

mecanismo de fadiga dominante para cabos trançados sujeitos às cargas cíclicas de tensão. A tensão sobre os fios internos faz com que rompam e deixem de contribuir para a tensão de ruptura total do cabo, diminuindo sua capacidade de suportar cargas mecânicas, o que causa um processo abrupto de avalanche para o mecanismo de falha por fadiga.

O critério de retirada do cabo por um novo deve ser coerente com os modos de falha para uma aplicação particular, incluindo demais componentes da linha de transmissão.

Além de aspectos mecânicos, não se deve subestimar o potencial de falha devido ao aquecimento resistivo do cabo. Cabos com elementos não metálicos são particularmente susceptíveis a falhas térmicas por causa da baixa condutividade térmica dos elementos de tração e da capa do cabo.

É importante determinar se a falha é devido às causas internas (tais como as citadas anteriormente) ou externas (exógenas). Se for induzida externamente recomenda-se verificação dos procedimentos operacionais. Caso for causa interna o cabo pode ter deficiências de projeto e não é adequado para as condições existentes. Uma alteração no procedimento operacional reduzindo a demanda por desempenho do cabo permite operação satisfatória.

2.58 Principais Mecanismos de falha em cabos de linhas de transmissão

Os mecanismos de falhas internas incluem:

- 1) Desgaste por abrasão dos elementos de tração.

- 2) Falha por fadiga dos elementos metálicos de tração;

- 3) Migração dos elementos de tração não metálicos causando rosqueamento com os fios condutores e sobre aquecimento do cabo

- 4) Ruptura ou curto circuito dos condutores elétricos;

- 5) Ruptura das fibras ópticas do cabo OPGW (Optical Path Ground Wire);

- 6) Falha térmica do cabo devido ao aquecimento resistivo e aquecimento devido á ciclagem continua sobre as roldanas dentro do equipamento de compensação de movimento;

- 7) Falha térmica por descentralização da emenda e conseqüente sobre aquecimento;

- 8) Falha mecânica por deslocamento com flecha na emenda e ruptura dos tentos em processo de avalanche.

As falhas externas, além das mecânicas (como queda das torres, por exemplo) são principalmente devido a intempéries com descargas atmosféricas, curto circuitos por alongamento demasiado devido a aumento de temperatura ou ainda falha iniciada por efeito corona.

2.59 Cargas mecânicas sobre os cabos e empenamento das emendas

- Estado básico - Para condições de temperatura mínima, a tração axial deverá ser limitada a 33% da tração de ruptura do cabo. Para condições de vento com período de retorno de 250 anos, a tração axial deverá ser limitada a 50% da tração de ruptura do cabo. Para condições de vento extremo, a tração axial deverá ser limitada a 70% da tração de ruptura do cabo.

- Estado de tração normal (EDS) - No assentamento final, à temperatura média sem vento, com nível de tracionamento conforme os valores indicados na Norma NBR-5422 [3].

- Estado de referência - A distância mínima ao solo do condutor (“clearance”) é obtida com consideração de pressão de vento leve ou ausente.

- Cargas mecânicas sobre as estruturas - Para o projeto mecânico dos suportes das linhas de transmissão, os carregamentos oriundos da ação do vento nos componentes físicos da linha devem ser estabelecidos a partir da caracterização probabilística das velocidades de vento da região com tratamento diferenciado quanto ao tipo de tormenta (tormentas frontais – “EPS extended pressure systems” e tormentas elétricas - “TS Thunderstorms”)

2.60 A fiscalização de implantações em campo²⁸

O objetivo da fiscalização é checar a execução de todos os serviços e obras nas diversas etapas, garantindo boa qualidade, de acordo com as normas técnicas e especificações, respeitando, sempre, o que foi estabelecido em contrato assinado entre as partes.

Ambos os métodos de cálculo de esticamento dos cabos elétricos (tempo de retorno da terceira ou quinta onda e da tangente da catenária devem ser de conhecimento das firmas empreiteiras) visando a observação e otimização dos cálculos e resultados, sendo que o método da tangente da catenária é o mais preciso.

A linha de transmissão deverá operar preservando as distâncias de segurança para a circulação da corrente operativa por fase e a ocorrência simultânea das seguintes condições climáticas:

- a) Temperatura máxima média da região;
- b) Radiação solar máxima da região;
- c) Brisa não superior a 1 m/s.

Em condições climáticas mais favoráveis do que as estabelecidas, a linha de transmissão pode operar com carregamento superior à corrente estabelecida, desde que as distâncias de segurança e as demais condições de projeto sejam respeitadas. A capacidade de condução de corrente dos cabos, conexões e

²⁸ No anexo A2 são mostrados exemplos de itens para a fiscalização de implantação de linhas e emendas

componentes que conduzem correntes deve ser superior à corrente que, nas condições climáticas estabelecidas acima, leva os cabos condutores à temperatura de 90 Celsius.

2.61 Indicadores de Desempenho das Firms Empreiteiras

O Indicador de Não-Conformidades Técnicas é definido pelas percentagens de não-conformidades técnicas levantadas nas vistorias pela fiscalização durante a vigência do contrato. Para isto há necessidade de se fazer um levantamento de todas as não-conformidades técnicas factíveis de ocorrência nos serviços ou obras, considerando-se cada componente da linha de transmissão e, atribuindo-se as pontuações para cada item.

Também foram realizadas visitas a outras empresas nacionais para identificar os procedimentos e tecnologias que têm sido adotado na execução de emendas, e possíveis soluções para o problema de empenamento. Foi feita visita a um fabricante nacional (BURNDY) e pesquisa sobre disponibilidade do mesmo produto de outros fabricantes.

2.62 Comentários e conclusões do capítulo

As falhas sistêmicas do sistema de energia elétrica tem tido atenção do público em relação à adequação do sistema de transmissão e as necessidades de sua expansão. O planejamento da expansão da transmissão torna-se mais difícil no ambiente de mercado re-estruturado de eletricidade porque ambos os aspectos de confiabilidade e econômico dependem da operação do sistema e muitas questões são inter-relacionadas.

Existem ainda questões adicionais importantes relacionadas ao planejamento da expansão do sistema de transmissão:

a) A veracidade de informações e modelos que requerem uma grande quantidade de dados de entrada, nem sempre confiáveis.

b) Critérios de planejamento determinísticos, ao invés de estocásticos, não considerando a probabilidade de ocorrência de cada contingência.

Na maioria dos países, a expansão da transmissão continua sendo feita por processos tradicionais com adaptações sendo que as incertezas da evolução das regras de mercado e do retorno sobre o investimento desencorajaram e provocaram reduções de novos investimentos. Segundo Mandell (2005) o investimento anual em transmissão nos EUA caiu 50% desde 1975, enquanto na Noruega caiu de 400 para 40 MNOK de 1991 até 1996. Esses investimentos precisam ser retomados em maiores níveis para evitar novas falhas sistêmicas de larga escala, custos intangíveis e impossíveis de serem medidos como a perda de vidas humanas.

Com os mercados re-estruturados e competitivos de eletricidade, as características destes mercados alteraram para:

- Uso menos previsível dentro de horizontes de tempo de curto prazo;
- Maior volatilidade de fluxos entre geradores e consumidores e entre sub-mercados diversificados;
- Maiores volumes de eletricidade transportada, refletindo aumento da comercialização inter-regional e aumento do consumo em algumas regiões.

Esses fatores alteraram a natureza, frequência e probabilidade de falhas dos sistemas de transmissão, levantando questões de adequação e efetividade dos padrões de confiabilidade. A atenção voltou-se para revisão dos padrões de confiabilidade após as falhas de 2001 a 2003. Algumas sugestões que podem ser incluídas para desenvolver padrões mais eficazes incluem:

- a) Revisar as premissas e metodologias de cálculo de previsões de demanda de eletricidade, com análise de cenários e de riscos, avaliando o comportamento do sistema sob condições diversas, novas estratégias de gerenciamento de riscos pró-ativas.

- b) Melhorar os padrões determinísticos, com a rede funcionando em frequência e tensão adequadas, mesmo com dois elementos da rede em casos críticos específicos.

Necessita-se um melhor entendimento das justificativas econômicas (custos e benefícios) para os critérios de confiabilidade e os modelos econômicos de investimentos em transmissão necessitam considerar os fatores que criam a necessidade de critérios de confiabilidade e os impactos que os critérios de confiabilidade que podem ser aplicados na prática, devendo incluir custo de perdas e falhas nos preços locacionais e planos de investimentos. Os reguladores por sua vez, podem ter dificuldade de acesso de tais propostas.

O acesso à relação custo benefício pode ser difícil e aberto às disputas levando a atrasos e incertezas. O acesso a informação precisa e confiável sobre a condição

operacional da rede é crucial para melhorar a efetividade, tempo e credibilidade ao processo de planejamento e aprovação de investimentos.²⁹

Em diversos países a regulação por incentivos foi uma alternativa para a regulação tradicional de custo do serviço e de taxa de retorno. A expectativa foi que os mecanismos de regulação por incentivos providenciassem incentivos para as empresas reduzirem preços e melhorarem a qualidade efetiva em custos e novos produtos e serviços e em preço de acesso. Com isto há um aumento da confiabilidade do sistema e da rede.

Os estudos de engenharia financeira e de confiabilidade fornecem medidas de exposição a riscos e isto abre possibilidades de perspectivas inovadoras em diversidades de recursos, gerenciamento de sistema, incluindo lado da demanda, armazenamento e conversão de energia avançados. Permitem também estudos baseados em portfólio de investimentos (carteiras), ferramentas largamente usadas no setor financeiro e de crescente uso no setor energético a partir de meados da década de 90.

No caso do setor elétrico, a diversidade de tecnologia de geração é importante como forma de reduzir a vulnerabilidade a erros de projeto ou de operação, o que poderia causar eventos de larga escala e cortes no suprimento durante o tempo necessário para efetuar reparos.

Outro método de atingir as metas de fornecimento de energia confiável é o uso de redundâncias no planejamento para mitigar riscos de falhas esperadas, margens de

²⁹ Estudos adicionais sobre os assuntos tratados neste capítulo podem ser feitos em Baylis e Hardy (2007), Billinton (2001), Fink e Beaty (2006), Gellings e Amin (2006), Graccevaa.(2007), IEEE (2008), Mandell (2005), ONS (2010), Paithankar (1997), Peerenboom (2001), Restrepo e Zimmerman (2006), Sheldon (2003), Tennbakk (2000) e Zavadil (2007),

reserva maiores, redes de transmissão e de distribuição múltiplas e redundantes. Estas soluções são bastante onerosas devido ao seu pouco uso na maior parte do tempo.

As melhorias nestes arranjos ou investimentos em expansão das redes de transmissão para manter padrões de operação existentes, podem não ser suficientes para assegurar serviços confiáveis de eletricidade ao ambiente de mercado atual. O ajuste de novo regime de mercado e as alterações nas práticas técnicas irão requerer soluções técnicas melhoradas.

As não conformidades técnicas podem causar eventos de falha em cascata com efeitos devastadores; algumas causas comuns a esses eventos podem ser listadas:

- O treinamento inadequado e perda de pessoal experiente nos operadores do sistema,
- Um ambiente de operação de rede mais frágil, conseqüência da diminuição do excesso de capacidade,
- Uma vulnerabilidade inerente das redes de transmissão AC à maior número de falhas, ocorrendo falhas múltiplas dentro de períodos normalmente permitidos para o sistema recuperar de uma única falha,
- Comunicação deficiente na coordenação de tempo real do sistema, onde os mercados dividem a responsabilidade para mais de um operador de sistema,
- Manutenção inadequada da infra-estrutura da rede, bem como da calibração dos equipamentos de diagnóstico de falhas da rede;

- Dificuldade de melhoria dos padrões de qualidade de implantação de redes e sua fiscalização.

Algumas dificuldades em relação às luvas de compressão estão colocadas a seguir:

- A instalação de emendas de compressão deve ser realizada com profissionais especializados e sob rigorosa inspeção.

- O peso da prensa e cabo obriga realizar a instalação das luvas no chão e, no caso de conserto do condutor rompido, obriga a desmontar trechos da linha e efetuar ancoragem provisória do cabo.

- Não é conveniente colocar as luvas durante o desenrolamento do cabo, porque a dobra do cabo junto às bocas da polia pode causar amassamento e cortes nos fios individuais.

- Apesar do uso de manômetros que determinam a força da prensagem da luva, não se consegue definir se ela foi corretamente instalada. Os defeitos podem ser de compressão deficiente, falta de pasta anti-óxido, descentralização da luva de alma em relação ao manto, prensagem do vazio sobre a luva da alma. A correta instalação pode ser verificada somente com a gamagrafia (Raios X).

- Outros aspectos negativos correspondem à danificação do cabo junto às extremidades da luva pela forma inadequada, compressão deficiente e vibrações eólicas.

Algumas recomendações são feitas:

1- O monitoramento da temperatura da linha de transmissão e da duração da operação em alta temperatura pode permitir melhor entendimento do estado do

sistema de linha de transmissão aérea. Reduzindo o tempo de exposição às altas temperaturas para um valor limite máximo irá permitir que a resistência do condutor seja mantida estável e funcional por períodos maiores de operação.

- 2- O aumento da área transversal do condutor em áreas críticas pode assegurar a operação em altas temperaturas, reduzindo a ocorrência de falhas mecânicas do condutor.

- 3- Monitoramento de tensão mecânica na linha – Apesar de operação cumulativa em alta temperatura de operação resultar na perda de tensão mecânica de ruptura dos cabos ACSR, isto atinge um patamar mínimo e para de diminuir, Desta maneira é importante monitorar as tensões mecânicas das linhas, impedindo-as de se aproximar do mínimo de 90% da tensão de ruptura, sendo possível operar em temperaturas mais altas com risco de falha mecânicas reduzidos.³⁰

Para buscar entender o motivo das vulnerabilidades das redes e em particular das emendas à compressão foram realizados planejamentos e ensaios, o que será visto a seguir nos próximos capítulos.

³⁰ Estudos adicionais sobre conexões e cabos incluindo com operação em temperaturas mais elevadas pode ser encontrado nas referências a seguir: Cigré (1979), Fonseca. e Cimini (2003), Michael (2007), Wang (2008), Wang (2011) e Zhong (1986).

3.Planejamento de ensaios e pesquisas

Neste capítulo serão estudados os limites de tolerância para aceitação de não conformidades em implantação de linhas de transmissão, especificamente o deslocamento com flecha (empenamento) das emendas à compressão em aspectos qualitativos inicialmente, pois um critério definitivo depende dos resultados de ensaios de tração realizados.

Nesse capítulo também são discutidos os fundamentos de engenharia de estruturas, critérios de segurança e as distribuições dos esforços nas emendas solicitadas a tração, com base em modelos estruturais e em simulações numéricas. A seguir, discutem-se princípios de dimensionamento mecânico e possíveis mecanismos de falhas com o envelhecimento.

Além disso, são estudadas normas internacionais e nacionais que descrevem as regras e diretrizes para o desenvolvimento de Emendas de Cabos Condutores para Linhas de Transmissão. São também apresentados os questionários e anotações nas visitas a agentes de transmissão no setor elétrico brasileiro.

3.1 Estados Limites de Peças Estruturais

3.1.1 Estados limites últimos ou de ruína

Correspondem aos valores máximos das capacidades resistentes do sistema estrutural. Um estado limite último ocorre quando a estrutura tem esgotada a sua capacidade de suporte, surgindo deficiências caracterizadas por danos estruturais. Este estado limite pode ser alcançado em uma estrutura por causas diversas:

- a) Ruptura de seções críticas;
- b) Instabilidade por deformações;
- c) Deformações elásticas ou plásticas excessivas;
- d) Instabilidade de corpo rígido;
- e) Deterioração por efeito de fadiga;
- f) Geometria alterada por deformações elástica ou plástica, deformação lenta ou fissuração;
- g) Transformação da estrutura ou uma de suas partes em hipostática, etc.

3.1.2 Estados limites de utilização

Um estado limite de utilização caracteriza-se por comprometer a durabilidade da estrutura ou a utilização funcional da construção, devido a desempenhos inadmissíveis de elementos, mesmo sem a ocorrência de danos estruturais que comprometam a integridade imediata da estrutura. Este estado limite pode ser alcançado em uma estrutura por causas diversas:

- a) Deformações excessivas,
- b) Fissurações excessivas,
- c) Vibrações com amplitudes excessivas,
- d) Corrosão.

3.2 Métodos de Verificação da Segurança

3.2.1 Método clássico ou método determinístico das tensões admissíveis

A verificação da segurança é efetuada pela limitação das máximas tensões obtidas nos cálculos, durante a elaboração do projeto, a valores admissíveis para as

mesmas. Estes valores são estabelecidos conforme a natureza do esforço solicitante e conforme o material estrutural empregado.

Para tanto, são adotados coeficientes de segurança, cuja função é reduzir os valores dos máximos de uso das resistências, determinadas em ensaios para cada tipo de esforço solicitante dos diversos materiais.

Este método apresenta algumas limitações:

- a) Os valores das ações e das resistências dos materiais são considerados fixos e não aleatórios e são empregados em seus valores extremos, raramente atingidos durante a vida útil do elemento construído, provocando dimensionamento excessivo dos elementos estruturais;
- b) O cálculo freqüentemente conduz ao mau aproveitamento dos materiais, por não considerar a capacidade de acomodação plástica deles em resistir solicitações acima das idealizadas no projeto;
- c) Existem situações em que as solicitações não são proporcionais às ações, e neste caso, um pequeno aumento das ações externas provoca um grande aumento das solicitações (casos de instabilidade, por exemplo);

Além dessas, a principal crítica a esse método pode ser sintetizada como o tratamento determinístico dados às ações e às resistências.

3.2.2 Método probabilístico dos estados limites

Este método usa teorias de probabilidade e técnicas de estatística para determinação do coeficiente de variação e indica a dispersão dos dados que caracterizam ações e resistências. O método probabilístico consiste em dois passos:

- 1) Determinação estatísticas da probabilidade de ruína, considerando-se a aleatoriedade das ações, sua recorrência e seus efeitos estruturais;
- 2) Determinação estatística das margens de segurança.

As grandezas empregadas nos cálculos são aleatórias e apresentam imprecisões:

- a) Na resistência característica dos materiais: variabilidade dos materiais, defeitos de ensaio, correlação entre o modelo reduzido e a realidade;
- b) No valor característico das ações: variabilidade das ações não permanentes e sua recorrência e variabilidade das ações permanentes em função da utilização de materiais não homogêneos;
- c) Em defeitos de fabricação e montagem: os elementos podem apresentar falhas de fabricação ou montagem gerando ações ou reduzindo as resistências previstas no dimensionamento

3.2.3 Classificação das ações

As ações podem ser classificadas nas seguintes categorias:

- a) Conforme a forma de atuação:
 - Ações diretas: consideradas como forças impostas ao sistema estrutural;
 - Ações indiretas: consideradas como forças ou esforços causados.

b) Conforme a ocorrência:

- Ações permanentes: ações que ocorrem com valores constantes ou de pequena variação ao longo de sua vida útil. O peso próprio é um exemplo de ação permanente;
- Ações variáveis: ações que ocorrem com variações significativas de seu valor. Um exemplo de ação variável é a ação do vento;
- Ações excepcionais: são ações com duração extremamente curtas e muito baixa probabilidade de ocorrência em sua vida útil, mas que devem ser consideradas no projeto de determinadas estruturas. O choque de um veículo contra uma edificação é uma ação excepcional;
- Ações acidentais: são ações relacionadas com a utilização da estrutura. Essas ações podem variar com a mudança de uso da estrutura (pessoas, mobiliário, veículos, etc.).

3.2.4 Determinação da resistência dos materiais

A resistência característica dos materiais é determinada usando ensaios laboratoriais. Os valores obtidos em uma série de corpos de prova determinam o valor de cálculo segundo a metodologia utilizada, determinística ou probabilística. Para cada parâmetro de cálculo deve ser definido um ensaio adequado para a sua determinação.

3.3 Condicionantes para o Dimensionamento de Emendas a Compressão

3.3.1 Parâmetros e a Compatibilidade de Critérios Cabo-Emenda

No caso das emendas à compressão, devem-se determinar os seguintes parâmetros para o material utilizado na luva (aço), para o cabo de transmissão e para o conjunto cabo-emenda da conexão: determinação da curva tração versus deformação e do módulo de Poisson. A partir da curva tensão-deformação determina-se os valores de módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tensão de ruptura.

3.3.1.1 Condições de Implantação e Operação

As condições de construção e operação devem ser consideradas no dimensionamento da emenda a compressão.

As condições de operação são de fácil determinação, uma vez que são as mesmas utilizadas no dimensionamento estrutural do cabo de transmissão. A essas condições devem ser acrescentadas as considerações de potenciais falhas de fabricação e montagem.

As condições de implantação consistem da prensagem da peça e operações relacionadas, como por exemplo, ajustes de curvaturas indesejáveis, também chamado de “efeito banana”. Além disso, a colocação dos cabos passando por roldanas podem submeter à conexão a esforços fletores para os quais o seu uso em condições de operação não são previstos.

O dimensionamento da emenda deve seguir os mesmos critérios adotados no dimensionamento do cabo, sejam eles através do método das tensões admissíveis

ou estados limites e a emenda deve ser dimensionada de maneira a não representar um ponto frágil no sistema. A emenda deve ser dimensionada de modo que a ruína do sistema ocorra no cabo.

3.3.2 Distribuição de Tensões e Ruptura da Emenda à Tração

A análise da ruptura à tração deve ser realizada na luva de aço e na luva de alumínio. A Fig. 3.1 abaixo mostra esquematicamente as áreas de seção transversal que podem ser consideradas para o cálculo da resistência à tração na emenda do cabo de aço. Observa-se que as seções A e B são críticas para o cabo de aço e junta respectivamente, uma vez que na seção A o cabo sofreu uma redução de seu diâmetro em função da prensagem e na seção B, no centro da emenda, não há contribuição dos cabos na resistência à tração, caso que ocorre na seção C onde ambos atuam solidariamente.

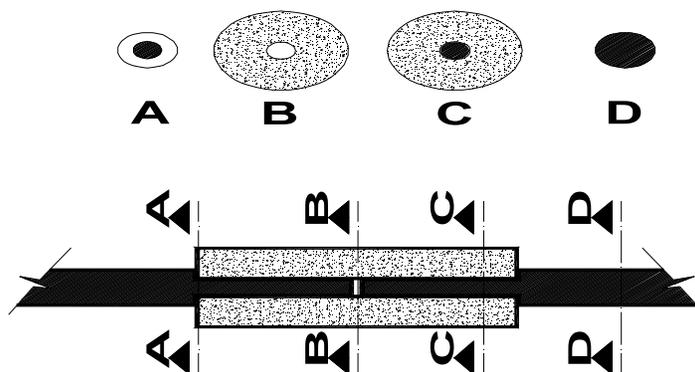


Fig. 3.1 – Seções Transversais da Luva de Aço em emendas de cabos ACSR

3.3.3 Escorregamento

A Fig. 3.2 mostra o esquema estático da luva de aço onde a força de tração atuante no cabo é transmitida à luva por aderência e para que não ocorra escorregamento, deve-se garantir que a integral das forças de atrito seja equivalente à tração no

cabo. A força de atrito é função da força de prensagem da luva e essa relação deve ser obtida em ensaios de laboratório. Conhecendo a força de prensagem versus resistência de atrito pode-se calcular os valores de força de prensagem e comprimento da junta.

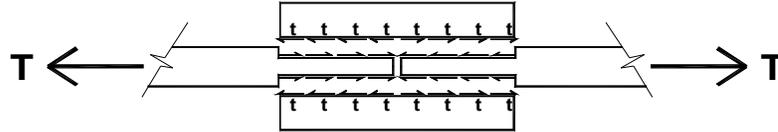


Fig. 3.2 Estado de Tensão na Região da Luva de Aço

Com a compressão da junta de aço, essa se alonga diminuindo sua espessura, e conseqüentemente, a área da seção transversal. A área da seção prensada deve ser a área utilizada no cálculo da resistência de ruptura à tração da conexão.

Análise similar deve ser feita para a junção de alumínio, devendo-se também verificar o escorregamento e obter em laboratório a relação força de prensagem versus resistência de atrito. Com essa relação calcula-se o comprimento da luva e pode-se também verificar a redução da espessura da parede da luva e sua resistência final à tração.

3.3.4 Defeitos de Execução / Prensagem

Durante o processo de prensagem pode ocorrer o desalinhamento das luvas e emendas; quando em operação, o cabo é tracionado provocando um momento fletor na conexão (que tende a realinhar a emenda). Esse momento fletor, em função da excentricidade gerada pelo desalinhamento, não é previsto na operação usual da peça, devendo assim verificar-se o efeito na resistência. O projeto deve considerar os limites construtivos aceitáveis nos quais os efeitos de excentricidade não venham a comprometer a segurança operacional. A Figura 3.3 abaixo mostra um esquema das tensões atuantes nas paredes da junção. Note que a conexão de alumínio,

quando desalinhada, é submetida a duas tensões, uma proveniente da força de tração e outra proveniente do momento fletor. A sobreposição dos efeitos leva a uma tração maior em uma região da parede. Esse aumento na tensão de tração é função do desalinhamento e pode levar à ruína da luva. Então, o desalinhamento máximo admissível deve ser considerado no projeto.

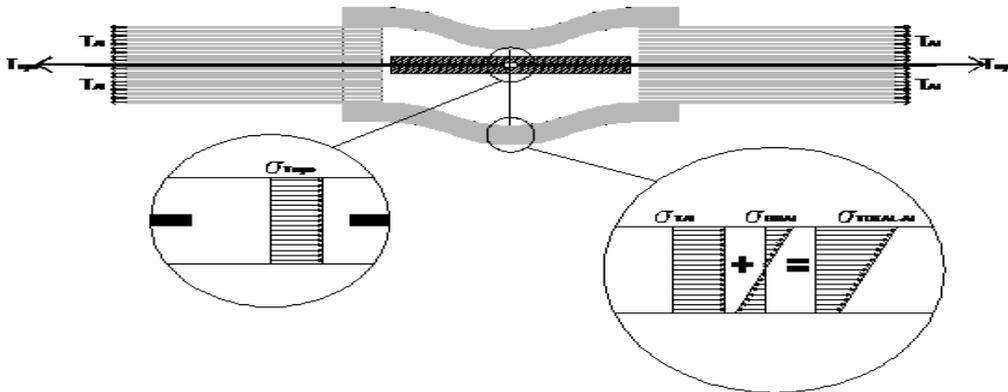


Fig. 3.3 Esquema de tensões atuantes em luva desalinhada em regime elasto-linear

3.3.5 Efeitos térmicos

Os módulos de elasticidade do aço e do alumínio são sensíveis a temperaturas elevadas; com a queda do módulo de elasticidade, a deformação axial aumenta, para uma mesma tração, o que é conhecido como fenômeno de fluência. Esse alongamento axial implica em uma diminuição da seção transversal acarretando perda de resistência da peça. A Figura 3.4 apresenta os fatores de redução do módulo de elasticidade de um dado aço em função da temperatura.

O dimensionamento estrutural deve contemplar as solicitações térmicas da linha em operação.

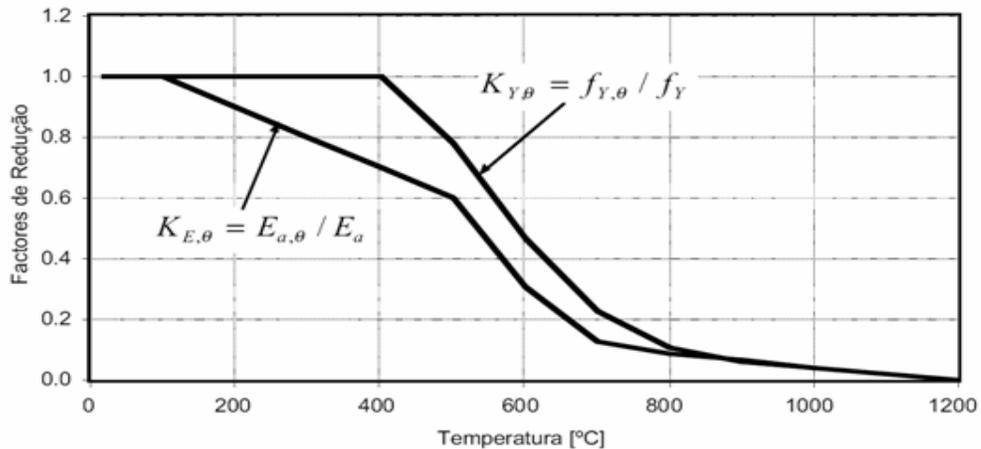


Fig. 3.4 Análise não linear do comportamento termo-mecânico de componentes em aço sujeitas ao fogo. (Fonte: Fonseca, E. e Vila Real, P.)

3.3.6 Fadiga

A força de tração atuante nos cabos e conseqüentemente na conexão é dimensionada no projeto dos cabos. As ações solicitantes principais são o peso próprio e as ações dinâmicas do vento atuante nos cabos. A característica dinâmica das ações de vento pode ocasionar fadiga nos cabos e nas conexões e estes efeitos de fadiga devem ser considerados no cálculo. Além disso, os efeitos de fadiga devem ser mais proeminentes nas emendas que nos cabos devido sua maior rigidez e às tensões residuais introduzidas no processo de prensagem.

A emenda prensada trabalha em regime inelástico e está sujeita a fenômenos de encruamento e efeito Baushinger e em emendas mal executadas (com desalinhamento com flecha) há a intensificação desses efeitos.

3.4 Propriedades Mecânicas em Tração

Na definição da tensão e deformações convencionais, considera-se uma barra cilíndrica e uniforme que é submetida a uma carga de tração uniaxial crescente, conforme mostra a Fig. 3.5. Tal figura mostra o esboço da curva típica obtida em um ensaio de tração, onde as seguintes regiões podem ser caracterizadas:

- a) Trecho **OA**: região de comportamento elástico entre tensão-deformação
- b) Trecho **AB**: região de deslizamentos de discordâncias
- c) Ponto **C**: Início do processo de ruptura
- d) Ponto **D**: Ruptura total

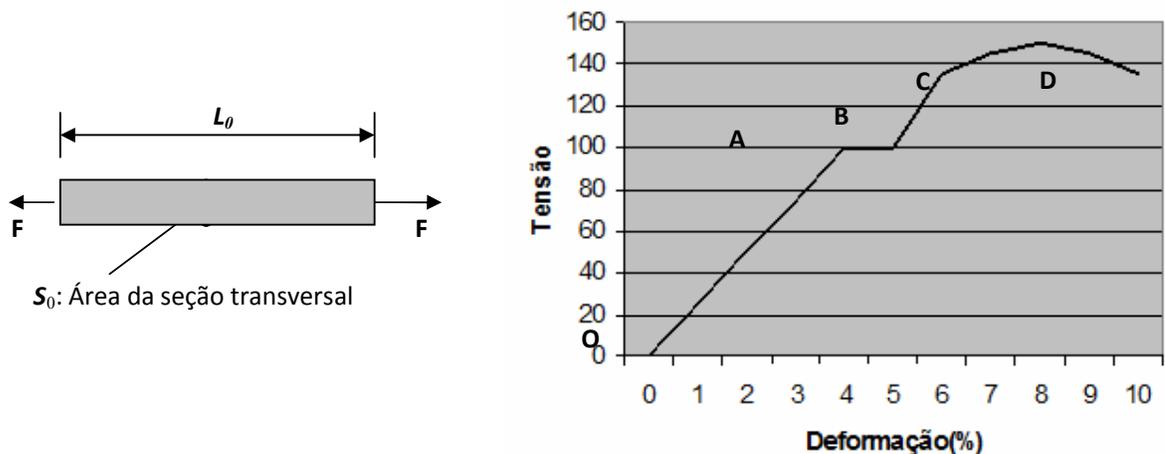


Fig. 3.5 – Resultado Típico de um Ensaio de Tração

A tensão convencional σ , ou ainda tensão nominal, aplicada ao corpo de prova é dada por:

$$\sigma_c = \frac{F}{S_0} \dots\dots\dots(3.1)$$

Onde:

F : Carga aplicada (N);

S₀ : Seção transversal original (m²).

A deformação convencional (ϵ_c) é dada por:

$$\epsilon_c = \frac{l - l_0}{l_0} \dots\dots\dots(3.2)$$

Onde:

ϵ_c : Deformação (adimensional normalmente expresso em %);

l₀ : Comprimento inicial de referência (carga zero);

l : Comprimento do corpo de prova sob carga diferente de zero (carga F).

Para um material de alta capacidade de deformação permanente, o diâmetro do corpo-de-prova começa a decrescer rapidamente ao ultrapassar a carga máxima (ponto D) e a carga necessária para continuar a deformação diminui até a ruptura total. Observa-se, na prática, uma grande variação nas características das curvas tensão-deformação para diferentes tipos de materiais.

Quando uma amostra de um material solicitado por uma força sofre uma deformação e, após a retirada da força aplicada, recupera suas dimensões originais, esta deformação é definida como *deformação elástica*. Esse comportamento é descrito matematicamente pela equação da elasticidade de uma mola, dada por:

$$F = k.X \dots\dots\dots(3.3)$$

Onde:

F : Força aplicada que causou o deslocamento;

k : Constante da mola;

X : Deslocamento.

De modo semelhante, a deformação elástica de um corpo-de-prova é dada pela *lei de Hooke*:

$$\sigma = E.\varepsilon \dots\dots\dots(3.4)$$

Onde:

σ : Tensão mecânica aplicada;

E : Módulo de Young (ou módulo de elasticidade);

ε : Deformação elástica.

As principais tensões definidas na região elástica são:

σ_a : Limite de elasticidade: máxima tensão que o material pode suportar sem apresentar deformação permanente após a retirada da carga (descarregado);

σ_p : Limite de proporcionalidade: máxima tensão acima da qual o material não mais obedece à lei de Hooke, ou seja, perde a linearidade na relação tensão-deformação. O limite de elasticidade pode ser igualado ao limite de proporcionalidade para efeitos práticos.

O *módulo de elasticidade* fornece uma indicação da rigidez do material e depende fundamentalmente das forças de ligação interatômicas, o que explica seu comportamento inversamente proporcional à temperatura.

É determinada pelo quociente da tensão convencional ou alongamento específico na região linear do diagrama tensão-deformação, conforme a Fig. 3.5, e é dado por:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{Fl_0}{S_0(l - l_0)} \dots\dots\dots(3.5)$$

Onde:

E : Módulo de elasticidade (Pa).

Quanto maior o módulo de elasticidade, menor a deformação elástica resultante de uma determinada carga, conforme mostra esquematicamente a Fig. 3.6. O módulo de elasticidade (E) do aço é cerca de três vezes maior que o correspondente para

ligas de alumínio, ou seja, esta *diferença é importante e deve ser considerada na emenda de aço com o alumínio estudada neste trabalho, uma vez que sendo submetida aos mesmos esforços, a reação dos componentes (alumínio e aço) é bastante diferente.*

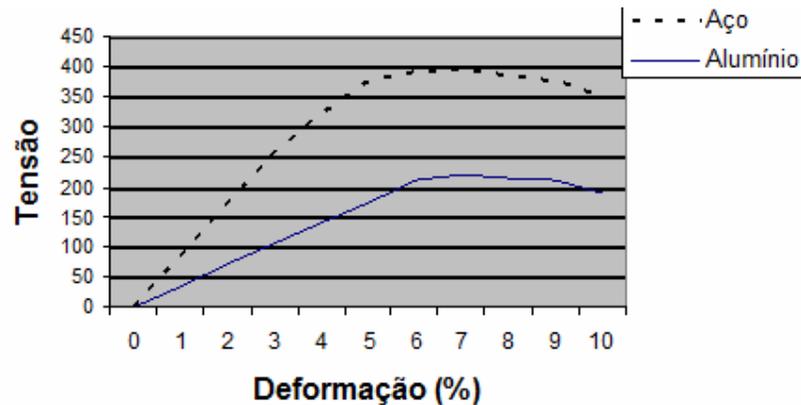


Fig. 3.6 Diagrama tensão-deformação esquemático para o alumínio e o aço.

O escoamento é um fenômeno localizado, caracterizado por um aumento relativamente grande na deformação, devido a uma pequena variação na tensão. A principal tensão definida na região de escoamento é o limite de escoamento, que é a máxima tensão atingida na região de escoamento.

O escoamento pode ser bastante nítido, como apresentado na curva tensão-deformação da Fig. 3.6, ou pode ser imperceptível. Para os casos de escoamento imperceptível, convencionou-se adotar uma deformação-padrão que corresponda ao limite de escoamento, conhecida como limite n de escoamento (σ_c). Por exemplo, o procedimento para se determinar o limite de escoamento para o caso de $n = 0,2\%$ [ASTM Standard E8-69] é:

1. Obter uma curva tensão-deformação de engenharia por meio de tração;
2. Construir uma linha paralela à região elástica da curva, partindo de uma deformação de 0,002 ou 0,2%.
3. Definir σ_c na interseção da reta paralela com a curva tensão-deformação, conforme se pode observar na Fig. 3.7.

O valor de n pode assumir diversos valores em função do campo plástico do material, por exemplo:

-metais e ligas em geral: $n = 0,2\%$ ($\varepsilon = 0,002$)

-cobre e suas ligas: $n = 0,5\%$ ($\varepsilon = 0,005$)

A determinação de n é indicada esquematicamente na Fig. 3.7, onde foi traçada uma perpendicular ao eixo de deformações a partir da deformação especificada, até atingir a curva tensão-deformação (ponto A). Em alguns casos, há dificuldade e imprecisão porque a curva tensão-deformação não apresenta a região linear (região elástica) bem-definida, o que torna impreciso o traçado de uma linha paralela para a determinação do limite n de escoamento.

A partir do ponto (B) da curva da Fig.3.5, o material entra na região plástica, que é caracterizada pela presença de deformações permanentes no corpo-de-prova. Para materiais de alta capacidade de deformação, o diagrama tensão-deformação apresenta variações relativamente pequenas na tensão, acompanhadas de grandes variações na deformação. Nessa região, pode-se determinar uma série de características do material ensaiado, tais como:

a) Limite de resistência à tração: tensão correspondente ao ponto de máxima carga atingida durante o ensaio, igual à carga máxima dividida pela área inicial do corpo-de-prova. Após o ponto **B**, tem início a fase de ruptura, caracterizada por uma rápida redução local da seção de fratura (fenômeno de estrição).

b) Limite de ruptura: última tensão suportada pelo material antes da fratura.

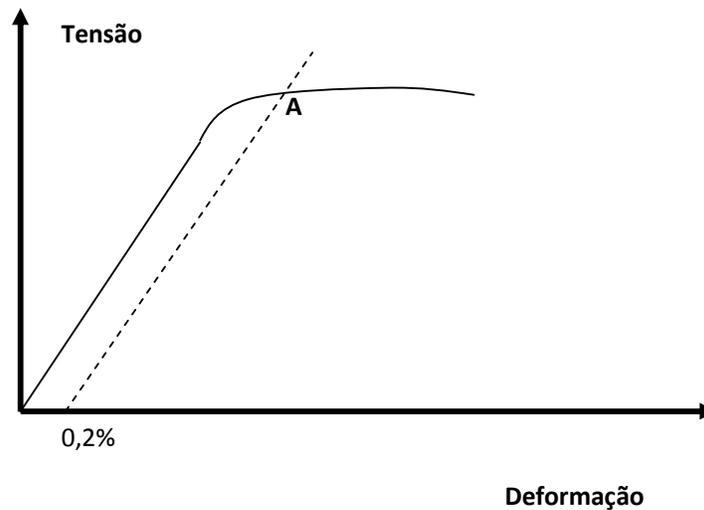


Fig. 3.7 Diagrama tensão-deformação com σ_c para deformação = 0,2%

A necessidade de aumentar a tensão para continuar a deformação plástica do material decorre de um fenômeno denominado *encruamento* na região de escoamento, onde o material sofre deformações permanentes e ocorre endurecimento por deformação a frio.

Esse fenômeno resulta da interação entre discordâncias e suas interações com outros obstáculos, como solutos, contornos de grãos, etc., que impedem a livre movimentação das discordâncias. É preciso uma energia cada vez maior para que ocorra essa movimentação, e, conseqüentemente deformação plástica, até o limite onde a fratura tem início.

A *tenacidade* é a capacidade do material em absorver energia até a fratura e é representada quantitativamente pelo módulo de tenacidade, que é a energia absorvida por unidade de volume, desde o início do ensaio de tração até a fratura. Uma maneira de avaliar a tenacidade do material é considerar a área total sob a curva tensão-deformação; quanto maior a área abaixo da curva, maior a tenacidade.

3.5 Ensaio

Os ensaios em cabos de energia podem ser classificados em ensaios de desenvolvimento, ensaios de tipos, ensaios de recebimento, ensaios de controle, ensaios durante e após a instalação.

3.5.1 Ensaio de desenvolvimento

A taxa de falha ou o ciclo de vida de um cabo segue a tendência onde grande número de falhas ocorre no período inicial da operação, se estabiliza após certo tempo e depois cresce próximo do término da vida útil.

O objetivo principal da simulação das condições de uso é de detectar, ainda no estágio de desenvolvimento, falhas que ocorrerão no produto durante o período inicial de operação.

3.5.2 Ensaio de tipo

Tem o objetivo de demonstrar o comportamento satisfatório do projeto do cabo para atender uma demanda prevista.

3.5.3 Ensaio de recebimento

Os ensaios de recebimento são constituídos pelos ensaios de rotina e especiais (conformidade) realizados para cada ordem de compra, verifica a qualidade de uma determinada produção de um projeto previamente homologado pelos ensaios de tipo. Os ensaios especiais são realizados para ordens de compra com dimensões de volume ou valor significativas.

3.5.4 Ensaios de controle

Realizados pelo fabricante na matéria prima, produtos semi-acabados, na produção do cabo para assegurar os requisitos de projeto e conformidade das normas de fabricação.

3.5.5 Ensaios durante e após a instalação

Feitos para demonstrar a integridade dos cabos e acessórios (emendas e terminais) durante e após a instalação.



Fig.3.8 Bancada de Ensaios em cabos de Alta tensão.

Os ensaios de corrente contínua aplicados a cabos com isolamento extrudada, principalmente em instalações antigas, podem causar seu envelhecimento precoce ou danos permanentes.

3.5.6 Relação de ensaios

De acordo com as Normas Brasileiras de instalação de cabos de controle e de potência de até 20/35 kV os ensaios são os seguintes:

Resistência elétrica, tensão elétrica ou “screening”, resistência de isolamento a temperatura ambiente, resistência de isolamento na temperatura de operação, descargas parciais, ensaios de dobramento, fator de perdas em função do gradiente elétrico, fator de perdas em função da temperatura, ciclos térmicos, tensão elétrica de impulso, tensão elétrica de longa duração, envelhecimento do cabo completo, resistência à chama, aderência da blindagem semicondutora da isolação, ensaios físicos nos componentes do cabo, penetração longitudinal de água, centelhamento, queima vertical (fogueira), índice de oxigênio, verificação dimensional.

Todos os ensaios para cabos devem ser realizados com normas adequadas para as emendas que os conectam.

3.5.7 Dimensionamento de emendas e Norma DIN 48085-3

Diversos fabricantes nacionais e internacionais foram consultados, para saber os parâmetros e metodologia de dimensionamento das emendas. Dois deles (SAE-Towers e SADEL) informaram ser processo mais empírico que teórico, sendo observado:

- a) a única solicitação (carga) considerada é a de tração;

- b) as dimensões das luvas, devem garantir a resistência mecânica e manter a resistividade elétrica abaixo da do cabo condutor.

A Norma DIN 48085-3 é aplicada em linhas de cabos de alumínio com alma de aço (ACSR) diretamente a emendas prensadas com luvas de alumínio e aço e é interessante verificar a precisão das dimensões previstas nesta norma com as dimensões de fabricantes, indicando se ela foi usada como referência técnica para dimensionamento das emendas.

3.5.8 Normatização do Ensaio de Tração e Informações Adicionais

A norma técnica utilizada no Brasil para materiais metálicos é a NBR-6152, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. A norma internacional sobre ensaios de tração é a ASTM E-8/69.

Embora o Sistema Internacional de Unidades seja o oficialmente adotado no país, a grande maioria das máquinas de ensaio de tração convencional em operação utiliza o kgf como unidade de carga. Nos textos de língua inglesa, também é bastante comum a utilização da libra como unidade de carga e do psi como carga de tensão. Assim sendo, é conveniente ter as relações de conversões entre estas unidades de medida para que se possam fazer comparações quantitativas, conforme se segue:

$$1 \text{ kgf} = 0,454 \text{ lb} = 9,807 \text{ N}$$

$$1 \text{ kgf} / \text{mm}^2 = 1422,27 \text{ psi} = 9,807 \text{ MPa} = 9,807 \text{ N} / \text{mm}^2$$

A temperatura pode influenciar significativamente nas propriedades mecânicas levantadas pelo ensaio de tração. Em geral, a resistência mecânica diminui e a ductilidade aumenta conforme o aumento da temperatura do ensaio, o teor de soluto da liga também influencia os valores das propriedades levantadas no ensaio de tração.

A deformação elástica é homogênea, envolvendo somente um deslocamento de átomos pequenos e reversível, porém a deformação plástica é não-homogênea e

envolve deslocamentos grandes e irreversíveis. A deformação elástica pode ser interpretada em termos de estruturas perfeitas, ao passo que a deformação plástica está relacionada com o movimento de discordâncias. A deformação plástica geralmente ocorre por meio de um mecanismo de escorregamento no qual os planos atômicos mais densamente compactados se movem uns sobre os outros. Para um determinado conjunto de planos densamente compactados e de direções, o escorregamento ocorre nos planos onde a tensão de cisalhamento é máxima, o que corresponde a uma direção a 45° do eixo de aplicação da tensão de tração.

A fratura é a separação ou fragmentação de um corpo sólido em duas ou mais partes, sob a ação de uma tensão, e pode ser considerada como sendo constituída de duas partes – nucleação da trinca e coalescimento (propagação) da trinca. A fratura pode ser classificada em duas categorias gerais: fratura frágil e fratura dúctil. A fratura dúctil é caracterizada pela ocorrência de uma apreciável deformação plástica antes e durante a propagação da trinca. A fratura frágil nos metais é caracterizada pela rápida propagação da trinca, com nenhuma deformação macroscópica e muito pouca micro deformação.

A porcentagem de carbono nos aços e, conseqüentemente, a variação de micro constituintes presentes na microestrutura têm influência significativa sobre propriedades mecânicas tais como a resistência à tração e o alongamento. Para todos os materiais, em particular para os metais, as principais variáveis externas que afetam o comportamento durante a deformação e, conseqüentemente, as características da fratura, são temperatura, presença de entalhes favorecendo a formação de uma região de concentração de tensão, triaxialidade de tensões e altas taxas de deformação, além da agressividade do meio ambiente.

3.6 Planejamento dos ensaios de determinação da ruptura de emendas à compressão

3.6.1 Introdução

A seqüência de ensaios no planejamento teve como objetivo estabelecer critérios de aceitação das emendas prensadas com não conformidade (deformadas) em relação ao deslocamento axial com flecha. Para esta finalidade são analisados os modos de ruptura das emendas prensadas, com a determinação da carga de ruptura das emendas, utilizando-se de testes de tração em corpos de prova fornecidos por diversos fabricantes. É avaliada a contribuição relativa dos componentes da emenda na resistência da peça como um todo, bem como, feita a caracterização das propriedades dos materiais após os ensaios

3.6.2 Questões Relevantes nos Ensaios

Os ensaios devem responder a algumas questões de grande interesse na área de emendas à compressão, destacando-se:

- 1) como se dá o processo de ruptura da emenda—quando e como ocorre o rompimento e/ou simples escorregamento da luva?
- 2) qual a contribuição de cada componente (luva de aço, luva de alumínio, cabos) na resistência da emenda como um todo?
- 3) após a ruptura, ocorre degradação das propriedades mecânicas dos materiais?

4) caso as emendas sejam produzidas com deslocamento axial com flecha (empenamento e deformação), qual seria a tolerância de deflexão aceitável, sem comprometimento da resistência mecânica?

Para as questões serem respondidas, as emendas prensadas serão submetidas a ensaios de tração até a ruptura em duas condições:

a) emendas retilíneas completas, com luva de aço e alumínio;

b) emendas completas empenadas.

Além dos resultados, incluindo o da carga de ruptura e seu devido tratamento estatístico, em cada caso será feita a caracterização das propriedades mecânicas do material das emendas.

3.6.3 Planejamento anterior aos Ensaios

Os procedimentos planejados foram:

a) Ensaios na Emendas Completas com Luva de Alumínio. Neste caso planejaram-se ensaios para as seguintes condições:

a.1) Amostras retilíneas;

a.2) Amostras deformadas, sendo a deformação na luva de aço ou de alumínio, ou ambas.

3.6.4 Planejamento Pós-Realização dos Ensaios

O conjunto dos resultados dos ensaios foi objeto de análise estrutural, fundamentada em modelos de ruptura das peças e análise estatística de resultados da carga de ruptura.

As variáveis que observadas e com análise estrutural e estatísticas incluíram:

- Tensão de Escoamento do aço da luva;
- Tensão de Ruptura do aço da luva;
- Tensão de Escoamento do alumínio da luva;
- Tensão de Ruptura do alumínio da luva;
- Tensão de Escoamento do núcleo de aço do cabo ;
- Tensão de Ruptura do núcleo de aço do cabo;
- Tensão de Escoamento dos cabos condutores de alumínio;
- Tensão de Ruptura do alumínio dos cabos condutores .

A variabilidade dos resultados dos ensaios apresentados no capítulo de resultados (capítulo 4) permitiu concluir a adequação do tamanho da amostra ou iria determinar a necessidade de novo ciclo de ensaios e novas amostras para garantir a confiabilidade das conclusões. Depois de completados os ensaios em cada caso,

foram pesquisadas as possíveis causas crônicas (métodos de operação) ou causas esporádicas (erro na prensagem com emenda deformada por erro na execução da emenda) que explicassem a variabilidade dos resultados.

3.7 Plano de amostragem dos ensaios de ruptura

3.7.1 Introdução

O procedimento de amostragem seguirá os fundamentos científicos para fins de pesquisa³¹. As amostras das luvas de aços e demais componentes das emendas deverão ser colhidas pelo pessoal da empresa fabricante nos lotes de produção.

As amostras dos componentes e da luva completa serão caracterizadas sob inspeção visual, documentação fotográfica e verificação das dimensões geométricas. A liberação para a fase de testes exigirá a conformidade com os padrões de projeto da empresa fabricante e critérios de aceitação correntes de empresa concessionária.

3.7.2 Metodologia de Determinação dos Tamanhos dos Lotes (N)

A determinação do tamanho do lote seguiu os procedimentos estatísticos padrões³², sendo determinado em função de três parâmetros:

³¹ Conforme descrito em obras da literatura técnica (Thompson, 2002; Leite, 2005; Silva, 2002), além dos procedimentos normatizados (ABNT, 1985).

³² Ver Moretin (2004)

- a) Nível de confiança (NC),
- b) Erro de amostragem tolerável (ε),
- c) Desvio-Padrão das Cargas de Ruptura (σ).

O nível de confiança fixado em 95% (NC=95%), o que determina a variável reduzida $Z = 1,96$ (admitindo que a carga de ruptura das emendas siga a Distribuição Gaussiana de Probabilidades, hipótese esta a ser confirmada ou rejeitada com os resultados dos ensaios)..

Assumindo certo limite para o erro tolerável, determina-se o tamanho da amostra (N) da seguinte forma:

$$N = \left(\frac{Z\sigma}{\varepsilon}\right)^2 \dots\dots\dots(3.6)$$

Segue um exemplo ilustrativo. Supor que os resultados de ensaios de um fabricante (carga de ruptura, em kgf) tenham sido os valores da Tabela 3.1.

Assumindo um erro tolerável igual a 4% (o que forneceria erro = 460 kgf) e um nível de confiança NC = 95% ($Z=1,96$), teríamos as seguintes necessidades: Fabricante

$$F1: N = \left(\frac{Z\sigma}{\varepsilon}\right)^2 = \left(\frac{1,96 \cdot 553,12}{460}\right)^2 = 5,6 \text{ amostras.}$$

Tabela 3.1 - Resultados de Ensaio: Carga de Ruptura de Emendas de Fabricante

Nº do Ensaio	Fabricante F1
1	11.575
2	11.610
3	11.450
4	10.300
5	11.481
6	11.098
7	10.410
8	11.679
9	11.970
10	11.624

Obs. Valor Médio (Kgf) 11.319,7 ; Desvio-Padrão (Kgf) : 553,13

3.7.2.1 Fixação do N° de Amostras

Para ganhar confiabilidade estatística e fundamentação científica consistente para a formulação das conclusões da pesquisa, os seguintes tamanhos de amostras foram fixados:

a) Ensaio nas Emendas Completas com Luva de Alumínio

Neste caso planejam-se os ensaios para as seguintes condições:

a1) Amostras retilíneas

N = 5 amostras + 1 reserva,

a2) Amostras deformadas, sendo a deformação na luva de aço e alumínio

N = 5 amostras + 1 reserva.

3.8 Análise Estatística dos resultados

Uma vez fixado um tamanho de amostra, faz-se necessário proceder ao tratamento estatístico das variáveis de interesse no ensaio de tração, o que exige procedimentos técnicos específicos. Neste contexto apresenta-se a fundamentação teórica necessária para que possam se aplicar tais técnicas e obter as conclusões desejadas.

3.8.1 Planejamento do Tratamento Estatístico dos Resultados

Serão feitos testes em Laboratório em cinco amostras de emendas. Considerando-se pequenas amostras, e desvio padrão populacional desconhecido, trabalha-se com Distribuição t de Student. Neste caso, será feita uma amostra piloto para fornecer um desvio padrão amostral inicial. A partir desse valor, e com a fixação de um nível de confiança (por exemplo, 95%) associado a uma precisão (erro admissível) chega-se ao tamanho da amostra necessária para validação do cálculo do intervalo de confiança da média, que, se menor que a amostra piloto, já será adotada como suficiente. Caso contrário, uma amostra adicional maior será avaliada.

Além do cálculo dos Intervalos de Confiança da média, em um primeiro momento, poder-se-ia pensar em uma análise de variância. Entretanto, a razão pela qual o quadro de análise de variância não detecta a diferença entre as médias é que, embora possa não existir uma grande diferença entre as médias das amostras retilíneas e das empenadas, em geral ocorre uma grande diferença entre os valores dentro de cada amostra. Essa grande variação dentro de cada amostra pode muito bem ser devida à influência de um fator estranho, diferente daquele que se quer investigar, mas que quando presente dificulta a análise dos dados. Nesse caso, considera-se como possível fator de influência a origem do material (fabricante ou lote), como é o caso em questão.³³

³³ Estudos adicionais de amostragem e ensaios pode ser feitos em Leite(2005), Komarovsky (2003).

3.9 Conclusões do capítulo

Nos estudos desenvolvidos foram identificados os principais pontos necessários para considerar no dimensionamento de emendas a compressão. Foi dada ênfase em dois pontos:

- a) um aspecto operacional, relacionado à fadiga da conexão;
- b) um aspecto construtivo relacionado a defeitos de execução e montagem.

Além disso, a ABNT apresenta a NBR-7095 (“Ferragens Eletrotécnicas para Linhas de Transmissão e Subestações de Alta tensão e Extra Alta Tensão”) que descreve de forma superficial e pouco desenvolvida as regras e diretrizes para o desenvolvimento de Emendas de Cabos Condutores para Linhas de Transmissão. O assunto deve ser discutido com maior profundidade, de maneira a satisfazer as necessidades técnicas para a definição das emendas mencionadas, no âmbito da ABNT.

A simulação de elementos mostrou a concentração de tensão na região de encontro do cabo com a luva e na região em que as extremidades dos cabos de aço se encontram. A necessidade de atenção ao dimensionamento dessas regiões deve ser considerada no projeto, desenvolvimento e implantação destas emendas.

O projeto deve considerar os critérios definidos no dimensionamento da emenda e estabelecer os limites dos defeitos de fabricação e as decisões de limites de não conformidade aceitáveis em campo. Dessa forma é possível proceder ao desenvolvimento de uma metodologia de dimensionamento de emendas de compressão

Outra não conformidade a ser considerada é a descentralização da luva de alumínio colocada sobre o cabo. A corrente elétrica precisa de um comprimento de pelo menos 5 vezes o diâmetro do cabo para garantir densidade homogênea na condução de corrente. Caso isto não ocorra haverá falha da emenda.

Este capítulo demonstrou a viabilidade em termos dos ensaios laboratoriais planejados, uma vez que foram superadas as dificuldades de implementação da instrumentação, essenciais para a continuidade da pesquisa e também o número factível de amostras obtido no planejamento estatístico dos ensaios para obtenção dos resultados mais conclusivos.

Os ensaios planejados buscaram encontrar soluções para os eventos de falhas em redes de transmissão causados por emendas à compressão e os resultados obtidos são mostrados adiante.

4. Resultados

Este capítulo procura mostrar os resultados obtidos nas iniciativas executadas no trabalho de pesquisa de não conformidades em emendas à compressão de linhas aéreas de transmissão. Os principais resultados mostrados e comentados são a análise de elementos finitos, a pesquisa com fabricantes e concessionárias usuárias de conexões à compressão, pesquisa sobre fiscalização de implantação de linhas de transmissão, pesquisa sobre normas, microscopia óptica de conexões à compressão após ensaios, análise de conexão com descentralização da luva de alumínio, ensaios de ruptura e análise estatística dos resultados de ruptura.

4.1 Resultados da análise de simulações com elementos finitos

Na simulação de elementos finitos observou-se a concentração de tensão na região de encontro do cabo com a luva e na região em que as extremidades dos cabos de aço se encontram. Isso enfatiza a necessidade de atenção ao dimensionamento dessas regiões. As figuras 4.1 a 4.3 mostram um diagrama de tensão máxima atuante em uma conexão e detalhes das regiões com concentração de tensão. Na escala do diagrama, a cor vermelha indica tensão próxima de zero enquanto a cor azul indica a tensão máxima obtida. A paleta de cores segue as cores do espectro visível, com a transição indo das cores quentes (do vermelho) para as frias (até o azul, passando pela cor verde logo antes da azul, então a cor verde é pouco inferior a máxima tensão).

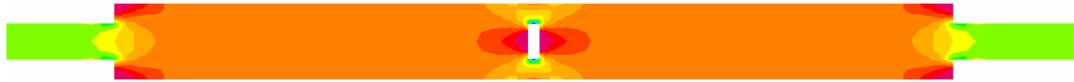


Fig. 4.1 Estado de Tensão na Região da Luva de Aço [modelada fundida sem possibilidade de escorregamento (SAP2000)]



Fig. 4.2 Detalhe do Estado de Tensão na Região da extremidade esquerda da Luva de Aço

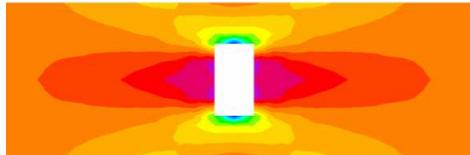


Fig. 4.3 Detalhes do Estado de Tensão na Região central do da Luva de Aço

Uma distribuição de tensões esquemática da junta, obtida via elementos finitos, com dados não representativos é apresentada na seqüência para ilustrar o gradiente de tensões na parede da junta de alumínio.

Devido ao processo de montagem com deslocamento e flecha (empenamento), o lado inferior trabalha sob tração, favorecendo aumento da probabilidade de ocorrência de ruptura devido ao aumento da tensão mecânica nos terminais da emenda. O aumento da densidade de material no lado comprimido pode provocar uma diminuição da resistência elétrica deste lado e uma distribuição de corrente não homogênea na secção reta da emenda. Este aumento da corrente no lado que

apresenta compressão irá provocar maior perda de potência nesta parte (efeito Joule) sem área suficiente para dissipação e poderá haver aumento de temperatura nesta região com aumento ainda maior na probabilidade de ruptura.

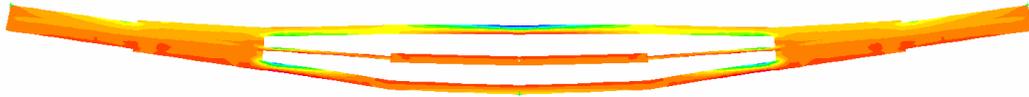


Fig. 4.4 Estado de tensão esquemático em emenda desalinhada com deslocamento e flecha (a parede da luva de alumínio apresenta um gradiente de tensão com variação de cores do vermelho para o azul)

Em um caso mais crítico, uma falha na prensagem pode formar um vinco na emenda. Isso implica em um efeito de tensões de plastificação localizados, os quais podem fragilizar a emenda. O projeto da emenda deve, também, apresentar os limites aceitáveis para esse tipo de falha.

4.2 Resultados da Pesquisa de campo com empresas de transmissão

Após a organização e realização da pesquisa (citada anteriormente no capítulo 4) com agentes do setor de transmissão, as respostas obtidas foram sistematizadas revelando que:

- a) A ocorrência de empenamento na execução de emendas a compressão (luva de aço e/ou alumínio), com os diversos tipos de cabos, é uma prática comum constatada na maioria das empresas pesquisadas;

b) Nas empresas que fazem correção do empenamento, o método de correção do empenamento para a luva de aço, inclui o impacto (bater) com madeira ou o uso de prensa;

c) Não existe uma definição da tolerância máxima admissível para o empenamento nas diversas empresas pesquisadas;

d) A maioria das empresas pesquisadas não relatou qualquer ocorrência de rompimento de emendas.

e) Houve um registro (CPFL) em que ocorreu o aquecimento da emenda em razão de seu processo de execução, o que provocou a sua pronta substituição;

f) O procedimento de controle da qualidade da execução inclui acompanhamento e fiscalização em todas as prensagens (3 das 6 empresas); aceitação visual sem acompanhamento (2 das 6 empresas) e acompanhamento por amostragem (3 das 6 empresas);

g) Não fica evidente a relação entre nível de tensão e preferência por um tipo de emenda, sendo freqüentes as situações em que uma mesma empresa trabalha com os dois tipos de emendas (compressão e pré-formada) para linhas com o mesmo nível de tensão.

h) Nenhuma empresa dentre as pesquisadas trabalha com emendas implosivas.

Da comparação com experiência de pesquisas internacionais sobre o tema, é interessante notar as preocupações relatadas por outros centros de pesquisa do exterior, destacando-se o Electric Power Research Institute (EPRI-EUA) [4] que apresenta os testes atualmente disponíveis para determinar as condições de

emendas a fim de estabelecer sua qualidade e aptidão para um desempenho confiável e contínuo, especialmente quando um aumento da carga elétrica é esperado.

A execução de emendas com empenamento poderia, a princípio, ser considerada uma não conformidade. Não obstante, com a introdução do critério de empenamento máximo a ser definido como produto desta pesquisa, deverão ser consideradas não-conformidades apenas aquelas emendas com empenamento maior que o máximo aceitável. Tal condição deverá ser introduzida no Manual de Fiscalização da ANEEL, visando padronização dos procedimentos e a possibilidade de ganhos de produtividade na construção das linhas.

Com base na literatura pesquisada e no levantamento de informações sobre a prática de execução de emendas entre as empresas transmissoras nacionais (pesquisa com questionário padrão), verifica-se que a taxa de falhas de emendas a compressão é baixa, evidenciando o sucesso dessa tecnologia para linhas de transmissão. É claro que essa baixa taxa de falha provém de cuidados especiais durante o processo construtivo, bem como, o estudo quanto à locação das emendas nas linhas, a serem observados no lançamento dos cabos.

As visitas e questionário enviados a empresas fabricantes de emendas revelaram a necessidade de observância estrita aos procedimentos de execução, compatibilizando os padrões da prensa /matriz, ferramentas e luvas, preferencialmente de um mesmo fabricante.

4.3 Resultados dos Estudos de fiscalização de transmissão

As equipes de fiscalização de linhas de transmissão buscam estabelecer critérios de fiscalização e avaliação de desempenho das firmas empreiteiras das diversas obras

e serviços. A fiscalização busca garantir que os serviços e obras serão executados de acordo com as normas técnicas, com alta qualidade e custo otimizado. A fiscalização também busca estabelecer critérios bem definidos e objetivos de análise do desempenho técnico-administrativo da firma empreiteira, pois isto traz otimização do planejamento dos serviços e obras, minimização de custos, maior agilidade de implantação e aumento da qualidade dos serviços, estabelecimento do perfil de cada firma empreiteira, melhor treinamento técnico dos prestadores de serviços, aplicação de boas técnicas de engenharia de segurança e medicina do trabalho e minimização dos impactos ambientais.

O manual da ANEEL busca estabelecer a sistemática referente às atividades e rotinas envolvidas na fiscalização da prestação de serviço adequado e do desempenho dos equipamentos e sistemas, bem como a identificação dos fatores e pontos que estão prejudicando ou possam vir a prejudicar a qualidade dos serviços, das instalações.

Os formulários visam o fornecimento de parâmetros e características que são normalmente usados na prática por algumas companhias energéticas, de forma a estabelecer subsídios para o aprimoramento da fiscalização de serviços e obras executados por firmas empreiteiras na área de linhas de transmissão. Isto pode trazer o benefício de aprimoramento dos serviços prestados, além de uma maneira mais simples de qualificação da firma empreiteira e as comparações relativas.

O Manual de Fiscalização de Linhas de Transmissão é usado como um guia para as firmas empreiteiras evitarem situações de litígio, buscando atingir as metas e objetivos determinados pelos contratos, com as empresas contratantes e contratadas, minimizando os custos, os tempos de execução dos serviços e as falhas nos serviços de construção de Linhas de Transmissão.

4.4 Resultados dos Estudos das práticas de conexões em transmissão

A análise do material bibliográfico permitiu concluir:

- a) é muito escassa a literatura nacional existente sobre o tema “emendas de linhas de transmissão” especialmente considerando as emendas a compressão em linhas aéreas;
- b) as normas técnicas nacionais tratam o assunto de maneira muito geral, incluído no tema “ferragens”;
- c) há ausência quase que total sobre critérios de dimensionamento e de segurança das emendas, seja nas normas quanto nas especificações e informações dos fabricantes;
- d) o empenamento das emendas é relatado como um problema comum a outras empresas pesquisadas, em nível nacional e internacional, porém com ausência de critérios claros sobre critérios de aceitação das emendas empenadas seja por parte dos fabricantes como na literatura técnica.

Diante das constatações que decorrem da análise da literatura técnico-científica pesquisa, propõe-se:

- a) *A oportunidade de aprimoramento da norma técnica NBR-7095/1981* (“Ferragens Eletrotécnicas para Linhas de Transmissão e Subestações de Alta tensão e Extra Alta Tensão”) no que se refere às emendas, principalmente considerando os resultados deste projeto de doutorado;

b) A oportunidade de *uma publicação com finalidade de divulgação técnico-científica, de forma didática, reunindo as principais informações técnicas sobre emendas a compressão.*

A análise das considerações sobre critérios empregados em linhas de transmissão permitiu a revisão dos procedimentos executivos de emendas seja a partir das práticas existentes, bem como das recomendações de entidades de referências internacionais na área de transmissão de energia elétrica. Reconhece-se uma grande proximidade nos procedimentos em relação ao que é preconizado pelas duas referências técnicas mais importantes na área de construção de linhas aéreas de transmissão.

É importante destacar a necessidade da definição de critérios bem fundamentados, inclusive considerando as tendências atuais de maiores níveis de EDS (Every Day Stress) na implantação de novas linhas de transmissão ou na re-potenciação de antigas linhas existentes no país, liderado pelo subgrupo CE-22 do Cigré Brasil (Comportamentos Mecânicos). Fica evidente a necessidade de desenvolvimento de novos testes laboratoriais para a obtenção de subsídios científicos que trarão suporte técnico às decisões de implantar novos níveis de serviço das linhas, para minimização de custos de implantação e operacionais, sem que haja comprometimento da segurança.

Recentemente registram-se casos na engenharia de transmissão na Rússia em que a evolução é na direção da instalação de cabos com EDS de até 50% adicionais³⁴, em alguns trechos. A justificativa é que a economia gerada será maior do que os custos para a troca de cabos em um prazo menor do que o esperado, quando os níveis de EDS são menores 20%. A adoção de níveis de trações de cabos elétricos de linhas e emendas de transmissão maiores que os convencionais poderá trazer uma economia estimada pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), em torno de 30 milhões de reais no próximo leilão das linhas de transmissão para o Norte do Brasil. A EPE prevê desafios aos engenheiros brasileiros no projeto e implantação

³⁴ Ver Hardy (1998)

da Linha de transmissão amazônica. Na discussão e busca de novas tecnologias e novas soluções de engenharia de projeto, surge também a questão do auto-amortecimento, com efeito sobre a resistência em fadiga dos cabos elétricos das linhas de transmissão, e ainda o problema de fadiga na junção cabo – grampo, que é muito localizado e envolve diversos outros fenômenos altamente não lineares, como a fadiga por alongamento e contração (“fretting”), plasticidade, fluência (creep) e outros mais.

Experiências desenvolvidas em laboratórios nacionais têm mostrado que um possível aumento da EDS (Every Day Stress) pode indicar uma queda no auto-amortecimento dos cabos elétricos (principalmente a partir de determinado nível de frequência de excitação eólica). Entretanto a elevação da EDS favorece a iniciação de trincas e sua posterior propagação e o aumento da EDS aumenta a carga de contato entre os fios dentro do grampo e emendas, gerando tensões compressivas, o que é bom para a transmissividade, mas também pode provocar esmagamentos, o que é ruim. Assim, se ganha por um lado mas perde-se pelo outro e não há estudos quantitativos de qual desses efeitos é dominante, evidenciado a necessidade de pesquisas sobre este tema.

4.5 Resultados das microscopias das emendas montadas

A microscopia ótica foi feita nas emendas e interfaces com o cabo ACSR da fabricante SADE após ensaio de tração com ruptura anormal devido a deslocamento com flecha superior a 3%. A microscopia foi realizada no Labdin da Unicamp em Outubro 2010. As imagens obtidas com estas amostras são mostradas nas figuras adiante da 4.5 até 4.16.

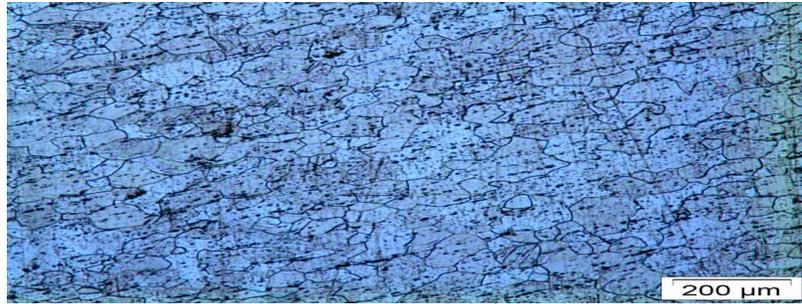


Fig. 4.5 Microscopia óptica - luva de alumínio, corte longitudinal, aumento 50 x

Na Fig. 4.5 pode-se observar um grão médio de 50 micrometros e micro estrutura equiaxial segundo a norma ASTM (2003), ou seja, por contagem dos grãos na horizontal e na vertical um mesmo tamanho médio do grão e conseqüentemente uma micro estrutura equiaxial, Isto indica que não houve deformação longitudinal na luva de alumínio.



Fig. 4.6 Microscopia óptica luva de alumínio, corte transversal, aumento de 50 x;

Pode-se observar na Fig. 4.6, por contagem dos grãos na horizontal e na vertical um tamanho médio do grão de 135 micrometros e conseqüentemente uma micro estrutura equiaxial (ASTM E7 de 2003), sem estiramento transversal.

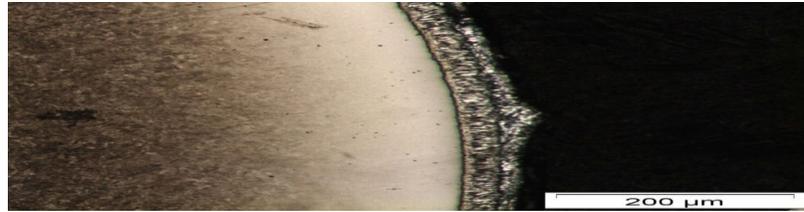


Fig. 4.7 Microscopia alma de aço, corte transversal, aumento de 100x, depósito superficial

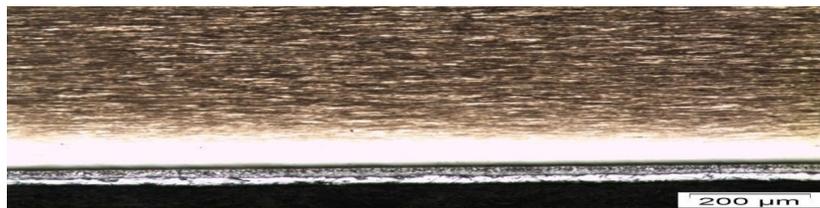


Fig. 4.8 Microscopia óptica da alma de aço com corte longitudinal e aumento de 50 x e depósito superficial

Nas Figs. 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 pode-se observar o depósito superficial de galvanização em duas camadas com espessura de 60 micrometros, onde uma espessura superior a 50 micrometros assegura uma vida útil da galvanização superior a 30 anos (ASM Vol. 5 pg. 826). Esta galvanização precisa ser feita para evitar a corrosão galvânica que ocorreria no contato aço / alumínio, este contato pode ser observado na Fig. 4.10.

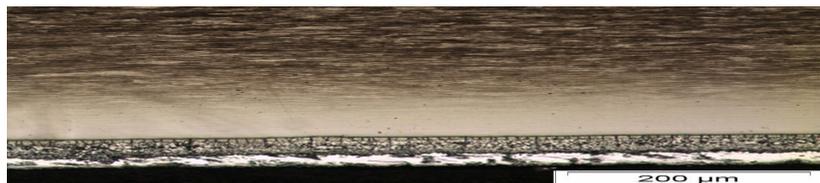


Fig. 4.9 Microscopia óptica da alma de aço com corte longitudinal e aumento de 100 x e depósito superficial

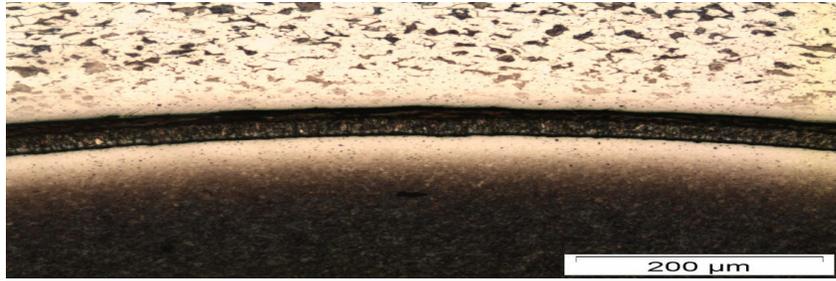


Fig. 4.10 Microscopia óptica da luva de aço e cabo de aço com corte transversal e aumento de 100 x, grãos com predominância ferrítico (claro) e perlítico (escuro)



Fig. 4.11 Microscopia óptica do cabo de aço com corte transversal, aumento de 200x e depósito superficial

Observam-se na Fig. 4.11 duas camadas de depósito superficial indicando galvanização com total de 60 micrometros de espessura.



Fig. 4.12 Microscopia óptica do cabo de aço, corte transversal, aumento de 50x, (onde a cor escura indica a presença de carbono e a clara a de alumínio)



Fig. 4.13 Microscopia óptica do cabo de aço com corte transversal e aumento de 100x (ferrítico perlítico, com este aumento maior consegue-se perceber que o aço é de baixo teor de carbono 1010 ou 1020)

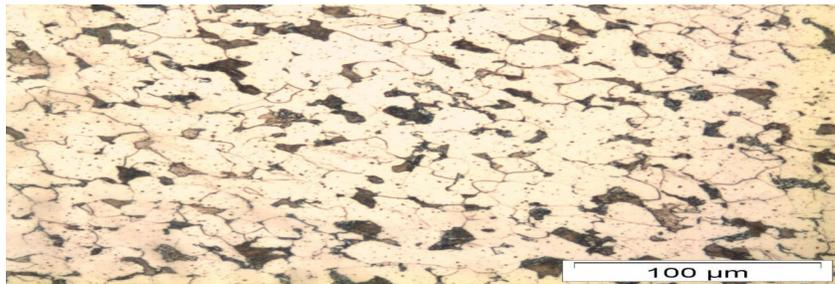


Fig. 4.14 Microscopia óptica do cabo de aço com corte transversal e aumento de 200x baixo teor de carbono – ferrítico predominante;

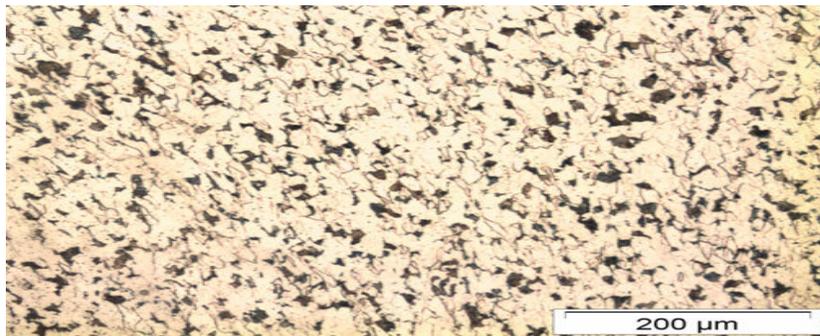


Fig. 4.15 Microscopia óptica da luva de aço com corte transversal e aumento de 100x

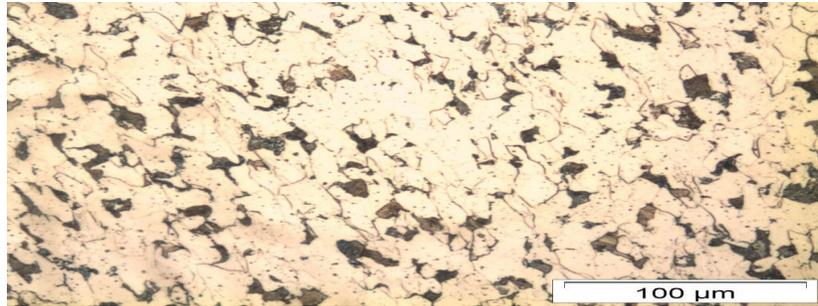


Fig. 4.16 Microscopia óptica da luva de aço com corte transversal e aumento de 200x ferrítico (claro), perlítico (escuro) aço de baixo carbono 1010 a 1020;

Na Fig. 4.14 já se consegue fazer uma boa contagem dos grãos na horizontal e na vertical e percebe-se que a média do tamanho do grão é de 16 micrometros em ambas as direções horizontal e vertical (considerando-se grãos de carbono e ferro indistintamente para efeitos de média) o que indica ser uma micro estrutura equiaxial – ASTM E7 de 2003

Na Fig. 4.16, o corte transversal da luva de aço mostra o tamanho médio do grão na vertical de 23,5 micrometros e na horizontal de 14 micrometros não sendo uma micro estrutura equiaxial – ASTM E7 de 2003, indicando que houve um estiramento na horizontal, ou uma compressão na vertical; como é a luva de aço com corte na transversal percebe-se que a diferença foi devida a compressão da luva de aço.

Em todas as amostras de aço foi feito ataque de Nital com tempos variáveis acima de 10 minutos até obter a melhor imagem micro gráfica sem estar oxidada. No Alumínio foi feito ataque de hidróxido de sódio com duração de 30 minutos

De acordo com a análise microscópica realizada os resultados estão dentro do padrão de normalidade esperado deste tipo de peça, ou seja, as emendas estão fabricadas dentro dos padrões metalográficos esperados, não sendo observada ou

detectada nenhuma anormalidade ou não conformidade de fabricação que pudesse ser detectada em análise microscópica visual tradicional como a que foi realizada.³⁵

Caso as análises fossem feitas em amostra sem esforço e rompimento, a maior diferença que seria esperado é ter as contagens dos grãos iguais no sentido horizontal e no sentido vertical, indicando a mesma concentração de grãos nos dois sentidos, sem estiramentos (ou com o mesmo estiramento nos dois eixos).

4.6 Resultados da análise de emendas com descentralização

A seguir é mostrado nas figuras da Fig.4.17 até Fig. 4.28, estudo sobre ocorrência de ruptura de emenda de compressão em campo e a análise da falha que causou a ocorrência. Um cabo de transmissão de energia elétrica foi interrompido devido ruptura em emenda e o registro fotográfico e as amostras para análise microscópica foram gentilmente cedidos por funcionários da concessionária para uso neste trabalho, com acordo de fazer isto sem citações de local de ocorrência e da empresa.

Nota-se pela Fig. 4.17 que, visualmente, não há nenhuma característica de não conformidade digna de nota, a não ser a poeira acumulada na conexão e no cabo, que pode aumentar a probabilidade de ocorrência de efeito corona e conseqüente ruptura.

³⁵ Estudos de microscopia básica e avançada podem ser feitos em Braunovic (2007), Callister (2007) e Clayton (2006).



Fig. 4.17 Cabo rompido em campo (emenda à compressão)

A Fig. 4.18 mostra a extensão de cabo de alumínio que estava dentro da luva de alumínio antes da ruptura do lado que esta ocorreu.



Fig. 4.18 Cabo rompido em campo (medida do cabo dentro da luva de alumínio)

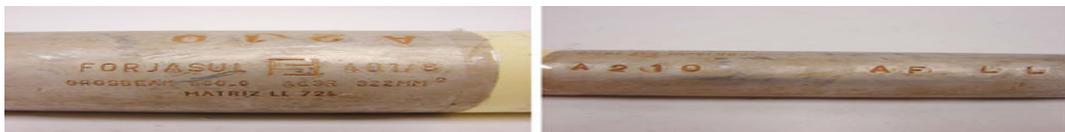


Fig. 4.19 Identificação na luva de alumínio (fabricante, matriz e rastreabilidade de montagem)



Fig. 4.20 Detalhe da emenda e fios no lado que ocorreu a ruptura

Na Fig. 4.20, pode-se observar tentos de aço rompidos próximo e longe da boca da emenda indicando que a alta temperatura estendeu-se até quase a vinte centímetros da boca.

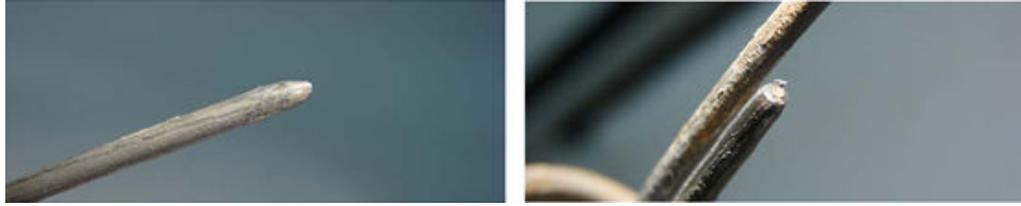


Fig. 4.21 Detalhes dos fios de aço rompidos mostrados também na fig. 4.20

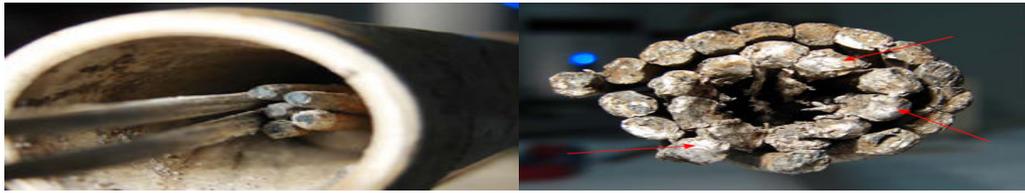


Fig.4.22 Detalhes dos a) fios de aço rompidos dentro da luva de alumínio e b) e tentos de alumínio rompidos (com setas mostrando possíveis fusões por alta temperatura localizadas)

Na Fig. 4.22 mostra-se ponto em que pode ter ocorrido a fusão do aço indicando a temperatura bastante elevada atingida na ocasião da ruptura.



Fig. 4.23 Corte da luva de alumínio para visualização e análise da qualidade



Fig. 4.24 Detalhe da extremidade não rompida e Corte da luva de alumínio



Fig. 4.25 Detalhe da extremidade rompida e Corte da luva de alumínio



Fig. 4.26 Extremidade rompida e dimensão do cabo de alumínio dentro da luva

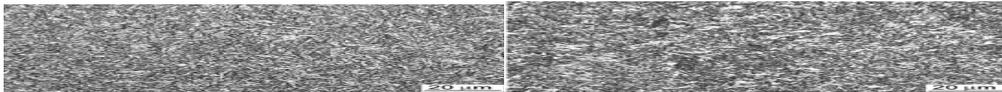


Fig. 4.27 Microscopia óptica a) fio de aço rompido longo e b) junção da emenda

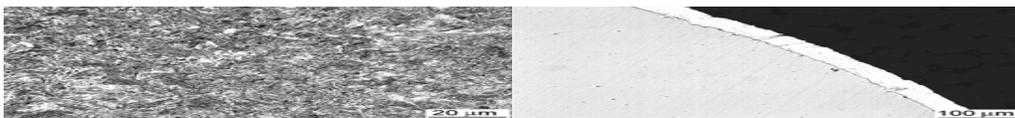


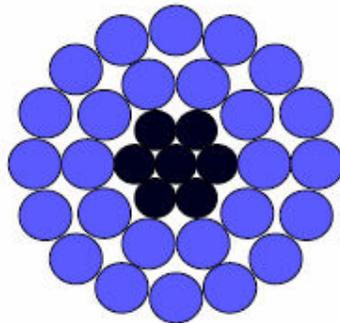
Fig. 4.28 Microscopia óptica dos fios de aço a) fio de aço sem ruptura b) fio de aço com depósito superficial

Neste caso observou-se uma elevação de temperatura demasiada devido à sobrecarga no trecho de cabo onde ocorreu a ruptura e, principalmente, devido à descentralização do cabo dentro da luva de alumínio, que não permitiu a regra

prática de comprimento de contacto superior a cinco vezes o diâmetro do cabo, o que fez ocorrer à ruptura por falta de dissipação.

4.7 Resultados dos ensaios de ruptura e medidas de temperatura

Dados de ensaio de ruptura e temperaturas com aumento da corrente 03 agosto de 2010 Burndy Emendas Sade (empenadas) e retilíneas Forjasul ASCR para cabo Drake.



Tamanho e tranças 795 kcmil , 26 x 7 ACSR Diâmetro externo 1,108 polegada
Tensão de ruptura 14,2882 kgf Massa específica 1,093 lb/ft.
Ampacidade (corrente admissível típica) 907 Amperes (condições de temperatura de 20 graus Celsius, insolação e brisa padrões no Estado de São Paulo)

Fig. 4. 29 Características básicas do cabo DRAKE

4.7.1 Medidas da Resistência elétrica e temperatura da emenda

Usando-se um nano voltímetro Keithley foram medidas as resistências da emenda com variação da corrente de operação (e conseqüente variação da temperatura dentro de laboratório fechado). Os resultados estão apresentados na Tabela 4.1, evidenciando um efeito não linear no comportamento da resistência em função da corrente. Isto indica que o aumento de corrente acima do especificado como padrão normal pode levar a um processo de avalanche e falha da emenda.

Tabela 4.1 Medidas da variação da resistência elétrica com a corrente e temperatura³⁶

Corrente (A)	Temperatura (C)	Resistência (micro Ohm)
0	20	58
265	27	70
610	56	77

4.7.2 Ensaios de Ruptura

Os ensaios foram feitos no laboratório da Burndy em São Paulo obtendo os seguintes resultados:

- a) Emendas retilíneas Forjasul novas Cabo Drake

É importante observar que a prensa usada só conseguia chegar à tensão de 16000 kgf; então a média é superior a 16000 kgf

³⁶ Para descrição detalhada do método de medidas precisas de resistência ver Keithley (2004)

Tabela 4.2 Ensaio de tensão de emendas retilíneas ACSR DRAKE Forjasul

Emenda	Tensão de ruptura (1000xkgf)
1	Acima de 16
2	Acima de 16
3	Acima de 16
4	Acima de 16
5	Acima de 16

- b) Emendas empenadas SADE retiradas de estoque onde estavam armazenadas por um longo período.

As flechas mencionadas foram medidas e observadas nas luvas de alumínio externas, mas as luvas de aço internas também poderiam estar com deslocamento e flechas.

Observa-se que a emenda 4 com flecha de 3% rompeu abaixo da especificação mínima do fabricante, decorrente da não uniformidade de tensão na seção reta do cabo devido ao empenamento. Observa-se também que a emenda 5 ficou muito próxima da especificação mínima do fabricante (14288 kgf), conseqüentemente um valor máximo de tolerância de flecha seria 2% que concorda com o valor adotado na Republica da China. Observa-se ainda que a média das medidas empenadas foi muito pouco acima da ruptura fornecida pelo fabricante.

Comparando-se as medidas das emendas retilíneas com as empenadas verifica-se uma grande diferença, superior a 10% que é devido à ocorrência da não conformidade de empenamento. Essa variação justifica a necessidade de uma profunda revisão dos procedimentos da instalação e montagem, comentados no final nas conclusões do capítulo.

Tabela 4.3 Ensaio de tensão em emendas empenadas DRAKE SADE ³⁷

Emenda empenada	Flecha ³⁸	Tensão de ruptura (kgf)
1	1	15.850
2	1	15.617
3	1	14700
4	3	13.450*
5	2,5	14350

³⁷ Obs. Média de 14400kgf e Desvio Padrão de 424,26 kgf

*Na emenda empenada 4 ocorreu ruptura com 13.450 kgf , o primeiro tento rompeu com 9750 kgf, o deslocamento - deformação foi de 29 mm, no rompimento havia tido mais 7 mm de deformação-deslocamento e a flecha era de 3% .Não se conseguiu visualizar a posição do tento rompido no cabo antes da ruptura total por questões de segurança.

³⁸ Obs. Flecha em porcentual Deslocamento da Flecha / Comprimento da emenda

4.8 Resultados dos ensaios de deformação (dados dos extensômetros)

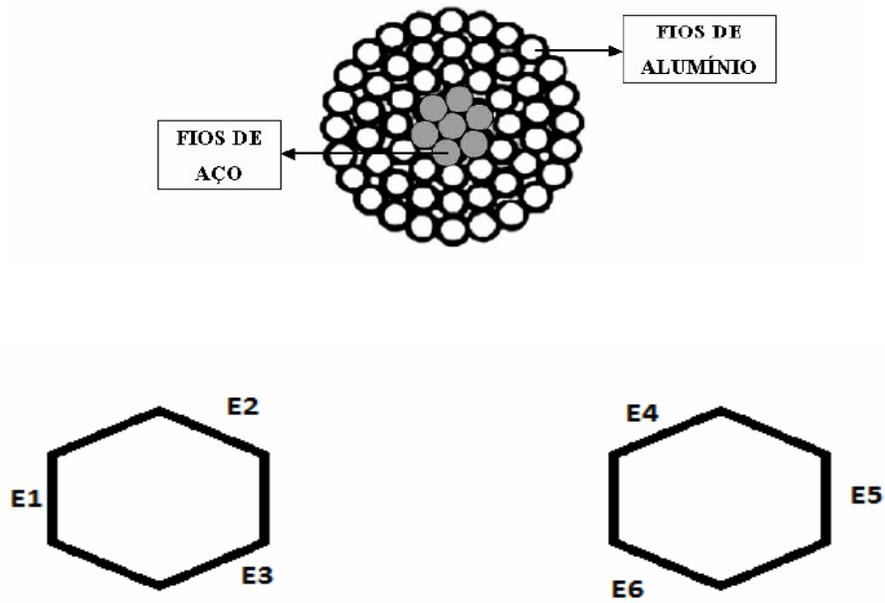


Fig. 4.30 Representação das a) tranças de Alumínio e Aço de cabos Drake b) posição dos extensômetros nas Luvas



Fig. 4.31 Cabo ACSR com emenda não conforme devido à luva de aço empenada



Fig. 4.32 Emenda prensada mostrando engaiolamento do cabo de alumínio

A carga de ruptura da emenda colocada no cabo pode ser identificada pela análise dos diagramas apresentados, sendo que esta carga corresponde à brusca redução do nível de carga atuante na luva. Pode-se verificar que não existe uniformidade das deformações sendo fruto do empenamento do elemento que faz com que o carregamento não atue de forma centrada.

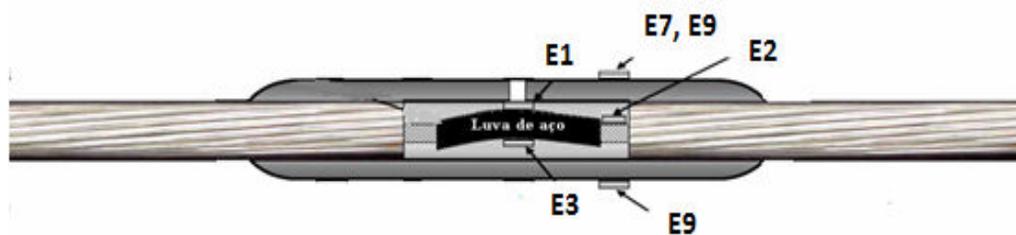


Fig. 4.33 Representação esquemática da colocação dos estensômetros nas luvas de aço (interna) e alumínio (externa)

Na curva média de carga x deformação define-se os valores de carga e de deformação de escoamento do elemento.

4.8.1 Cabo 1 Dados de deformação obtidas com os estensômetros colocados na luva de alumínio

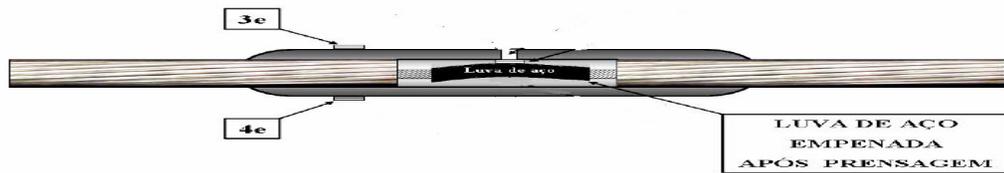


Fig. 4.34 Representação da colocação dos estensômetros na luva de alumínio

Nas figuras 4.35 a 4.46 a seguir são mostrados os resultados dos ensaios de deformação mostrando a relação tensão x deformação nos estensômetros colocados na luva de alumínio. Os ensaios foram realizados monitorando a tensão aplicada pela máquina de tração e a deformação ocorrida no estensômetro; além disso também foi monitorado o deslocamento do cabo total com o equipamento de coleta de dados LVDT.



Fig. 4.35 Ensaio de tração estensômetro E2 (o sinal na horizontal e vertical final foi provocado após a ruptura do cabo, pela volta do canal do sensor e não deve ser considerado como resultado do ensaio)

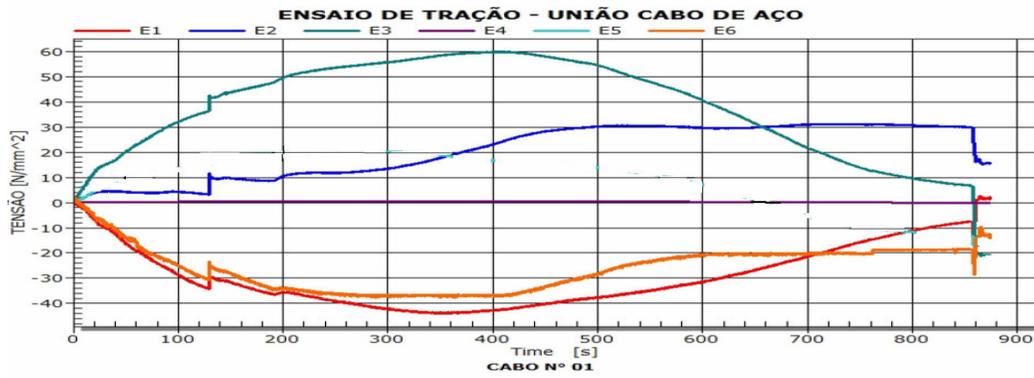


Fig.

4.36 Ensaio de tração extensômetros E1, E2, E3, E4, E5, E6, as curvas acima do zero de tração indicam um puxamento, enquanto as abaixo indicam compressão

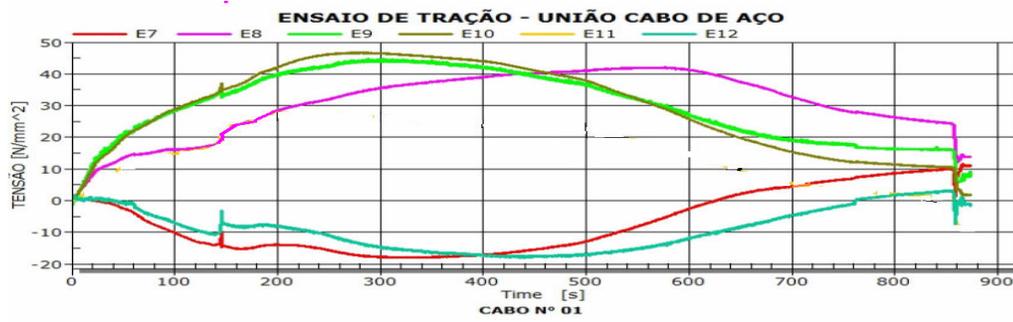


Fig. 4.37 Ensaio de tração extensômetros E7, E8, E9, E10, E11, E12, as curvas acima do zero de tração indicam um puxamento, enquanto as abaixo indicam compressão;

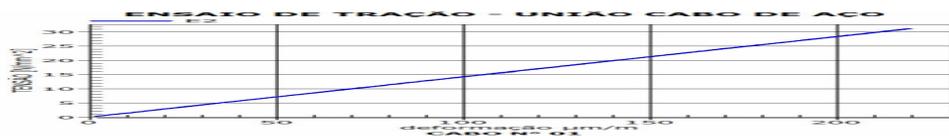


Fig. 4.38 Caracterização de tensão versus deformação extensômetro E2

Na Fig. 4.38, pode-se perceber a relação linear entre tensão e deformação dada pela lei de Hooke. Isto também pode ser observado nas Figs. 4.41, 4.43 e 4.4.5.

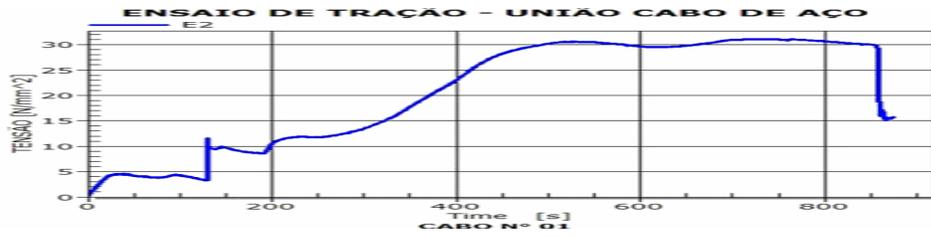


Fig. 4.39 Deformação no tempo de extensômetro E2

Na Fig. 4.39, pode-se perceber o aumento da tensão até a ruptura do cabo.

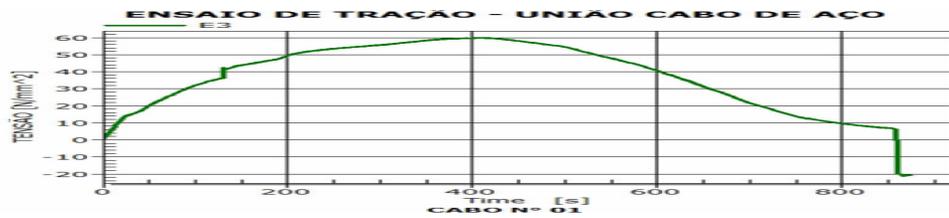


Fig. 4.40 Visualização de ensaio de cabo de alumínio extensômetro E3 (evolução da tensão no tempo)

Na Fig. 4.40 pode-se perceber a redução da tensão a partir de 400s indica escorregamento da luva de alumínio e posterior ruptura. Comportamento similar também é observado nas Figs. 4.42, 4.44 e 4.46.

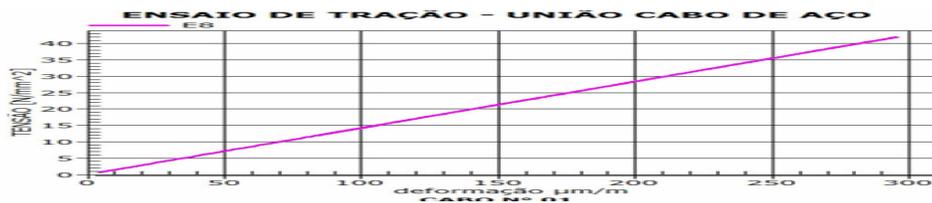


Fig. 4.41 Ensaio de tração extensômetro E8

Na Fig. 4.41, pode-se observar o comportamento linear da deformação com a aplicação de tensão.

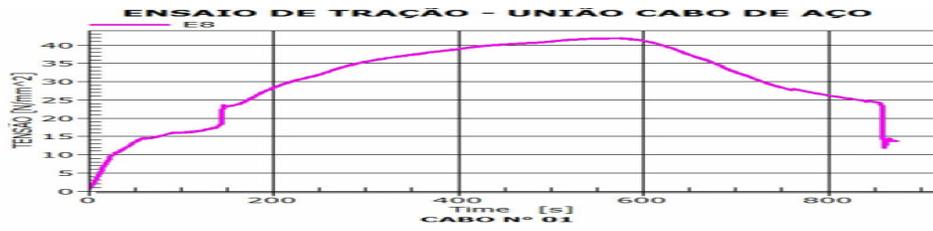


Fig. 4.42 Visualização de ensaio de ruptura estensômetro E8



Fig. 4.43 Ensaio de cabo ACSR estensômetro E9

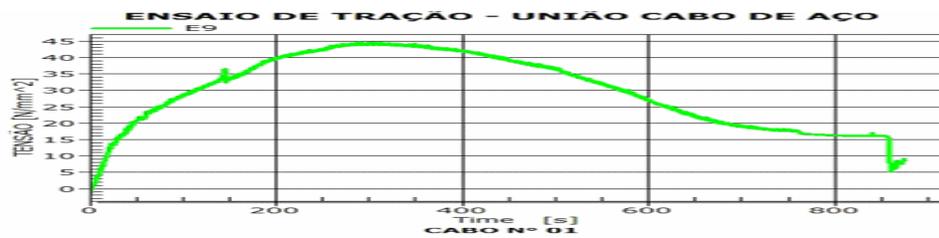


Fig. 4.44 Ensaio de cabo ACSR estensômetro E9 tensão no tempo



Fig. 4.45 Ensaio de tração estensômetro E10

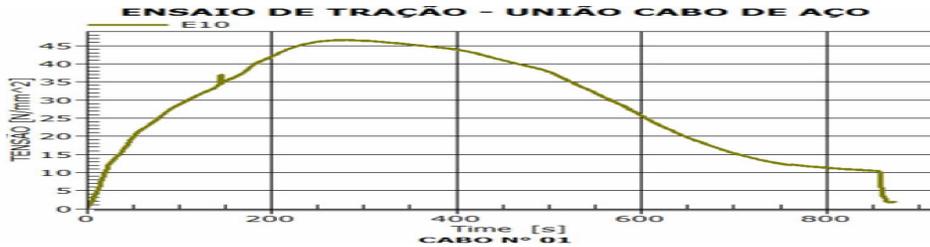


Fig. 4.46 Ensaio de tração estensômetro E10

Dos resultados obtidos com os ensaios e mostrados nos estensômetros colocados na luva de alumínio anteriormente, não existe uniformidade das deformações nas seções simétricas do corpo de prova, ou seja, não existe centragem da carga aplicada ocorrendo flexão no elemento e este fato é devido, principalmente, ao desalinhamento da emenda com flecha.

A falta de centragem da carga faz com que não seja válida a hipótese de manutenção da seção plana, quando se atinge a carga de pico, inicia-se a formação de fissura que aumenta sua abertura com aumento da deformação. Isto produz na face oposta deformações de tração com valores inferiores ao da face fissurada, podendo inclusive atingir deformações de compressão.

4.8.2 Cabo 2 estensômetro colocado no cabo de aço

As luvas externas de alumínio da SADE eram fabricadas com orifício por onde foram passados os fios de coleta de dados dos estensômetros.

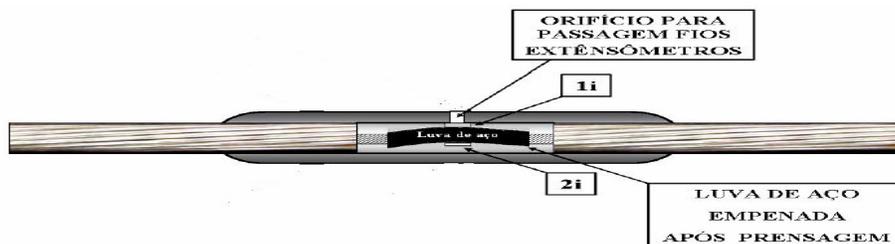


Fig. 4.47 Representação do posicionamento de estensômetros na luva de aço interna

As figuras 4.48 a 4.52 são referentes ao ensaio das emendas mostrando a relação tensão deformação conforme obtidas nos extensômetros colocados na luva de aço³⁹.

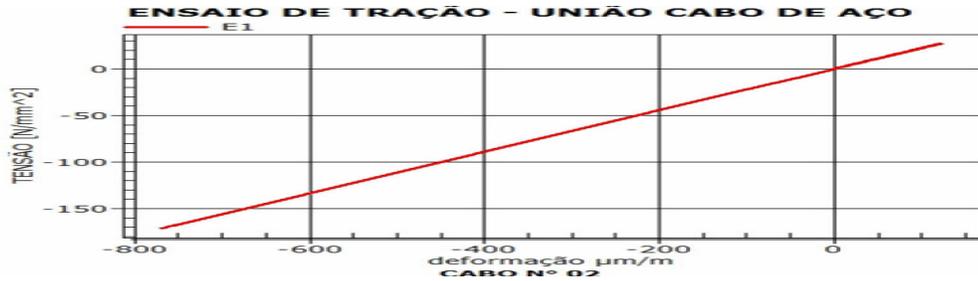


Fig. 4.48 Ensaio de tração extensômetro E1

Na Fig. 4.48 pode-se perceber a relação linear entre tensão e deformação dada pela lei de Hooke. Isto também pode ser observado na Fig. 4.50.

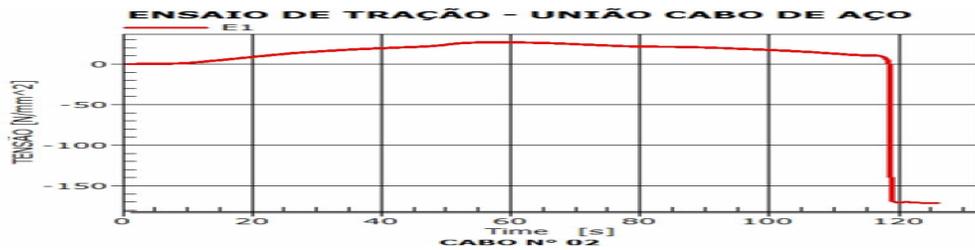


Fig. 4.49 Ensaio de tração extensômetro E1 Deformação no tempo

Na Fig. 4.49 pode-se perceber a redução da tensão a partir de 120s indica escorregamento da luva de alumínio e posterior ruptura. Comportamento similar também é observado nas Figs. 4.51 e 4.52.

³⁹ Material bibliográfico para estudos adicionais pode ser encontrado em ASM (2004) e Komarovsky(2003).

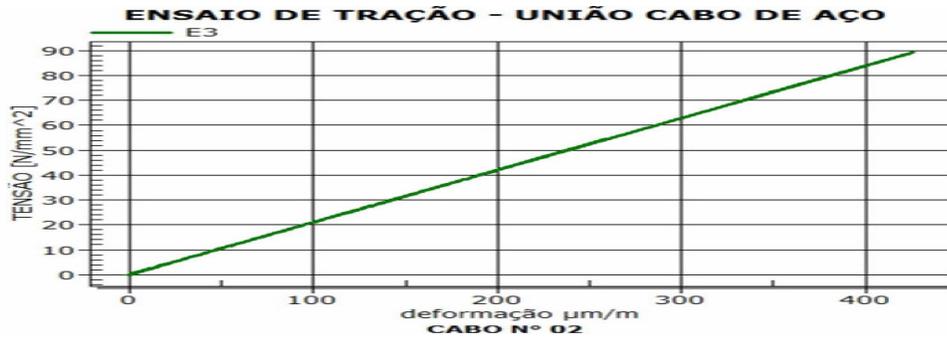


Fig. 4.50 Ensaio de tração estensômetro E3

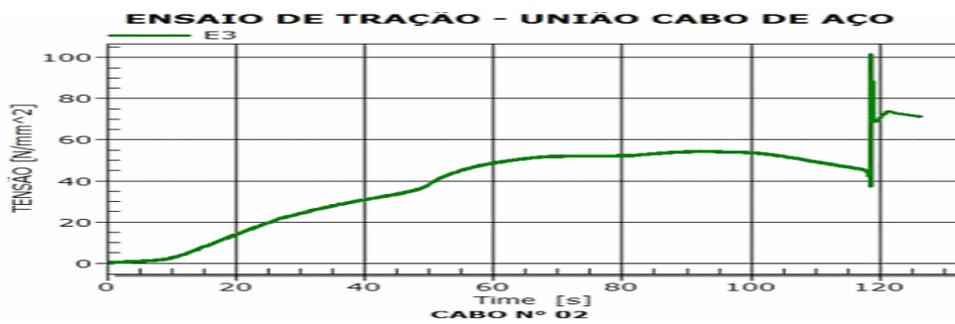


Fig. 4.51 Ensaio de tração estensômetro E3 deformação no tempo (o sinal na horizontal e vertical final foi provocado após a ruptura do cabo, pela volta do canal do sensor e não deve ser considerado como resultado do ensaio)

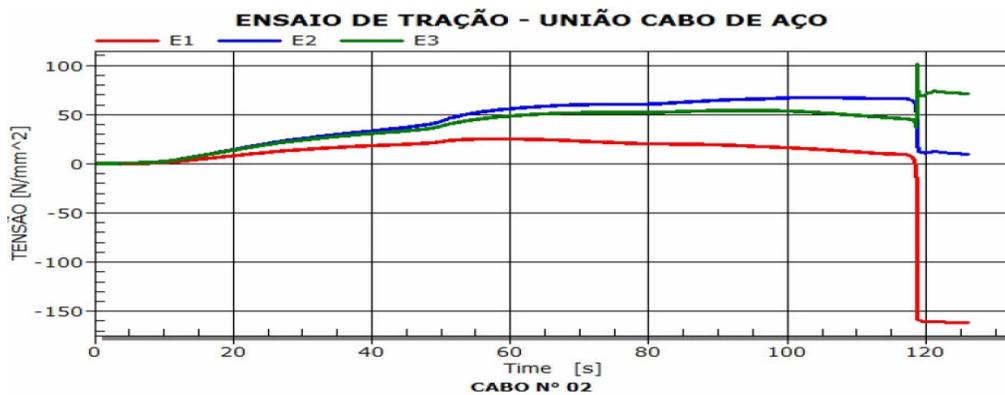


Fig. 4.52 Ensaio de tração estensômetros E1, E2, E3 na luva de aço (o sinal na horizontal e vertical final foi provocado após a ruptura do cabo, pela volta do canal do sensor e não deve ser considerado como resultado do ensaio)

Tabela 4.4 Módulo médio de elasticidade do Aço e alumínio

	N/mm ²	MPa	GPa
Aço 1	231827	231827	232
Aço 2	229253	229253	229
Aço 3	206826	206826	207
Média Aço	222635	222635	223
Al 1	205478	205478	205
Al 2	110759	110759	111
Al 3	109957	109957	110
Média Alumínio	142065	142065	142

A diferença observada na media da amostra de alumínio Al1, ocorreu devido a esta amostra ter sido próxima a região onde ocorreu a ruptura. Esta medida deveria ser refeita com outra amostra para efeitos de uma média mais precisa e que pudesse ter alterado os resultados de maneira significativa, que não ocorreu nos ensaios de deformação com extensômetros.

4.9 Análise dos modos de falha (FMEA)

A partir da pesquisa de campo, da simulação de elementos finitos, dos ensaios e visualização dos extensômetros é possível fazer uma análise de modos de falha que permita visualizar de forma mais clara os motivos e conseqüências de defeitos e suas causas:



Fig. 4.53 Análise de modos de falha (FMEA), mostrando as causas mais importantes

Ao longo do texto também fica evidente a importância das vibrações eólicas na degradação da vida útil da emenda e rompimento dos fios nas interfaces do cabo ACSR com a emenda. Isto pode ser observado na Fig. 4.54.

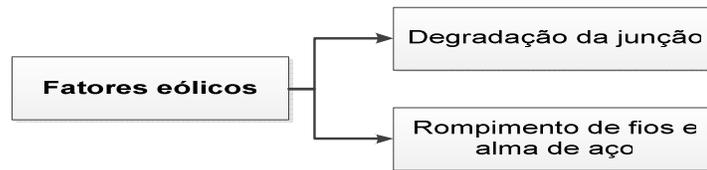


Fig. 4. 54 Efeitos das vibrações eólicas em falhas de emenda

A partir do monitoramento da temperatura da junção, do núcleo de aço do cabo ACSR e do aumento da resistência da emenda pode-se planejar manutenções preventivas, o que pode ser visualizado na Fig. 4.55.

Fica evidente da FMEA mostrada na Fig. 4.52 até Fig. 4.55 , a necessidade de monitoramento das condições dos cabos e manutenção preventiva, principalmente considerando as condições atuais de operação em mercados competitivos e eventos ambientais atípicos.

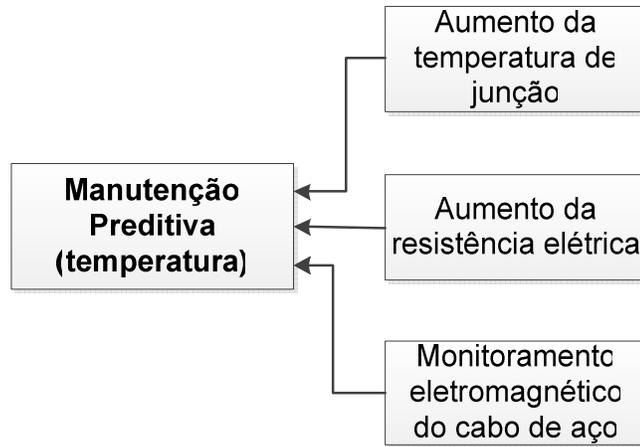


Fig. 4.55 Necessidade de monitoramento da temperatura e manutenção preventiva (preditiva) da emenda

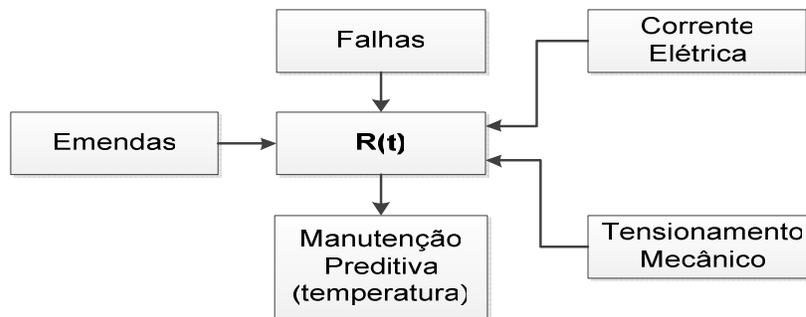


Fig. 4.56 Determinação da manutenção a partir da confiabilidade (R(t))

4.10 Conclusões do capítulo

A simulação com elementos finitos mostra que além da emenda estar com um lado trabalhando com compressão, e daí favorecendo aumento da probabilidade de ocorrência de ruptura devido ao aumento da tensão nos terminais da emenda, o aumento da densidade de material no lado comprimido pode provocar uma

diminuição da resistência elétrica deste lado e uma distribuição de corrente não homogênea na secção reta da emenda. Este aumento da corrente no lado que apresenta compressão irá provocar maior perda de potência nesta parte (efeito Joule) podendo haver aumento de temperatura nesta região e devido à área insuficiente para dissipação, provoca aumento ainda maior na probabilidade de ruptura.

Em um caso mais crítico, uma falha na prensagem pode formar um vinco na emenda. Isso implica em um efeito de tensões de plastificação localizados, os quais podem fragilizar a emenda. As especificações técnicas do fabricante devem também, apresentar os limites aceitáveis para esse tipo de falha

Da análise das metodologias de fiscalização verifica-se que a boa qualidade dos serviços e obras deve estar garantida pelas normas e especificações técnicas e as eventuais não-conformidades devem ser logo sanadas e com a devida anotação, para consideração na avaliação do indicador técnico-administrativo, com a pontuação referente. .

Há necessidade de exigir-se que as firmas empreiteiras tenham um programa contínuo de reciclagem técnica de seus profissionais, no sentido de garantir uma melhor qualificação da mão-de-obra envolvida com a prestação de serviços em Linhas de Transmissão, cumprindo as normas e as especificações técnicas.

O Manual de Fiscalização de Linhas de Transmissão deve ser revisado e reavaliado periodicamente pela ANEEL com a participação de uma equipe multidisciplinar, envolvendo os diferentes departamentos e setores da empresa, para facilitar a elaboração de contratos de prestação de serviços adequados e objetivos com as firmas empreiteiras.

Verifica-se nas empresas concessionárias visitadas que a taxa de falhas de emendas de compressão é relativamente baixa, evidenciando o sucesso dessa

tecnologia para linhas de transmissão. É claro que essa taxa de falha provém de cuidados especiais durante o processo construtivo, bem como, o estudo quanto à locação das emendas nas linhas, a serem observados no lançamento dos cabos. Com base em considerações e análises dos processos de execução, recomenda-se:

a) Necessidade de padronização dos processos executivos de emendas, observando as recomendações dos fabricantes, as necessidades específicas de produtividade no trabalho de lançamento dos cabos sem comprometimento da segurança e qualidade, incluindo os parâmetros de empenamento máximo admissível que forem determinados com os resultados da presente pesquisa;

b) *A proposição do fomento e solicitação da cooperação dos fabricantes no sentido do desenvolvimento de ferramentas padronizadas;*

c) *A oportunidade de aprimoramento da norma técnica NBR-7095/1981 (“Ferragens Eletrotécnicas para Linhas de Transmissão e Subestações de Alta tensão e Extra Alta Tensão”) [6] no que se refere às emendas, principalmente considerando os resultados desta pesquisa;*

d) *A oportunidade que empresas brasileiras de vanguarda elaborar uma publicação com finalidade de divulgação técnico-científica, de forma didática, reunindo as principais informações técnicas sobre emendas a compressão e procedimentos para evitar o empenamento das emendas.*

Das análises microscópicas verifica-se que as emendas parecem ser fabricadas com procedimentos e materiais adequados e qualidade que não justificam sua falha em campo. A tendência seria a ocorrência de falhas em etapas posteriores do processo total, ou seja a montagem em campo, o lançamento e a operação das linhas.

A análise da microscopia da emenda em falha revela que a provável causa da falha foi a descentralização da emenda no instante da montagem revelando a falta de fiscalização na montagem e falta de monitoramento adequado na operação.

Dos ensaios de ruptura percebe-se a significativa diferença entre as médias de tensão de ruptura de emendas retilíneas e empenadas, chegando a valores considerados inadequados nos cálculos de projeto da linha e que certamente se forem implantados irão resultar em eventos de falha.

Dos dados observados nos estensômetros, observa-se que a não centragem da carga e a não uniformidade dela na seção reta da emenda devido ao empenamento, durante a montagem da emenda, irão iniciar fissuras na interface da emenda com posterior evento de falha.

A análise dos modos de falha (FMEA) feita mostra os fatores causadores de falhas de montagens e instalações tais como a sobrecarga operacional, o tamanho do vão, a sobre corrente elétrica e o aumento da tração na linha que devem ser revisados e ajustados para valores adequados, principalmente em interconexões críticas e de muita importância para o sistema interligado nacional com possibilidade de efeitos cascata e interrupção em larga escala

Finalizando as conclusões deste capítulo, é fundamental o papel da fiscalização durante o processo de execução de linhas e emendas, devendo seu custo (da fiscalização) ser devidamente valorizado nos processos licitatórios de novas linhas. Diversos aspectos devem ser levados em consideração, tais como: número de vezes de ocorrência da não-conformidade, frequência, tipo e tempo de correção da não-conformidade. Deve ser feita uma pronta correção em casos relacionados com a execução, dentro do limite aceitável, recomendando-se a documentação fotográfica de cada emenda e sua substituição caso exceda 25 da flecha. O acompanhamento das equipes de execução deve ser contínuo. A firma empreiteira deve estar sempre informada e dar ciência aos relatórios de vistoria, visando o aprimoramento de seus processos

Evidenciou-se também, nas empresas visitadas, a ausência de critérios de aceitação das emendas não conformes (incluindo as empenadas e com descentralização), mostrando a necessidade da pesquisa em desenvolvimento e de revisão de normas técnicas. A falta de normalização técnica sobre as emendas em linhas de transmissão foi relatada em todos os locais visitados, reforçando a necessidade de iniciativas nesse sentido, especialmente no cenário nacional

Já a visita a uma empresa fabricante de emendas revelou a necessidade de observância estrita aos procedimentos de execução, compatibilizando os padrões da prensa / matriz, ferramentas e luvas, preferencialmente de um mesmo fabricante.

A análise dos processos e critérios adotados pela fiscalização de linhas de transmissão, discute o conhecimento técnico inerente à matéria em questão, apresentando uma panorâmica geral das vistorias em linhas de transmissão, com a identificação de procedimentos existentes e as necessidades de adequação às especificações. Isto possibilita o levantamento mais confiável dos perfis das firmas empreiteiras de modo que sejam estimuladas a qualidade e a melhoria dos serviços prestados, além da minimização de custos de operação, com responsabilidade no trato das questões ambientais e, principalmente, com a aplicação de tecnologia apropriada e técnicas modernas de engenharia de segurança do trabalho com o uso de EPI's e EPC's.

Os resultados obtidos evidenciam os procedimentos de implantação das emendas como grande potencial de causa de não conformidades e de falhas na operação. Entretanto as causas destas ocorrências com grande potencial de falha futura merecem ainda serem analisadas, consideradas e discutidas, o que é feito a seguir.

5. Discussões e considerações

Em um sistema de potência dentro de um ambiente de setor de eletricidade re-estruturado, um empreendedor percebe a possibilidade de expansão de mercado com maior demanda de consumidores de eletricidade no varejo, assinando acordos de intenções e sabendo quanta energia eles irão consumir.

Esse empreendedor poderá decidir gerar essa energia / potência como Autoprodutor ou poderá comprar das empresas distribuidoras. Essa energia poderá ser gerada próxima desses clientes e consumidores ou poderá ser gerada longe do centro de consumo e nesse caso deverá ser transportada por empresas transmissoras de energia que terão seus serviços de transportes remunerados por tarifas de acordo com a regulação existente no país. Em ambiente competitivo o preço será determinado pela lei da oferta e procura.

Segundo a teoria econômica, os mercados de energia maiores, com um número maior de agentes, impede preços maiores forçados pelos produtores e o mercado passa a ser mais eficiente com ganhos econômicos divididos por todos os agentes participantes, incluindo clientes.

No caso da maioria dos mercados competitivos, se há demanda demasiada de serviço de transmissão, pode ocorrer congestionamento com sobrecarga do sistema de transmissão, acarretando aumento da probabilidade de falha sistêmica em cascata do sistema de potência. As perdas econômicas decorrentes irão ser tão maiores quanto maior for o tempo de restabelecimento da operação normal. Uma maneira de inibir a possibilidade de congestionamento do sistema de transmissão é

a de colocar taxas cobradas dos agentes que em sua contratação de serviço de transporte de energia elétrica, que possam causar algum tipo de conflito e resulte em um congestionamento do sistema. Sabendo que irão pagar o preço do transporte da energia mais a taxa de congestionamento, os compradores decidirão por comprar de outro agente gerador que não cause congestionamento no sistema mesmo por um preço ligeiramente maior ao ofertado no local onde há possibilidade de congestão.

Outra maneira de impedir o congestionamento das linhas do sistema de transmissão é implantando novas linhas por expansão do sistema de transmissão. Como incentivar essa expansão, como recuperar o investimento e como cobrar dos clientes pelo uso e de outros agentes pelo adicional de confiabilidade adicionado ao sistema como um todo, ainda é assunto bastante estudado. São propostas formas diversas de precificação do serviço de transmissão, tais como zonal e nodal, com parte do custo do empreendimento sendo distribuída entre todos agentes pelo acréscimo de confiabilidade adicionado ao sistema.

Os principais requisitos de um sistema de transmissão são que ele entregue a energia de forma segura, confiável e econômica. Desde o princípio do uso da energia elétrica em larga escala ele tem se caracterizado por uma geração centralizada de alta capacidade em menor custo e por um sistema de transmissão que transporta a energia gerada até os centros consumidores. Os condutores usados nessas linhas são predominantemente de alumínio, que tem custo e peso menor que o cobre o que faz com que permitam estruturas de suporte menos pesadas.

Nos últimos anos, diversos casos de falhas em larga escala demonstraram a vulnerabilidade da rede e dos mercados de eletricidade. Por outro lado, a crescente dependência da sociedade moderna aos efeitos das interrupções de energia faz com que os governos sejam pressionados para tomar providências mais rapidamente. Uma possível causa, na maioria dos países, é que a expansão da transmissão continua sendo feita por processos tradicionais com adaptações, sendo que as incertezas da evolução das regras de mercado e do retorno sobre o investimento

desencorajaram e provocaram reduções de novos investimentos. Esses investimentos precisam ser retomados em maiores níveis para evitar novas falhas sistêmicas de larga escala.

Uma das possíveis explicações para estas ocorrências de falhas que foram observadas no trabalho é que a maior necessidade de resultados financeiros em menores horizontes de tempo, incluindo de depreciação do ativo, implica em implantações com menores custos e operação com cargas de valores superiores aos planejados.

Outros itens sendo considerados na maioria dos mercados competitivos são:

- O treinamento inadequado e perda de mão de obra especializada do sistema, causada pela re-estruturação do setor;

- Uma rede mais vulnerável conseqüente da diminuição de excesso de capacidade planejada na regulação econômica, maiores volatilidades de carga e comercialização entre sub-mercados regionais;

- Uma vulnerabilidade inerente das redes de transmissão às falhas, devido às contingências funcionais de confiabilidade, com ocorrências de falhas dentro de períodos permitidos normalmente para o sistema recuperar de uma única falha, ou seja, a ocorrência de falhas múltiplas concomitantemente.

Também é importante a revisão dos processos executivos de emendas, observando as recomendações dos fabricantes, as necessidades específicas de produtividade no trabalho de lançamento dos cabos sem comprometimento da segurança e qualidade, incluindo os parâmetros de empenamento máximo admissível que foram determinados com os resultados da presente pesquisa.

Igualmente necessário é que empresas de vanguarda *elaborem publicações com finalidade de divulgação técnico-científica, de forma didática, reunindo as principais informações técnicas sobre emendas a compressão* para treinamento de pessoal de campo e de implantação.

Existem algumas questões que merecem melhores respostas:

a) Quem vai fazer o pagamento da melhoria da confiabilidade com minimização dos custos?

b) Como garantir que as melhorias sugeridas para as normas técnicas e na regulação sejam efetivadas e proporcionem os benefícios esperados?

c) Quem deve propor a expansão, quem deve rever e analisar a proposta de expansão e quem deve aprovar o plano?

d) Qual a veracidade e precisão de informações e dos modelos que requerem uma grande quantidade de dados de entrada?

e) Quais critérios de planejamento estocásticos, ao invés de determinísticos, devem ser propostos para considerar a probabilidade de ocorrência de cada contingência?

f) Quais as premissas e metodologias de cálculo de previsões de demanda de eletricidade, quais análises de cenários e de riscos probabilísticos devido à ocorrência de saídas aleatórias devem ser realizados para aumentar a confiabilidade das redes?

g) Quais os padrões de critério de desempenho adequados, com a rede funcionando em frequência e tensão adequadas, com elementos da rede em falha (N-1)?

Necessita-se um melhor entendimento das justificativas econômicas (custos e benefícios) para os critérios de confiabilidade e os modelos econômicos de investimentos em transmissão. Também precisam ser melhor entendido os fatores que criam a necessidade de critérios de confiabilidade e os impactos que os critérios de confiabilidade causam na prática, incluindo custo de perdas e falhas nos preços locacionais e planos de investimentos.

Outros fatores que precisam ser melhores entendidos:

-No Brasil, a TUST foi implementada com redução da componente locacional, ao invés de 30% para contemplar a parcela selo e o aumento de confiabilidade do sistema interligado e 70% para pagamento do transporte da energia, padrão usual na maioria dos países do mundo, adota-se o inverso, uma parcela de 80% devido ao incremento de confiabilidade e 20% devido a parcela de transporte, perdendo toda a sensibilidade da componente locacional. Esta composição de TUST induz uma sobrecarga nas linhas que não correspondem aos objetivos pelos quais elas foram planejadas e projetadas

-Além disso, quando se paga a parcela de tarifa (TUST G) de 50% pelo gerador (o que, por si só, já é um contra senso contábil, de pagar um imposto ou tarifa próximo da produção, ao invés de pagar próximo do consumo). aumenta ainda mais a distorção e sobrecarga das linha de interligações em longa distâncias.

-Em relação aos períodos da tarifa ponta e fora de ponta da TUST, ela acaba causando um aumento do número de picos de corrente, aumenta a dilatação e contração devido à variação de corrente, acelera a fadiga e diminui a vida útil.

Em contrapartida ao incentivo de novas gerações distantes com a não linearidade locacional da TUST, as novas fontes de geração em distancias maiores poderia ser incentivadas e implementadas com redução de impostos estaduais e federais (ICMS, IR, CONFINS e outros), ao invés de penalizar as fontes melhores situadas em

relação aos centros consumidores. Esta tendência já vem sendo estudada e praticada na Inglaterra e alguns outros países europeus.

Outra tendência no sistema elétrico brasileiro da atualidade são os reservatórios a fio d'água, que irão tornar crítico o processo de sobrecarga de rede de transmissão com aumento de volatilidade dos fluxos, da fadiga dos cabos e emendas e da taxa de falhas e eventos em larga escala. Estudos de confiabilidade com reservatórios de fio d'água e geração renovável tipo eólica, solar e PCHs devem ser simulados para verificar o aumento da volatilidade no transporte. Pode-se simular a ocorrência de picos com aumento excessivo de temperatura (acima de 150 C) no cabo ACSR e verificar qual o aumento na probabilidade de falhas e redução da vida útil da emenda e cabo. Lembrando que a cada 20 C de aumento de temperatura dobra-se a velocidade de reação (oxidação da emenda) e conseqüentemente decai a vida útil da conexão, além da ocorrência de fadiga.

O maior uso de dispositivos de medida de fluxo e de FACTS pode melhorar o conhecimento e gerência do fluxo real de potência evitando enlaces fechados de corrente e reduzindo a sobrecarga de corrente das linhas de alta tensão⁴⁰.

O uso de tecnologias mais modernas pode incentivar a contratação de mão de obra mais qualificada e menos sujeita a pressões de finalização de obra, reduzindo a ocorrência de não conformidades na construção. Mesmo assim, a fiscalização sempre terá papel muito importante nas etapas mais críticas de implantação de sistemas de transmissão.

O uso de fatores de penalidades por indisponibilidade da linha pode ser feito prevendo aprendizado por uso de intervalos de penalidades mais suaves crescentes, até os valores atuais de 15 vezes o valor da energia não suprida para saídas programadas; para saídas não programadas até 150 vezes a carga não suprida.

⁴⁰ Ver estudo detalhado em Edris(2007)

Os investimentos em transmissão são afetados pela eficácia do processo de planejamento da rede e aprovação do investimento. No ambiente regulado da maioria dos países com mercados competitivos as propostas de investimento são tipicamente desenvolvidas pelos proprietários da rede e sujeitas a aprovação de reguladores. Os reguladores por sua vez, podem ter dificuldade de acesso de tais propostas principalmente se esta informação é fornecida pelo concessionário que está propondo a expansão. O acesso á relação custo benefício pode ser difícil e aberto a disputas levando a atrasos e incertezas. O acesso a informação precisa e confiável sobre a condição operacional da rede é crucial para melhorar a efetividade, tempo e credibilidade ao processo de planejamento e aprovação de investimentos.

Em diversos países a regulação por incentivos foi uma alternativa para a regulação tradicional de custo do serviço e de taxa de retorno. A expectativa foi que os mecanismos de regulação por incentivos providenciassem incentivos para as empresas reduzirem preços e melhorarem a qualidade efetiva em custos, novos produtos e serviços e em preço de acesso.

Além disso, é urgente a criação de um banco de dados com características de todo sistema interligado nacional e todas as ocorrências da falhas documentadas e auditadas, com responsabilidade de atualização de todos os agentes e sendo gerenciados pelo operador centralizado do setor e disponível para estudos acadêmicos e de agentes credenciados do setor. Isso reduziria as dificuldades de conseguir dados da infra-estrutura facilitando a organização de estudos e trabalhos de verificação de potenciais de falha.

No caso do setor elétrico, a diversidade de tecnologia de geração é importante como forma de reduzir a vulnerabilidade aos erros de projeto ou de operação, o que poderia causar eventos de larga escala e cortes no suprimento durante o tempo necessário para efetuar reparos. Outro método de atingir as metas de fornecimento de energia confiável é o uso de redundâncias no planejamento para mitigar riscos de falhas esperadas, margens reservas maiores, redes de transmissão e de distribuição

múltiplas e redundantes⁴¹. Estas soluções são bastante onerosas devido ao seu pouco uso na maior parte do tempo.

As melhorias nestes arranjos ou investimentos em expansão das redes de transmissão para manter padrões de operação existentes podem não ser suficiente para assegurar serviços confiáveis de eletricidade aos ambientes de mercado atuais. O ajuste de novo regime de mercado e as alterações nas práticas técnicas irão requerer soluções técnicas melhoradas. A combinação resiliência e robustez encaminham uma solução adequada de confiabilidade. Deve-se ainda considerar a pouca tradição em sistemas interligados competitivos e operação centralizada, incluindo no ambiente internacional.

Outra forma de obter melhores resultados em confiabilidade é com uso de tecnologias emergentes que estão chegando ao mercado e este é o assunto tratado a seguir.

⁴¹ Para estudo mais detalhado pode ser visto Blumsack (2006)

6. Tecnologias emergentes

Existem diversas novas tecnologias que podem contribuir na resolução das dificuldades encontradas e minimizar o impacto da ocorrência dessas não conformidades. Algumas formas de mitigar estes possíveis riscos são gerações distribuídas (com menor uso da rede de transmissão), FACTS (Flexible AC Transmission Systems que podem agilizar a contingência das falhas), emendas implosivas (que minimizam a possibilidade de ocorrência destas não conformidades), cabos termo resistentes (com tecnologias de conexão mais modernas) e supercondutores. Todas estas tecnologias têm aplicação que possibilitam aumento da robustez e resiliência do sistema e são importantes para serem estudadas detalhadamente, entretanto, somente as três últimas serão discutidas e estudadas neste capítulo.

Além das três citadas comenta-se também uma forma de monitoramento ainda não utilizada no Brasil para verificação da alma de aço dos condutores ACSR, que é baseada em efeito Hall e inspeção eletromagnética. Esta técnica é recente e está sendo usada para monitoramento de cabos de aço de pontes estaiadas e será discutida neste capítulo sendo utilizada para cabos de transmissão de energia elétrica.

6.1 Emendas à compressão implosivas⁴²

O método da luva dupla é consagrado no uso em condutores ACSR, mas pode ter grande gasto de tempo e custos, se forem consideradas as não conformidades, pois requer equipamento pesado e a emenda pode ser difícil de ser feita em ambientes de campo. A emenda ACSR está em uso por bastante tempo, e em pesquisa realizada com 21 empresas nos EUA foi estimada uma ocorrência média de 3,6 falhas por ano nos últimos 10 anos passados.

No método por implosão a emenda é mais fácil e rápida, com qualidade mecânica e elétrica superior a convencional.

Por volta de 1950 foi descoberto que metais podem ser fundidos com explosivos, produzindo uma liga metálica permanente constituída por duas superfícies metálicas e cuidadosa seleção e controle da energia contida no explosivo. O uso de explosivos requer maior capacitação e custos de segurança, entretanto este procedimento tem a mesma complexidade das demais atividades de segurança industrial. Outra preocupação é o ruído que o processo pode causar e alguns métodos têm sido estudados para reduzir a onda de pressão, ou impedir usar as luvas implosivas em regiões com construções próximas e também se observou que nenhum perigo é apresentado para as propriedades próximas.

A tecnologia implosiva pode ser usada na construção de conexões para linhas de transmissão de alta tensão e subestações. Nos fios de aço, tais como fios aéreos

⁴² Ver Pasini (2006) e Pasini (2010)

onde há conexão de um cabo de aço a uma estrutura de ancoragem a tecnologia de emendas implosivas pode prover uma alternativa de conexão simples e segura.

6.1.1 Descrição de emenda implosiva

A emenda implosiva é feita com camada de explosivo colocada ao redor de uma luva de alumínio e camada protetora de plástico enrolada ao redor do explosivo. A camada de explosivo é dimensionada com características de velocidade de detonação, pressão e geometria para criar a compressão adequada. A energia do explosivo é alta, mas pode ser controlada com um alto grau de precisão.

A luva acomoda os condutores e ela se ajusta com um pequeno espaço entre o condutor e a luva (Figura 7.1), para permitir ocorrer a compressão e as ligações metálicas adequadas.



Fig. 6.1 A emenda explosiva pronta para detonação (www.Burndy.com)

O instalador marca o condutor e coloca a emenda centrada e o detonador é colocado no explosivo enrolado e, após a implosão, a camada protetora evapora e não é produzido nenhum fragmento. O resultado da conexão é uma massa sólida que parece ter sido soldada e não são detectados vãos ou interfaces entre o condutor e a emenda, nem espaços entre os fios enrolados do condutor.

Devem-se preparar diversos condutores e emendas para detonação simultânea, com o pessoal de trabalho deve ficar afastado mais de 35 metros da área das emendas e logo após um sinal de três toques de buzinas, o responsável aciona o detonador e posteriormente a buzina para indicar que correu tudo bem.



Fig. 6.2. Emendas e Luvas implosivas terminadas (www.Burndy.com)

A emenda implosiva pode ser feita ao nível do solo ou no ar; no nível do solo deve ser colocada uma tela de proteção próxima da região de detonação para prevenir de pedras atiradas pela pressão das ondas mecânicas do ar devido à explosão.

6.1.2 Comparação entre a compressão implosiva e a hidráulica

Na tecnologia de emenda implosiva, a qualidade da conexão é homogênea, melhor, livre de espaços vazios, a emenda é mais fácil de instalar, o custo total e o tempo de término do projeto são reduzidos. Na compressão implosiva há apenas algumas deformações radiais e não ocorre nenhuma deformação de alongação na luva de emenda, como pode ser observado na Figura 7.4.

A emenda implosiva é praticamente imune a efeito corona, diferente das conexões à compressão hidráulicas convencionais que produzem corona se estão sujas depois da compressão, devido à graxa antioxidante injetada antes do estágio de compressão, este corona pode causar pontos de aquecimento e a ruptura da emenda



Fig. 6.3 Detonação simultânea de 10 emendas implosivas (www.Burndy.com)

As emendas implosivas podem ser instaladas em qualquer tipo de terreno, em lugares remotos e em qualquer condição climática, tem resistência à tração melhor que a emenda hidráulica e a qualidade da compressão é sempre mais fácil de obter mantendo a qualidade em repetidas realizações. A força de travamento da emenda excede 100% da no condutor.

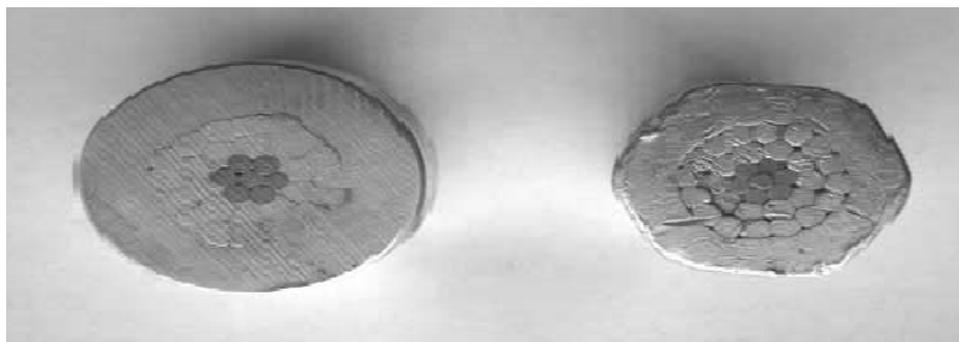


Fig. 6.4 Emenda implosiva (esquerda) e à compressão tradicional (direita) (www.Burndy.com)

Uma emenda implosiva instalada tem resistência elétrica menor que a do condutor equivalente. Na emenda implosiva, a resistência elétrica é tipicamente metade da resistência do condutor, enquanto no caso de uma emenda por compressão hidráulica a resistência elétrica pode chegar a 95%. Como a conexão deteriora este valor pode exceder 100%, causando temperaturas de operação mais altas nas

conexões e ocorrência de ciclo vicioso devido ao aumento de temperatura, acelerando deterioração e a falha da conexão.

Uma das causas mais comuns de falha dos conectores no decorrer do tempo é a temperatura alta, principalmente com o aumento da carga e idade das conexões.

Os conectores implisivos podem ser puxados sem estragar o condutor ou os elementos de conexão e é possível acionar um número grande de carretéis de uma única vez. O puxador e o tensionador das estações podem estar situados em locais convenientes, não apenas em locais limitados pelo comprimento do carretel. Desta forma, o gerente do projeto tem maior controle na localização das estações de trabalho, impedindo que elas fiquem próximas a áreas sensíveis em aspectos ambientais.

Os tempos de instalação são menores, sendo uma fração do tempo exigido na emenda convencional de compressão, a instalação requer 40% menos trabalho.

6.1.3 Aplicações

A American Electric Power construiu uma nova linha de transmissão de 765kV em área ambientalmente sensível na América do Norte, as Florestas de George Washington e Jefferson e uma das tecnologias selecionadas foi a emenda implisiva, onde seis condutores paralelos foram emendados ao mesmo tempo em longas distâncias com estações de puxamento em locais de impactos ambientais melhores controlados e com menor tempo de construção.

As emendas implisivas têm sido usadas em uma larga faixa de bitola de condutores de 266MCM até 3360 MCM incluindo condutores de 138kV até 765 kV e a empresa Hydro One em Ontário usa estas emendas implisivas em linhas de 735 kV.

6.1.4 Qualificação e testes³⁶

6.1.4.1 Ciclagem de calor

Em testes feitos com ciclos de calor repetidos e aumento progressivo de temperatura no conector, em condutores ACSR Grackle 54/19 (pelo padrão CSA C57-1966, ANSI C119 4-1976) com 500 ciclos e aumento de temperatura de 100 Celsius, mostraram resultados de aumento de resistência menor que 10% entre o vigésimo quinto e o último ciclo, a temperatura do condutor foi de 50 -60 Celsius ou um máximo de 60% da temperatura do condutor, dentro dos limites aceitáveis.

6.1.4.2 Força de tensão

Em teste de puxamento aplicando tração em emenda de cabo ACSR Falcon 1590 MCM, com tensão de ruptura de 242 kN, a carga foi gradualmente aumentada até ocorrer a falha. Nenhuma deformação foi medida na emenda até 100% do limite de ruptura final e o condutor falhou em 254 KN, que é acima da tensão de ruptura do condutor, sendo considerado um resultado típico dos conectores implosivos.

6.1.4.3 Resistência elétrica

A diferença entre a resistência elétrica do conector e do conjunto conector e condutor foi encontrada e pode ser comparada com a resistência da conexão. Em um teste típico, feito pela empresa Sensor Note na província canadense de Quebec, foi medida uma resistência de 8 μ Ohms nas extremidades da emenda e 8-9 μ Ohm entre o cabo condutor e a emenda. Isto foi comparado com a emenda comprimida hidráulicamente, que mediu uma resistência de 8 μ Ohm no conector e de 17 – 20 μ Ohm entre o conector e o condutor; demonstrando que as emendas implosivas são melhores condutoras que as hidráulicas.

6.1.4.4 Teste de Vibração

Um dos testes feitos pelo Norwegian Power Board em emendas implosivas à plena carga em conexão de cabo 1192,5 kcmil 54/7 Grackle puxadas através de 75 km e 21 torres. Depois do puxamento, duas emendas foram submetidas a um teste de vibração de 14,13 Hz em uma amplitude de 54 mm e 70 x 70 ciclos. A máxima deformação ocorreu na entrada da emenda e depois da vibração, cada emenda foi tracionada até a falha, que ocorreu entre 104% e 109% da tensão de ruptura.

6.1.4.5 Corona Visual

Em uma emenda em cabo 85kcmil 26/7, o corona positivo foi observado em 198kVRMS, além do requerido de 151,7 kV rms para cabos aéreos na especificação A-6M-79.

6.2 Monitoramentos de não conformidades na alma de aço

O ensaio de Inspeção Eletromagnética em Cabo de aço ferromagnético é padronizado pela ASTM E 1571 e usa o efeito Hall na verificação da não homogeneidade do fluxo magnético devido à:

- a) Ruptura do fio;
- b) Trincas;
- c) Outros defeitos da alma de aço do cabo.

A variação da intensidade do fluxo magnético mede a perda localizada ou distribuída de seção de aço ao longo do cabo.

Os ímãs permanentes e o sensor Hall ficam juntos na cabeça magnética e permitem a medida de irregularidades na alma de aço do cabo ASCR. Os detectores de fluxo magnético são posicionados entre os ímãs permanentes e o cabo de aço. O fluxo magnético é proporcional ao metal presente entre os pólos do ímã permanente, e este fluxo pode ser medido por sensores acoplados ao cabo.

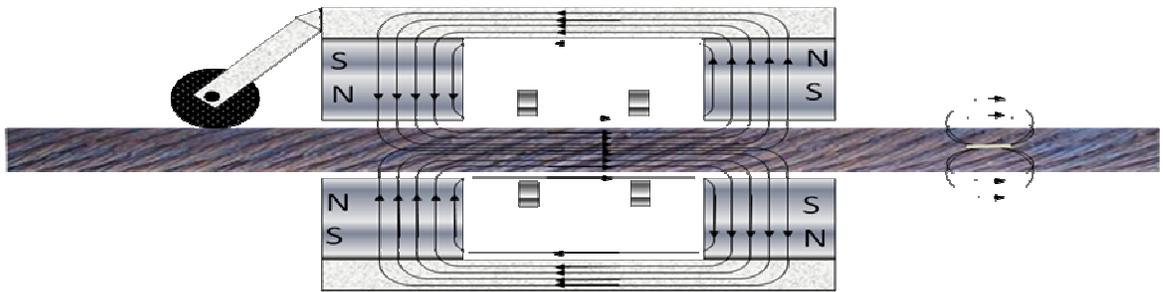


Fig. 6.5 Detector de não conformidade em peças de aço (fluxos magnéticos e distorção devido defeito) (www.Intron-plus.com)

Os sinais de fluxo magnético detectados pelos sensores são tratados e convertidos para representação gráfica por software proprietário do fabricante.

A perda de área na seção metálica pode ser devido à

- a) Abrasão interna ou
- b) ausência de um tento de arame no segmento do cabo de aço.

Os defeitos localizados são tentos de arame rompidos ou danificados e sua corrosão.

Na inspeção, o cabo de aço deve ter um fluxo magnético passando por ele suficiente para levar os domínios magnéticos ao ponto de saturação magnética na curva de histerese.

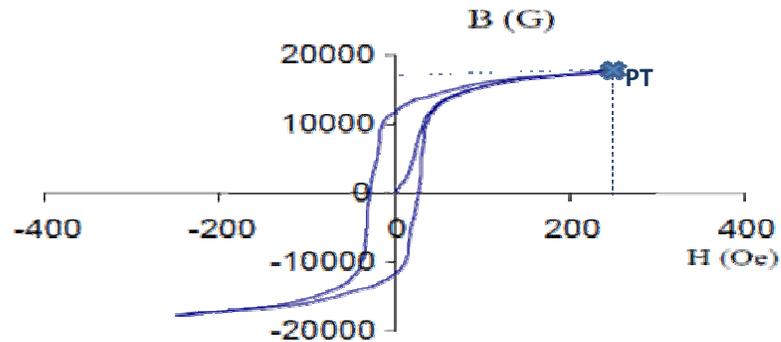


Fig. 6.6 Curva de histerese mostrando em destaque o ponto de saturação que é o ponto de trabalho (www.Intron-plus.com)

Devem-se calibrar os sensores Hall para medir corretamente a variação do fluxo magnético devido à perda de seção metálica. Não é necessária calibração para defeitos localizados e o sinal de defeito localizado é representado por dois picos apresentando polaridade invertida.



Fig. 6.7 Equipamentos de monitoramento por efeito Hall com peso 217 kg (esquerda) e 70 kg (direita). (www.Intron-plus.com)

6.2.1 Calibração do equipamento

É necessário montar o equipamento no cabo, pré-magnetizar aproximadamente 2 metros do cabo e calibrar o primeiro ponto como referência de 0% de perda de seção metálica. O segundo ponto da calibração de 100% de perda de seção metálica é feito automaticamente pelo aparelho levando-se em consideração o diâmetro do cabo a ser inspecionado e, com os dois pontos, define-se a curva de calibração.

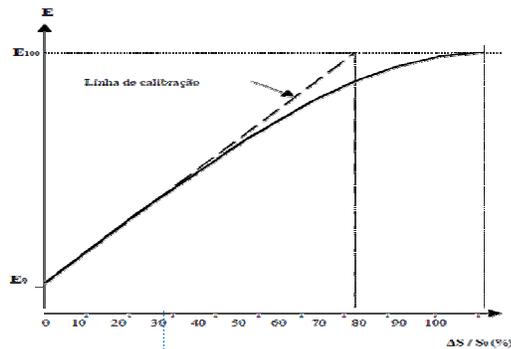


Fig. 6.8 Curva de calibração dos sensores hall na seção de cabo metálico (www.Intron-plus.com)

6.2.2 Procedimento de inspeção

Devem-se preparar as instalações e montar a cabeça magnética para a calibração dos pontos de referência e executar a pré-magnetização de dois metros armazenando esta informação para a inspeção. Posteriormente, grava-se o segundo ponto (100% de perda de seção) no coletor de dados, com cálculo baseado no diâmetro.



Fig. 6.9 Cabeça magnética montada em cabo (www.Intron-plus.com)

6.2.3 Observações na inspeção eletromagnética

Um dos defeitos mais comuns em cabos de aço é a corrosão com o deslocamento da camada externa de fios devido à vibração provocada pelo vento e trinca nos fios (fio rompido).

A inspeção de 520 m de cabo está mostrada nos gráficos a seguir e pode-se realizar “zoom” nas regiões de interesse para visualizar as discontinuidades.

As grandes variações dos sinais no gráfico podem indicar uma região de desestruturação da camada externa do cabo e sua localização. Pode-se ainda comparar dois gráficos com o recurso de superposição dos ensaios, observando-se ainda mais significativamente a diferença do estado dos dois cabos.

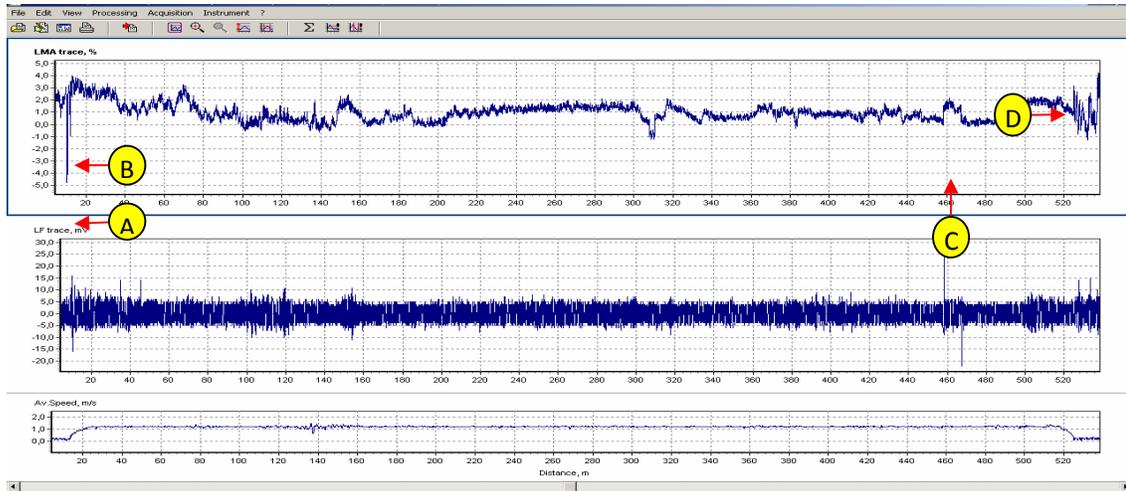


Fig. 6.10 Resultado de inspeção e pontos de maior interesse (A,B,C e D) usando interface com software proprietário (www.Intron-plus.com)

6.3 Cabos termorresistentes (TAL)

A escolha do tipo de cabo requer um profundo conhecimento das características dos cabos disponíveis: parâmetros elétricos, mecânicos e térmicos, relação custo/benefício; operação econômica *versus* térmica; carregamento mecânico *versus* altas temperaturas e vida útil *versus* fadiga do material.

Em 1960 foi desenvolvida uma liga de alumínio (TAL) com recozimento e fluência em altas temperaturas, melhorada em relação à liga convencional 1350 de alumínio. A diferença básica entre as ligas Al 1350 e TAL está na composição química, com um maior percentual do elemento químico zircônio.

No cabo com liga TAL, o envelhecimento é reduzido, mostrando o Zircônio proporcionando a redução da perda de resistência mecânica.

A liga termo resistente tem grande potencial de utilização, com um aumento de até 50 % na capacidade de transmissão para linhas curtas, para as linhas longas essa tecnologia eleva o nível de confiabilidade, sem aumento da transmissão.

6.4 Supercondutores

Supercondutividade é uma propriedade física da característica intrínseca de certos materiais, quando em temperaturas extremamente baixas, conduzir corrente sem resistência (e portanto sem perdas), sendo um diamagneto perfeito abaixo de uma temperatura crítica.

Foi descoberta em 1911 por Heike Kamerlingh Onnes, onde a resistência elétrica do mercúrio era nula na temperatura de 4 K (-452 °F, -269 °C). A temperatura mais elevada em que um material de supercondutividade é de 138 K (ou -131° C) em um composto cerâmico de mercúrio-cobre, para atingir esta temperatura se usa hélio líquido (de alto custo), impedindo uso em aplicações de maiores monta. A descoberta em 1993 de cerâmica supercondutora a 160 K (-113 °C), do físico Paul Ching-Wu Chu foi um marco nessa tecnologia.

A supercondutividade pode ser entendida como característica de resistividade nula, abaixo de certa temperatura crítica, T_c , e diamagnetismo perfeito, ou campo magnético nulo em seu interior. Esta última característica é denominada Efeito Meissner-Ochsenfeld.

A característica supercondutora cessa com

- a) A aplicação de campo externo,

- b) A elevação da temperatura na região experimental ou
- c) A aplicação de correntes de transporte com densidades de área elevadas.

As aplicações principais da supercondutividade são:

- a) Bobinas com fios supercondutores de campos magnéticos intensos,
- b) Trens Maglev,
- c) Aparelhos de ressonância magnética nuclear,
- d) Sensores SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*), para medidas magnéticas muito sensíveis,
- e) Cavidades ópticas quânticas supercondutoras (Lasers de altíssima potência).

6.4.1 Fabricação de fios

O processo de fabricação de fios é simples e de baixo custo e os fios são capazes de transportar altas correntes elétricas. Esse potencial é devido a abundância dos elementos Mg e B na terra, (sendo o magnésio é o oitavo elemento mais abundante na Terra.)

Existe alta difusão do Mg nas fibras de B e elas são seladas em tubo de Ta lacrado em ampola de quartzo e levado ao forno. Após duas horas a ampola é removida do forno e resfriada à temperatura ambiente. Os fios são bons condutores de

eletricidade, melhores que o chumbo, podiam ainda transportar correntes de $J_c = 60\text{kA/cm}^2$. O comprimento máximo alcançado foi 5 cm, mas fios maiores podem ser construídos, com proteção externa e revestimento.

6.4.2 Vantagens e potencial

A redescoberta do MgB_2 é muito importante devido á:

- a) A liga MgB , super conduz com uma temperatura alta;
- b) Sendo uma liga metálica, há grande expectativa dela ser preferida nas aplicações do dia-a-dia. Com T_c de 39K, é possível não seja necessária a refrigeração com hélio líquido, o que reduz significativamente os custos das aplicações.

6.5 Conclusões do capítulo

Instalação mais fácil, melhor qualidade de conexão, menor requisitos de trabalho, encadeamento mais rápido e o fato de não usar equipamento de compressão são vantagens competitivas que promovem a tecnologia de emendas à implosão como uma alternativa viável para a prática de emendas de compressão

A inspeção eletromagnética com uso de efeito Hall pode atender as necessidades de manutenção e inspeção em cabos com alma de aço, trazendo segurança no suprimento e confiabilidade no fornecimento, otimizando custos de manutenção e evitando tragédias como as observadas nas recentes falhas de linhas de transmissão.

A aplicação da liga TAL em climas tropicais é viável para linhas curtas, com valores de tracionamento do cabo ampliados para compensar o aumento da flecha em alta temperatura de projeto, sem perda de confiabilidade da linha. A capacidade de transmissão de energia elétrica é 50 % maior que a de um cabo de liga tradicional Al 1350 de mesma característica construtiva (bitola). Os novos projetos podem ser melhorados e os sistemas existentes podem ser re-capacitados, com garantia de fornecimento de energia elétrica, segurança e confiabilidade. Para linhas longas ou médias o ganho maior é na confiabilidade da linha em condições de operação em regime de emergência, altas temperaturas.

Os estudos iniciais dos supercondutores e da liga MgB_2 indicam grande potencial para aplicações, em cabos de transmissão e até com aumento da busca de um supercondutor à temperatura ambiente.⁴³

⁴³ Estudos adicionais sobre as tecnologias emergentes citadas neste capítulo podem ser feitos nas seguintes referências bibliográficas Gill (1998), IEA (2000), McDonald. e Schrattenholzer(2001), Penserini (1995), Sood (2004) e Ueda (2004)

7. Conclusões

No trabalho desenvolvido, foram identificados os principais pontos necessários para serem considerados no dimensionamento de emendas a compressão, sendo que a ABNT apresenta a NBR-7095 (“Ferragens Eletrotécnicas para Linhas de Transmissão e Subestações de Alta tensão e Extra Alta Tensão”) de forma superficial e pouco desenvolvida as regras e diretrizes para o desenvolvimento de Emendas de Cabos Condutores para Linhas de Transmissão. Verificou-se também que quase não existe literatura técnica sobre o assunto, que precisaria ser discutido com maior profundidade para satisfazer as necessidades técnicas de definição das emendas mencionadas, no âmbito da ABNT.

A simulação de elementos mostrou a concentração de tensão na região de encontro do cabo com a luva e na região em que as extremidades dos cabos de aço se encontram. A necessidade de atenção ao dimensionamento dessas regiões deve ser considerada no projeto, desenvolvimento e implantação destas emendas. O projeto deve considerar os critérios definidos no dimensionamento da emenda e estabelecer os limites dos defeitos de fabricação e as decisões de limites de não conformidade aceitáveis em campo. Dessa forma, é possível proceder ao desenvolvimento de uma metodologia de dimensionamento de emendas de compressão. A simulação com elementos finitos mostrou que, além da emenda estar com um lado trabalhando com compressão, e daí favorecendo aumento da probabilidade de ocorrência de ruptura devido ao aumento da tensão nos terminais

da emenda, o aumento da densidade de material no lado comprimido pode provocar uma diminuição da resistência elétrica deste lado e uma distribuição de corrente não homogênea na seção reta da emenda. Este aumento da corrente no lado que apresenta compressão irá provocar maior perda de potência nesta parte (efeito Joule) sem área suficiente para dissipação e poderá haver aumento de temperatura nesta região com aumento ainda maior na probabilidade de ruptura.

Em um caso mais crítico, uma falha na prensagem pode formar um vinco na emenda. Isso implica em um efeito de tensões de plastificação localizados, os quais podem fragilizar a emenda. As especificações técnicas do fabricante devem também, apresentar os limites aceitáveis para esse tipo de falha.

Outra não conformidade observada e a ser considerada nos procedimentos de construção das redes de transmissão é a descentralização da luva de alumínio colocada sobre o cabo. A corrente elétrica precisa de um comprimento de pelo menos 5 vezes o diâmetro do cabo para garantir densidade homogênea na condução de corrente. Caso isto não ocorra haverá falha da emenda.

Das análises microscópicas realizadas verificou-se que as emendas parecem ser fabricadas com procedimentos e materiais adequados e qualidade que não justificam sua falha em campo. Poderiam ser feitas análises químicas qualitativas e quantitativas adicionais que pudessem trazer informações mais detalhadas e seguras para confirmar as análises realizadas, devendo-se realizar análises com espectrômetro de massa e até em sincrotron caso necessário.

Dos ensaios de ruptura percebeu-se a significativa diferença entre as médias de tensão de ruptura de emendas retilíneas e empenadas, chegando a valores considerados inadequados nos cálculos de projeto da linha e que certamente se forem implantados irão resultar em eventos de falha. Isto ressalta a falta de procedimentos adequados de implantação em campo e de qualidade nestes procedimentos.

A análise dos modos de falha (FMEA) feita mostrou de forma concisa os fatores causadores de falhas de montagens e instalações tais como a sobrecarga operacional, o tamanho do vão, a sobre corrente elétrica e o aumento da tração na linha que devem ser revisados e ajustados para valores adequados, principalmente em interconexões críticas e de muita importância para o sistema interligado nacional com possibilidade de efeitos cascata e interrupção em larga escala.

Os usos das novas tecnologias são de grande importância devido seu diferencial de melhoria tanto técnica quanto de necessidade de pessoal com melhor capacitação e treinamento, que certamente trarão índices de qualidade maiores na implantação e monitoramento e manutenção das linhas aéreas.

As emendas implosivas à compressão têm instalação mais fácil, melhor qualidade de conexão, menor requisitos de trabalho, encadeamento mais rápido e não usam equipamentos de compressão o que fazem a tecnologia de emendas à implosão serem uma alternativa de solução para a prática de emendas em linhas de transmissão.

O monitoramento das linhas com núcleo de aço usando a inspeção eletromagnética por efeito Hall pode atender as necessidades de manutenção e inspeção em cabos com alma de aço, trazendo segurança e confiabilidade no suprimento de energia elétrica, evitando tragédias como as observadas nas recentes falhas de linhas de transmissão.

O uso de cabos termo resistentes em climas tropicais é muito interessante, em linhas curtas sem perda de confiabilidade da linha e com capacidade de transmissão aumentada de 50 % que um cabo de liga tradicional Al 1350 com a mesma característica construtiva (bitola). Para linhas longo-médias, o ganho maior é na confiabilidade da linha em condições de emergência e em altas temperaturas.

Os supercondutores também indicam grande potencial para aplicações em cabos de transmissão mas ainda permanece a necessidade de um supercondutor funcionando à temperatura ambiente.

Algumas observações são feitas:

1- O monitoramento da temperatura da linha de transmissão e a duração da operação em altas correntes e temperaturas pode permitir um melhor entendimento do estado do sistema de linha de transmissão aérea. Reduzindo o tempo de exposição em altas temperaturas para um valor mínimo pode permitir a resistência do condutor ser mantida estável e baixa por períodos maiores de operação.

2- O aumento da margem de segurança ou da área transversal do condutor em áreas críticas para assegurar a operação em altas temperaturas irá reduzir a ocorrência de falhas mecânicas. Isto também pode ser conseguido com tecnologias de cabo termo resistentes.

3- Os climas tropicais de fatores extremos podem aumentar a incidência de raios e induções de sobre tensões na linha. Eventos anormais de sobre tensões induzem falhas mais prejudiciais que envelhecimento em longo prazo.

Estudos futuros podem ser pensados para continuidade do trabalho tais como: a) Ensaio em emendas em uso e metalografia de amostras em falha, b) Ensaio dinâmico de ruptura para considerar efeitos eólicos, c) Análise com FEM dinâmica considerando efeitos eólicos e não conformidades de montagem (empenamentos e descentralizações), além de condições operacionais inadequadas com altas correntes e temperaturas, d) Retirada de emendas funcionais em campo para determinação de vida útil residual e stress (simulações) e) Necessidade de aumento da fiscalização da regulação na cadeia de suprimento, f) O uso de depreciação acelerada dos ativos por ocorrência de violações pedidas pelo operador do sistema,

g) Estudo de impactos de eventos climáticos diferentes dos planejados com ocorrência após construção, h) Indicadores de desempenho de sistemas de transmissão, i) Análise de confiabilidade e fadiga de conexões e cabos com aumento de corrente e volatilidade dos fluxos e temperaturas j) Impactos de uso de metodologia de gerenciamento de projetos e de qualidade total nas taxas de falhas dos sistemas de transmissão k) Redes de transmissão flexíveis l) Interdependência de redes de infra estrutura críticas e custos de não atendimentos, m) Outros pontos vulneráveis a não conformidade devido a aceleração de velocidade de entrega na montagem de sistemas de transmissão.

Os resultados dos estudos, simulações, pesquisas e ensaios foram analisados conjuntamente com as análises microscópicas e as conclusões obtidas mostraram a necessidade de investimentos e mudanças na regulamentação que podem trazer benefícios significativos ao sistema de energia elétrico brasileiro.

Alguns investimentos e mudanças podem ser listados:

- a) Melhoria na capacitação e fiscalização de pessoal de implantação de campo
- b) Revisão de normas de planejamento, implantação, manutenção e de operação de sistemas de transmissão,
- c) Alterações nas estruturas tarifárias para reduzir distorções de preços de transmissão,
- d) Adoção de metodologias operacionais com margens de segurança eficazes em situações de carga limite ou adversidades climáticas.

Com essas alterações podem-se obter maiores robustez, resiliência e confiabilidade do sistema interligado nacional. Deve-se lembrar que a operação interligada deste

sistema por um órgão centralizado no setor elétrico re-estruturado e competitivo é recente, requerendo-se maiores experiência e tradição.

As principais contribuições do trabalho são:

- A metodologia de análise e busca de soluções de mínimo custo em problemas complexos com as seguintes etapas: pesquisa bibliográfica nacional e internacional, pesquisa estruturada em campo, revisão de metodologias e normas de planejamento, projeto, implementação, legislação (regulação) , simulações, ensaios análise de ensaios , desenvolvimento de critérios e soluções de menor custo;

- Critério de aceitação das emendas empenadas;

- Desenvolvimento de monitoramento da condição da alma de aço dos cabos usando efeito eletromagnético;

- Sugestão de novas tecnologias para solucionar as dificuldades de campo;

- Sugestão de critérios e procedimentos para melhoria das dificuldades evitando as não conformidades.

Finalizando, os resultados obtidos foram condizentes com os objetivos propostos e trouxeram significativas contribuições aos sistemas de transmissão.

8. Anexos

Anexo 1 Procedimentos de Implantação da emendas no cabo ACSR

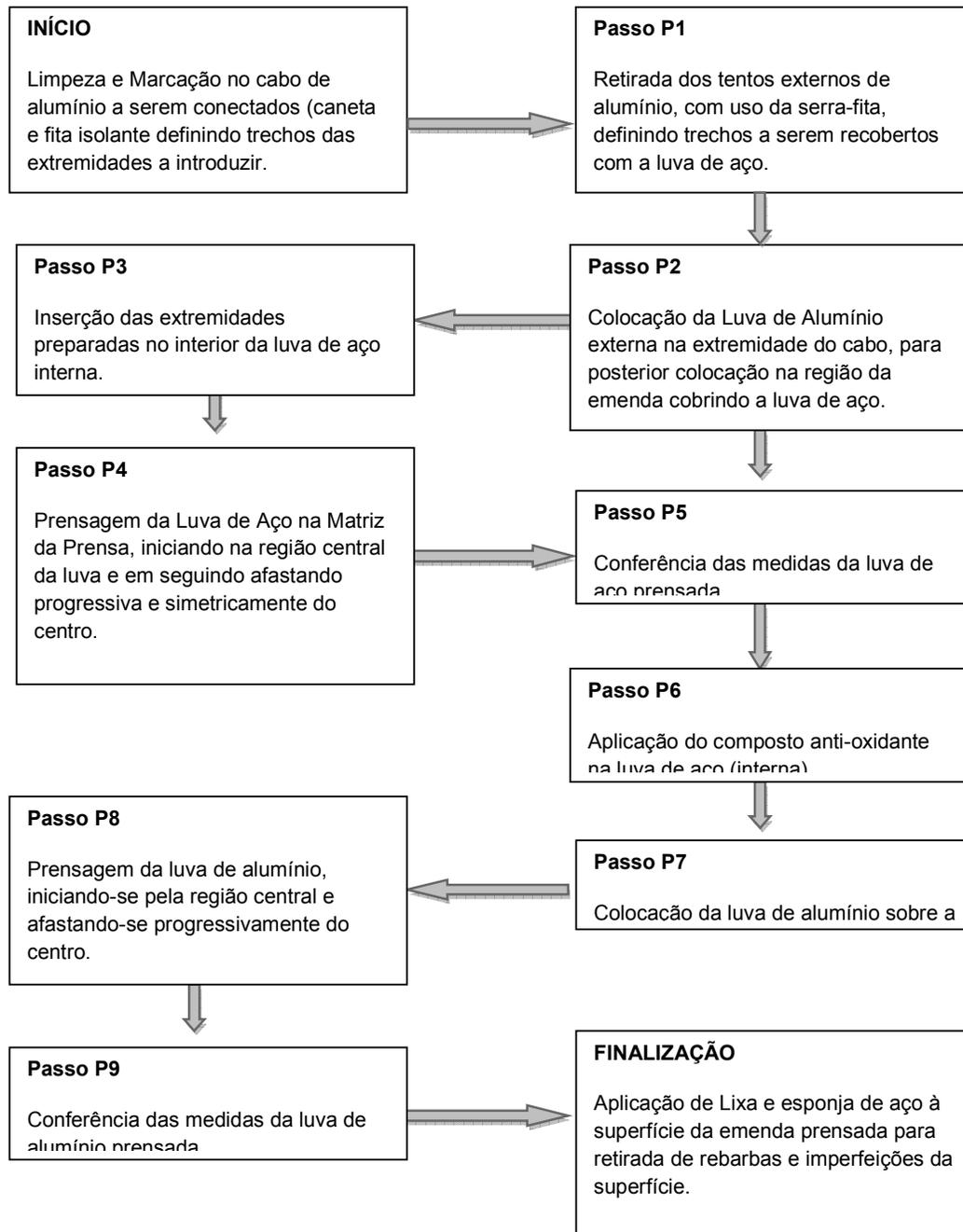


Fig. 8.1 – Fluxograma de implantação de emendas à compressão

A1.2 Processo e prática de compressão de emendas de linhas de transmissão



Fig. 8.2 Luvas de aço e de alumínio e Cabo preparado para montagem



Detalhe da marcação do fabricante na luva de alumínio para identificar o limite da área de prensagem.

Fig. 8.3 Folga nas medidas para acomodar a deformação da luva de aço



Fig. 8.4a Marcas para centralizar a luva de aço no cabo



Fig. 8.4 b Marcas para centralizar a luva de aço no cabo



Fig. 8.4 c Marcas para centralizar a luva de aço no cabo



Fig. 8.5 Conferência das medidas da luva de aço após prensagem



Fig.8.6 Marcação no cabo para centralizar a luva de alumínio



Fig.8 7 Luva de aço sem comprimir sobre a luva de aço acabada



Fig. 8.8 Colocação de composto antioxidante(Sikronil) antes da prensagem da luva de alumínio



Fig.8.9 Prensagem da luva de alumínio mostrando as marcas limites do fabricante



Fig. 8.10 Conferência das medidas da luva de alumínio após prensagem

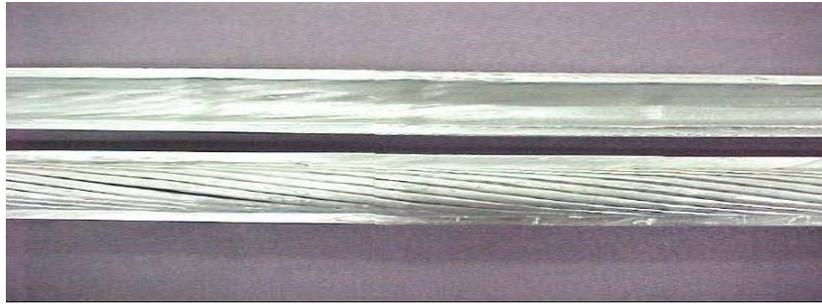


Fig. 8.11 Detalhe do corte da luva distante do cabo de alumínio interno

A2 Anexo 2- Exemplo de Manual de fiscalização de implantação de redes

DT-SUPERINTENDÊNCIA DE ENGENHARIA DA DISTRIBUIÇÃO/DPCD										
VISTORIA TÉCNICA (DEFEITOS)										
CONSTRUÇÃO / MANUTENÇÃO DE RDRA				SETOR	DATA : ___/___/___					
OBRA:				CATEGORIA:	A.F.S. Nº					
TENSÃO: KV		EXTENSÃO: KM		EDE Nº	VALOR(R\$)					
EMPREITEIRA:				TOTAL DE US:						
GRUPO	ITEM	DESCRIÇÃO	RESQ	QUANTIDADE			TOTAIS PARCIAIS			TOTAL
				1º	2º	3º	XI	X3	X10	
POSTE	01	Locação	3							
	02	Ferragem Exposta	1							
	03	Trincado	2							
	04	Posicionamento	2							
	05	Fletido	3							
	06	Prumo	3							
	07	Alinhamento	3							
	08	Engastamento / Apiloamento	3							
	09	Arrancamento / Achamento	3							
	10	Retilidade	1							
	11	Divergente do Projeto	2							
CRUZETA	12	Posicionamento	1							
	13	Nivelamento	1							
	14	Bissetriz (alinhamento)	1							
	15	Faceamento	1							
	16	Divergente do Projeto	1							
CONDUTOR	17	Tensionamento	3							
	18	Manuseio	2							
	19	Nivelamento	3							
	20	Encabeçamento	1							
	21	Jampeamento	1							
CONEXÃO E AMARRAÇÃO	22	Emenda	2							
	23	Aplicação de Pasta Anti-Oxido	3							
	24	Conexão	2							
	25	Cruzamento aéreo	3							
	26	Aplicação de Pre-Formado	2							
	27	Sequência de Fuse	3							
ISSO-LA-DOR	28	Posicionamento	1							
	29	Fixação	2							
ESTALAMENTO	30	Inexistência	3							
	31	Tensionamento (espia)	1							
	32	Ângulo de Aplicação	2							
FIXAÇÃO DE CABOS	33	Divergente do Projeto	2							
	34	Posicionamento	1							
	35	Fixação	2							
ATERRAMENTO	36	Fixação de Cabo Terra	1							
	37	Resistência Ôhmica	3							
	38	Inexistência	3							
	39	Divergente do Projeto	3							
TRANSFORMADOR	40	Posicionamento	2							
	41	Fixação	3							
	42	Aterramento da Carcaça	1							
	43	Divergente do Projeto	2							
EQUIPAMENTOS	44	Para-Raios (conjunto)	1							
	45	Chaves em Geral (conjunto)	1							
GERAL	46	Seccionamento de Cercas	3							
	47	Limpeza de Faixa de acordo com o Manual	2							
	48	Aterramento de Cercas	3							
	49	Poda de Árvores de acordo com o Manual	1							
	50	Lançamento de resíduo no solo e água em geral	1							
PONTUAÇÃO TOTAL DOS DEFEITOS (d)										0

Fig. 8.12 a Itens de Pontuação de defeitos em vistoria de redes

**NORMA TÉCNICA DE DISTRIBUIÇÃO
FISCALIZAÇÃO DE OBRAS E AVALIAÇÃO DE EMPREITEIRAS**

CONSTRUÇÃO / MANUTENÇÃO DE RDUVA

TOTAL DE US DA OBRA		SETOR	PROJETO	DATA ___/___/___						
NOME DA EMPREITEIRA										
VISTORIAS TÉCNICAS (DEFEITOS)										
GRUPO	ITEM	DESCRIÇÃO	PESO	QUANTIDADE			TOTAIS PARCIAIS			TOTAL
				1º	2º	3º	X1	X3	X10	
POSTES	01	Defeitos	2							
	02	Fletino	3							
	03	Engastamento Irregular	2							
	04	Fora do Alinhamento	1							
	05	Falta Recomposição de Piso	2							
	06	Fora do Prumo	2							
	07	Posição Inadequada do Poste DT	2							
	08									
ESTRUTURAS DE AT E BT	09	Emprego de Armação Secundária em Desacordo com o Previsto na NTD -2.02	1							
	10	Cruzeta mal Posicionada em Desacordo com o Projeto	3							
	11	Ferragem em Desacordo com o Projeto	3							
	12	Ferragem Danificada ou com Montagem Irregular	1							
	13	Isolador Danificado	3							
	14	Montagem Irregular de Isolador	1							
	15									
CONJUNTORES DE AT E BT	16	Em Desacordo com o Projeto	3							
	17	Lançado ou Tensionado Incorretamente	3							
	18	Montagem Irregular de Amarração	1							
	19	Montagem Irregular de Conexão	3							
	20	Montagem Irregular de Emenda	3							
	21	Montagem Irregular de Janpe e Flayng-Tap	1							
	22									
ILUMINAÇÃO	23	Em Desacordo com o Projeto	1							
	24	Material ou Equipamento Danificado	1							
	25	Montagem Irregular	1							
	26									
RAMAL DE LIGAÇÃO	27	Em Desacordo com o Especificado	3							
	28	Montagem Irregular de Conexão	2							
	29									
EQUIPAMENTO ANOTA TIPO	30	Em Desacordo com o Projeto	3							
	31	Materiais e/ou Equipamentos Danificados	3							
	32	Montagem Irregular de Conexão	3							
	33	Montagem Irregular de Equipamento	3							
	34									
ATERRAMENTO E ESTAIS	35	Em Desacordo com o Projeto	3							
	36	Instalação Irregular	2							
	37	Materiais Danificados	3							
	38									
ABERTURA DE FAIXA	39	Vegetação Cortada e não Retirada da Faixa	1							
	40	Corte e Poda Inadequadas	2							
	41	Larguras Inadequadas								
	42	Lançamento de resíduos em geral, no solo e na água inadequadamente	1							
	43									
PONTUAÇÃO TOTAL DOS DEFEITOS										0

Fig. 8.12 b Itens de Pontuação de defeitos em vistoria de redes

**NORMA TÉCNICA DE DISTRIBUIÇÃO
FISCALIZAÇÃO DE OBRAS E AVALIAÇÃO DE EMPREITEIRAS
CONSTRUÇÃO CIVIL DE RDUS**

TOTAL DE US DA OBRA		SETOR	PROJETO	DATA ___/___/___			
NOME DA EMPREITEIRA							
VISTORIA ADMINISTRATIVA (IRREGULARIDADES)				PESO	ATUAL X PESO	TOTAL ANTERIOR	TOTAL
GRUPO	ITEM	DESCRIÇÃO					
GERAL	01	Locação Inadequada		3			
	02	Escavações com Dimensões não Especificadas		1			
	03	Armação fora de Especificação		3			
	04	Concreto Desagregado, não Vibrado ou Composição alterada		3			
	05	Reaterro: Compactação Deficiente		3			
	06	Recomposição de Passeios, Ruas, etc Diferente da Existente		2			
	07	Rebaixamento do Lençol: Incorreto ou não Executado		3			
	08						
BANCO DE DITOS	09	Nivelamento Inadequado da Vala		3			
	10	Compactação Deficiente do Fundo de Vala		2			
	11	Não Colocação ou Colocação Deficiente de Areia de Campo		2			
	12	Diâmetro Diferente do Especificado		3			
	13	Configuração Diferente da Especificada		3			
	14	Não Utilização de Corda de Nylon		2			
	15	Luva mal Colocada ou Danificada		2			
	16	Madriçamento não Executado ou Executado de Forma Incorreta		3			
	17						
CAIXAS E CÂMARAS	18	Não Colocação de Drenos		2			
	19	Concretagem de Fundo Deficiente		2			
	20	Preparação e Instalação Deficiente de Forma e Escoras		3			
	21	Instalação Deficiente de Aros ou Tampas		2			
	22	Acabamento Deficiente de Boca de Sino, Parede, Molduras, etc		2			
	23	Execução com Dimensões Inadequadas		3			
	24						
PONTUAÇÃO TOTAL DE DEFEITOS (d)							
VISTORIA ADMINISTRATIVA (IRREGULARIDADES)							
GERAL	25	Transportes Inadequados ou Danos de Material e Equipamentos		3			
	26	Falta ou Inadequação de Uniformes		1			
	27	Limpeza Inadequada da Frente de Obra Caixas e Câmaras		1			
	28	Veículo não Identificado		1			
	29	Ferramentas ou Equipamentos em Quantidade, Tipo ou Estado de Conservação Deficientes		3			
	30						
PONTUAÇÃO TOTAL DE IRREGULARIDADES ADMINISTRATIVAS							
VISTORIA DE SEGURANÇA (IRREGULARIDADES)							
GERAL	31	EP/EPC em quantidade, Tipo e Estado de Conservação Deficientes ou não Utilização		3			
	32	Sinalização ou Isolamento da Área de Serviço Deficiente		3			
	33	Acidente ou Ato Inseguro		3			
	34	Transporte de Pessoal em Desacordo as Leis de Trânsito		3			
	35	Falta Caixa Primeiros Socorros no Local da Obra		3			
	36						
PONTUAÇÃO TOTAL DE IRREGULARIDADES DE SEGURANÇA (*)							0

Fig. 8.12 c Itens de Pontuação de defeitos em vistoria de redes

**NORMA TÉCNICA DE DISTRIBUIÇÃO
FISCALIZAÇÃO DE OBRAS E AVALIAÇÃO DE EMPREITEIRAS
CONSTRUÇÃO CIVIL DE RDUS**

TOTAL DE US DA OBRA		SETOR	PROJETO	DATA ___/___/___		
NOME DA EMPREITEIRA						
VISTORIA ADMINISTRATIVA (IRREGULARIDADES)						
GRUPO	ITEM	DESCRIÇÃO	PESO	ATUAL X PESO	TOTAL ANTERIOR	TOTAL
GERAL	01	Locação Inadequada	3			
	02	Escavações com Dimensões não Especificadas	1			
	03	Armação fora de Especificação	3			
	04	Concreto Desagregado, não Vibrado ou Composição alterada	3			
	05	Reaterro: Compactação Deficiente	3			
	06	Recomposição de Passeios, Ruas, etc Diferente da Existente	2			
	07	Rebaixamento do Lençol: Incorreto ou não Executado	3			
	08					
BANCO DE DUTOS	09	Nivelamento Inadequado da Vala	3			
	10	Compactação Deficiente do Fundo de Vala	2			
	11	Não Colocação ou Colocação Deficiente de Areia de Campo	2			
	12	Dilâmetro Diferente do Especificado	3			
	13	Configuração Diferente da Especificada	3			
	14	Não Utilização de Corda de Nylon	2			
	15	Luva mal Colocada ou Danificada	2			
	16	Madrilhamento não Executado ou Executado de Forma Incorreta	3			
	17					
CAIXAS E CÂMARAS	18	Não Colocação de Drenos	2			
	19	Concretagem de Fundo Deficiente	2			
	20	Preparação e Instalação Deficiente de Forma e Escoras	3			
	21	Instalação Deficiente de Aros ou Tampas	2			
	22	Acabamento Deficiente de Boca de Sino, Parece, Molduras, etc	2			
	23	Execução com Dimensões Inadequadas	3			
	24					
PONTUAÇÃO TOTAL DE DEFEITOS (d)						
VISTORIA ADMINISTRATIVA (IRREGULARIDADES)						
GERAL	25	Transportes Inadequados ou Danos de Material e Equipamentos	3			
	26	Falta ou Inadequação de Uniformes	1			
	27	Limpeza Inadequada da Frente de Obra Caixas e Câmaras	1			
	28	Veículo não Identificado	1			
	29	Ferramentas ou Equipamentos em Quantidade, Tipo ou Estado de Conservação Deficientes	3			
	30					
PONTUAÇÃO TOTAL DE IRREGULARIDADES ADMINISTRATIVAS						
VISTORIAS DE SEGURANÇA (IRREGULARIDADES)						
GERAL	31	EP/EPC em quantidade, Tipo e Estado de Conservação Deficientes ou não Utilização	3			
	32	Sinalização ou Isolamento da Área de Serviço Deficiente	3			
	33	Acidente ou Ato Inseguro	3			
	34	Transporte de Pessoal em Desacordo as Leis de Trânsito	3			
	35	Falta Caixa Primeiros Socorros no Local da Obra	3			
	36					
PONTUAÇÃO TOTAL DE IRREGULARIDADES DE SEGURANÇA (*)						0

Fig. 8.12 d Itens de pontuação de defeitos em vistoria de redes

**NORMA TÉCNICA DE DISTRIBUIÇÃO
FISCALIZAÇÃO DE OBRAS E AVALIAÇÃO DE EMPREITEIRAS**

MONTAGEM ELETROMECÂNICA RDUIS

TOTAL DE US DA OBRA		ORGÃO	PROJETO	DATA ___/___/___			
NOME DA EMPREITEIRA							
VISTORIAS TÉCNICAS (DEFEITOS)							
GRUPO	ITEM	DESCRIÇÃO	PESO	ATUAL X PESO	TOTAL ANTERIOR	TOTAL	
PUXAMENTO DE CABOS BANCOS DE DUTOS	01	Perfildos: Falta ou Inadequação da Composição da Parte Serrada, Má Fixação Localizada Indevida Serrada, Má Fixação, Localização Indevida Fora do Prumo	2				
	02	Aterramento: Conexões mal feitas /Desacordod com o Projeto	3				
	03	Emendas e Terminações: Montagem Inadequada	3				
	04	Arranjo de Cabos em Desacordo com o Projeto	1				
	05	Não Vedação das Bocas dos Dutos Utilizados	2				
	06	Falta Identificação dos Acessórios	1				
	07	Ausência de Mandrilamento ou Feito Incorretamente	3				
	08	Ausência ou Uso Inadequado de Lubrificante (TALCO)	3				
	09	Velocidade ou Esforço do Puxamento Incompatível	3				
	10	Falta de Identificação das Fases	2				
	11	Defeito no Isolamento Causado pelo Puxamento	2				
	12	Uso de Duto não Especificado	1				
	13	Corte de Cabo com Comprimento Inadequado	2				
	14	Posicionamento Inadequado de Equipamento					
	15	Não Recomposição da Pintura de Equipamentos Danificados no Armazem ou Transporte	1				
	16	Não Recomposição de Pisos Danificados na Instalação de Equipamentos	1				
	17	Danificação de Buchas de Equipamentos	2				
	18						
PONTUAÇÃO TOTAL DE DEFEITOS (d)							
VISTORIA ADMINISTRATIVA (IRREGULARIDADE)							
GERAL	19	Falta ou Inadequação de Uniformes	1				
	20	Attudes Incoerentes Perante Público eou Fiscalização	3				
	21	Limpeza Inadequada da Frente de Obra, Caixas e Câmaras	2				
	22	Condução Inadequada de Veículos e Máquinas	3				
	23	Utilização de Veículos e Uniformes sem Identificação	1				
	24	Falta de Equipamentos, Materiais e Pessoal	3				
	25	Transporte e Armazenamento Inadequado	3				
	26	Uso das Bobinas em desacordo Com a Programação de Puxamento de Cabos	2				
	27	Cadastramento Incorreto -	3				
	28	Frente de Obra Mal Dimensionada	1				
29							
PONTUAÇÃO TOTAL DE IRREGULARIDADE ADMINISTRATIVA (e)							
VISTORIA DE SEGURANÇA (IRREGULARIDADE)							
GERAL	30	Sinalização ou Isolamento da Área de Serviço Deficiente	3				
	31	EPI/EPC em Quantidade, Tipo e Estado de onservação Deficiente ou Ato Inseguro	3				
	32	Acidente ou Ato Inseguro	3				
	33	Transporte de Pessoal em Desacordo as Leis de Trânsito	3				
	34	Falta Caixa Primeiros Socorros no Local da Obra	3				
	35						
PONTUAÇÃO TOTAL DE IRREGULARIDADES DE SEGURANÇA (e)							0

Fig. 8.12 e Itens de pontuação de defeitos em vistoria de redes

**NORMA TÉCNICA DE DISTRIBUIÇÃO
FISCALIZAÇÃO DE OBRAS E AVALIAÇÃO DE EMPREITEIROS**

QUADRO DE AVALIAÇÃO POR DESEMPENHO DA EMPREITEIRA

ITEM	DESCRIÇÃO	VALORES		
		1º SEMESTRE	2º SEMESTRE	MÉDIA ANUAL
01	Número da Obra			
02	Quantidade US			
03	Data Recebimento da Obra			
04	Total de Defeitos Técnicos (d)			
05	Índice Técnico (ITC)			
06	Total de Irregularidade Administrativa			
07	Índice Administrativo (Iad)			
08	Total de Irregularidade de Segurança do Trabalho			
09	Índice de Segurança do Trabalho (IST)			
10	Índice de Falha (IF)			
11	Qualificação por Conceito em Função do Índice de Falha (QF)			
12	Número de Dias Gastos na Execução da Obra (T)			
13	Número de Dias Previstos para Execução da Obra (P)			
14	Índice de Atraso de Obra (IAO)			
15	Minuto Previsto em Desligamento (MB)			
16	Minutos de Atrasos nos Desligamentos (M)			
17	Minutos de Atraso de Desligamento (IAM)			
18	Índice de Atraso (IA)			
19	Qualificação por Conceito em Função do Índice de Atraso (QA)			
20	Coef. de Qualidade (CQ)			
21	Coef. de Pontualidade (CP)			
22	Grau de Desempenho (GD)			
23	Avaliação de Desempenho (AD)			

Fig. 8.13 Evolução temporal dos Índice de Pontuação de desempenho das empreiteiras

FISCALIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE EMPREITEIRA

ENGENHARIA DE TRANSMISSÃO		SETOR	DATA ___/___/___	
OBRA:		CATEGORIA:	A.F.S. Nº:	
TENSÃO KV	EXTENSÃO: KM	EDE Nº:	VALOR(R\$):	
EMPREITEIRA:		TOTAL DE US:		
Item	Descrição	Nota	Peso	Pontuação
1	Estrutura de funcionamento da empreiteira			
1.1	Instalação física da empresa		0,1	
1.2	Estrutura organizacional da empresa		0,1	
1.3	Veículos em boas condições, com identificação		0,2	
1.4	Apoio logístico do escritório a obra		0,1	
1.5	Apoio financeiro do escritório a obra		0,1	
1.6	Apoio técnico do escritório a obra		0,2	
Somatório máximo de pontos para o item 01			0,8	
2	Aspectos Técnicos			
2.1	Gerenciamento			
2.1.1	Programação de serviços		0,3	
2.1.2	Cumprimento dos prazos programados		0,5	
2.1.3	Dimensionamento de pessoal		0,4	
2.1.4	Dimensionamento de máquinas e equipamentos		0,4	
2.1.5	Distribuição das tarefas		0,3	
2.1.6	Distribuição dos recursos (humanos e técnicos) nas tarefas		0,3	
2.1.7	Apoio logístico na obra		0,3	
2.1.8	Observação às normas de execução e aos projetos		0,4	
2.1.9	Desempenho do engenheiro residente		0,3	
2.2	Pessoal			
2.2.1	Qualificação da mão de obra		0,5	
2.2.2	Relacionamento do pessoal		0,3	
2.2.3	Apresentação no trabalho		0,3	
2.2.4	Forma de condução das tarefas		0,4	
2.2.5	Manuseio de máquinas e equipamentos		0,4	
2.3	Máquinas e Equipamentos			
2.3.1	Estado de conservação (pneus, acessórios e etc)		0,4	
2.3.2	Condições mecânicas		0,4	
2.3.3	Desempenho das mesmas		0,3	
2.3.4	Adequação aos serviços e tarefas programadas		0,3	
2.4	Ferramental			
2.4.1	Estado de conservação		0,4	
2.4.2	Dimensionamento para os serviços		0,3	
2.4.3	Adequação aos serviços e tarefas programadas		0,3	
Somatório máximo de pontos para o item 02			7,5	
3	Aspectos Administrativos			
3.1	Utilização de equipamentos e sinalização de segurança		0,2	
3.2	Desempenho do pessoal nas áreas de risco		0,2	
3.3	Observação às normas de medicina do trabalho		0,2	
3.4	Ato lesivo ao patrimônio físico ou moral da CELG		0,2	
3.5	Registro de empregados e recolhimento dos encargos sociais e ISS		0,2	
3.6	Devolução de materiais e equipamentos ao setor responsável da CELG		0,3	
3.7	Tempo médio de vínculo empregatício		0,2	
3.8	Comportamento profissional compatível perante empregado da CELG		0,2	
Somatório máximo de pontos para o item 03			1,7	
TOTAL MÁXIMO DE PONTOS			10,0	

CONTROLE DE VISTÓRIAS				
DATA	VISTÓRIAS TÉCNICAS		VISTÓRIAS ADMINISTRATIVAS	
	PELA CELG	PELA EMPREITEIRA	PELA CELG	PELA EMPREITEIRA

Obs.: A nota atribuída a empreiteira deverá variar entre 0 (zero) e 10 (dez)

Conceituação:
Ruim: Pontuação total entre 0 e 25 pontos
Regular: Pontuação total entre 26 e 50 pontos
Bom: Pontuação total entre 51 e 75 pontos
Ótimo: Pontuação total acima de 76 pontos

Fig. 8.15 Totalização da Pontuação de desempenho de empreiteiras

9. Referências bibliográficas

ABNT (1981) NBR-7095/1981, “Ferragens Eletrotécnicas para Linhas de Transmissão e Subestações de Alta tensão e Extra Alta Tensão”

ABNT (1985) NBR-5422. Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica

ABNT (1986a) NBR 5471 Condutores elétricos R.J.

ABNT (1986b) NBR8800 – Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios (método dos estados limites), ABNT, Rio de Janeiro

ABNT (1988a) NBR6123 – Forças devidas ao vento em edificações, ABNT, Rio de Janeiro

ABNT (1988b) NBR 7270 Cabos de alumínio com alma de aço para linhas aéreas - especificação

ABNT (1988c) NBR7271 – Cabos de alumínio para linhas aéreas – especificação

ABNT (2000) NBR8800 – Projeto de revisão (março de 2006) – Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios (método dos estados limites), ABNT, Rio de Janeiro

ABNT (2003) NBR8681 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento

Allan, R. e Billinton, R. (1988), Reliability assessment of large electric power systems, Kluwer, Boston

Allan, R. e Billinton, R. (1996), Reliability evaluation of power systems, Springer, Berlin

Allan, D. Et all. (2006), Managing Availability, Quality and Security in a Restructured Electricity Industry with Reference to the Australian National Electricity Market Hugh Outhred Proceedings of the 39th Hawaii International Conference on System Sciences

Almeida, P., e Prada R. Esquemas de Proteção de Sistemas de Energia Elétrica EPUB Eletrobrás 2005 – ISBN 85 -87098 -56 X

Alvarado, F. (2006) Understanding locacional reserves and reliability needs in electricity markets; IEEE Proceedings 39th Hawaii Conference on Systems Science

ANEEL (2002) Resolução 666

ANEEL (2005)- Características e requisitos técnicos básicos das instalações de transmissão, Edital de leilão Número 001/2005

ANEEL (2007)-Agência Nacional de Energia Elétrica. www.aneel.gov.br. Acesso em 15 de janeiro de 2010. Resolução Normativa N° 270 de 26 de junho de 2007.

Angst, C. e Kirchner, C.(2005), Custos de Transporte Imputado a Geradores e Eficiência Locacional, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba,PR, Outubro 2005

ANSI C119 4 (1998) seção 4.4.3

ASM (2004), Metals Handbook Vol. 9 metallographic and microstructures

ASTM (1998) Standard Specification for Concentric-Lay-Stranded Aluminum Conductors, Coated-Steel Reinforced (ACSR) ASTM B 232, B232M

Awerbuch, S. e Berger, M. (2003) IEA Applying portfolio theory to EU electricity planning and policy making.

Baldick, R. e Kahn, E. (1993). "Transmission Planning Issues in a Competitive Economic Environment," IEEE Transactions on Power Systems, v.8, no.4

Bajay, S.(2003), Desafios Metodológicos e Organizacionais no Planejamento da Expansão do Setor Elétrico Brasileiro e na Elaboração das Projeções da Matriz Energética Brasileira, in: Book of Abstracts and Proceedings of the 5th Latin - American Congress: Electricity Generation and Transmission, São Pedro,SP, Brasil, 2003.

Bajay, S. (2006) Integrating competition and planning, a mixing institutional model of the Brazilian electric power sector; Energy May June 2006

Baylis, C. e Hardy, B. (2007) Transmission and distribution electrical engineering, Terceira Edição, Elsevier

Berlijn, S. e Roeflofs, G. (1997) Type testing of cables and accessories— KEMA Nederland B.V. , High Voltage Laboratory

Beshir, M. et al. (1996) "Comparison of two bulk power adequacy assessment programs: TRELSS and COMREL," Proceedings of the 14th IEEE Transmission and Distribution Conference, Los Angeles, California, September 1996

Billinton, R. (2001) "Transmission system reliability evaluation incorporating HVDC links and FACTS devices," Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE

Billington, R. (1996) Power system reliability evaluation CRC Taylor Press

Blumsack, S. (2006) Network Topologies and Transmission Investment Under Electric-Industry Restructuring: Carnegie Mellon University PhD Thesis

Bradley, R. and Myers, S. - Principles of Corporate Finance, Irwin McGraw Hill, USA, 2000

Braunovic, M. et al. (2007) Electrical contacts Fundamentals, technology and applications, Taylor Francis

Buechler, J. (2005) "Transmission planning in a market based environment,"
In Proc. 2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1850-1852

Burgazzi, L. (2007) Thermal hydraulic passive system reliability based design approach, Reliability engineering and system safety, Elsevier

Bushnell, J. e Stoff , S. (1996) Transmission and Generation Investment

In a Competitive Electric Power Industry Berkeley PWP30

Callister, W. (2007), Materials science and engineering – An introduction 7ed. Wiley

Chao, H. e Huntington, H. (1998) Designing Competitive Electricity Markets, Kluwer, Boston

Chowdhury, A. et all. (2005) “Bulk Transmission Equipment Outage Performance Reporting at Mid-Continent Area Power Pool”, in Proceedings of Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS-2004) Conference.

Cigré (1979) Recommendations for the evaluation of the lifetime of transmission line conductors – CIGRE WG 22 – 02 ELECTRA 63 Marco 1979

Clayton, C. et all. (2006) Analytical characterization of aluminum steel and super alloys, Taylor &Francis

Costello, G. e Miller, R, (1980) Static Response of Reduce Rotation Rope, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 106, No. EM4, pp. 623-631

Crisp, J. (2003) Asset management for electricity transmission Utilities: investigation into factors affecting and their impact on the network - Tese de Doutorado Brisbane, Australia

Datla, S. (2007) Probabilistic Models for Life Cycle Management of Energy Infrastructure Systems Waterloo, Ontario, Canada, 2007

Di Troia G. et all. (2005) Teoría y aplicación de los conectores, una guía para el diseño y la especificación de conexiones, FCI Electrical

Dobson, B. et all. (2004) "Complex Systems analysis of series of blackouts: cascading failure, criticality, and self-organization", Bulk Power System and Control, Cortina d'Ampezzo, Italy

Donatelli, S. et all. (2005) Critical utility infrastructural resilience RITICAL UTILITY INFRASTRUCTURAL RESILIENCE CESI (Italy), KUL (Belgium), CNR-ISTI (Italy), CNIT (Italy), LAAS-CNRS (France), FCUL (Portugal)

Dowlatabadi-G, Energy infrastructure and security, Annual review environment and resources

Edris, A. (2007) Addressing transmission grid complexity using advanced technological concepts, EPRI, Palo Alto, IEEE.

Eletrobrás (1987) Diretrizes básicas para projeto de linhas de transmissão PII, Extra alta tensão (345 a 740kV) Vol. 3 Especificações

Endrenyi, J. (1999) Impact of maintenance strategy on reliability, Relatório final IEEE/PES impact of maintenance strategy on reliability of the reliability, risk and probability applications subcommittee Equipment", accepted by 35th North American Power Symposium, Rolla, Missouri.

EPE (2006) Empresa de Pesquisa Energética, Plano Decenal de Expansão, Rio de Janeiro, 2006

EPRI (1979) Transmission Line Reference Book – Wind induced conductor Motion
EPRI research Project 792

EPRI (1981) Project UHV; Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above,
Electric Power Research Inst., Palo Alto,

EPRI (2003) Integrated Engineering and Economic Operation of Power Systems.
Palo Alto, California

Eto, J. (2004) Transmission-Planning Research & Development Scoping Project
European Comm. (2006) Study on the technical security rules of the European
electricity network Feb. 2006

Eydeland, A. e Wolyniec, K (2003) Energy and Power Risk Management, John Wiley
& Sons, New York, NY.

Farrell, A. et all. (2004) Energy Infrastructure and security – Annual Rev. Environm.,
29

Fink, D. G. e Beaty, W. (2006) Standard Handbook for electrical engineers Section
14- Transmission Systems, McGraw Hill, 4^a. Edição

Finon, D. e Midttun, A, (2004) "Reshaping European Gas and Electricity Industries:
Regulations, Markets and Business Strategies", Ed. Elsevier, London, England.

Fitzgerald, F. et al. (1987) A novel design for medium voltage URD cable joints, IEEE Transactions on power delivery vol. pwr. 2

Fonseca, B. e Cimini Jr, C. (2003). Análise de vida útil de cabos condutores de linhas aéreas de transmissão. XVII SNPTEE Uberlândia 11/2003

Fuchs, R., (1979) Transmissão de energia elétrica Linhas aéreas LTC

Frate, J. et al. (2000) Evaluation of overhead line and joint performance with high definition thermography IEEE Transactions on power delivery vol. 3 n2

Galiana, F. et al. (2009) Electric energy systems: analysis and operation. Taylor & Francis

Gaudry, M. et al. (1998) Increasing the ampacity of lines using homogeneous compact conductors, Electricité de France, Hydro-Québec CANADA 1998

Gellings, C. e Amin, S. (2006) The North American power delivery system: balancing market restructuring and environmental economics with infrastructure security; Energy, Elsevier.

Gill, P. (1998) Electrical Power Equipment Maintenance and Testing, Marcel Dekker, New York,

Goldemberg, J. e Villanueva, L. (1998) Energia, meio ambiente e desenvolvimento

Gracceva, F. et al. (2007) Security of energy supply: Comparing scenarios from a European perspective

Gregory, B. e Lindsey, G. (1988) Improved accessories for super tension cable, BICC cables UK report

Gomez, T. Rothwell, G. (2003), "Electricity Economics Regulation and De-regulation", IEEE Wiley, USA

Hall, J. e Deb, A. (1988) Prediction of overhead transmission line ampacity by stochastic and deterministic models IEEE Transactions on power delivery vol. 3 n. 2

Hardy, C. et al. (1998) Increasing the ampacity of overhead lines using homogeneous compact conductors, Cigré 22-201

Heptonstall, P. (2007), A review of electricity unit costs estimates WP UK energy research center. UKERC

Hogan, W. (1992) "Contract Networks for Electric Power Transmission," Journal of Regulatory Economics v. 4, no. 3, pp.211-242

Hogan, W. (1993) "Electric Transmission: A New Model for Old Principles", The Electricity Journal, March.

Hogan, W. (2003) Successful Market Design ("SMD") and Failure Diagnosis: Blackouts and Lampposts in Regulating Electricity Markets, Center for Business and Government, Oct. 2003

Humphrey, B. (2005) Kema, Balancing Performance cost and risk – asset management for transmission and distribution

IEA (2000), Experience Curves for Energy Technology Policy, OECD/IEA, Paris.

IEA (2004), Transmission Network Reliability in Competitive Electricity Markets
Annual Review of Environment and Resources (2004) Vol. 29: 421-469
(doi:10.1146/annurev.energy.29.062403.102238

IEEE (1990) Recommended Practice for Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York

IEEE (1992) Guide for the design and installation of cable systems in substations

IEEE (2004) Guia para Inspeção da Construção de Linhas de Transmissão do International Electric and Electronic Engineering – IEEE (IEEE Guide for Inspection of Overhead Transmission Line Construction- IEEE Std 1441-2004.

IEEE Gold Book (2007) IEEE Recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power system. ANSI/IEEE Std 493-2007,

IEEE (2008), Initial review of methods for cascading failure analysis in electric power transmission systems, PES, PITTSBURGH, PA USA

Ilic, M. et all. (1998), "Power systems restructuring, engineering and economics", Kluwer Academic Publishers, MA. USA, 1998

Ilic, M e Skantze, P (2001) Valuation, Hedging and speculation in competitive Electricity markets, Kluwer academic publishers

Ilic, M (2004) Introducing electric power into a multidisciplinary curriculum for network industries, Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, PA, USA; IEEE Transactions on Power systems

Jannuzzi, G. (2000), Políticas públicas para eficiência e energia renovável no novo contexto de mercado: uma análise da experiência recente dos EUA e do Brasil , Editora Autores Associados, Campinas, S.P.

Jesus, V. e Teixeira, J. (2005), Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão - Histórico de Análises, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba,PR, Outubro 2005.

Joskow, P. (1997) "Restructuring, Competition and Regulatory Reform in the U.S. Electricity Sector", Journal of Economics Perspectives, Vol. 11, No. 3, pp. 119-138.

Joskow, P. e Tirole J. (2000), "Transmission Rights and Market Power on Electric Power Networks", Journal of Economics, Vol. 31, No. 3, pp. 450-487.

.

Joskow, P. e Tirole, J. (2004) Reliability and Competitive Electricity Markets MIT Cambridge WP

Joskow, P. (2005) Patterns of Transmission Investment By WP 05-004 March 2005

Joskow, P. (2005), "Regulation of Natural Monopolies", Center for Energy and Environmental Policy Research, prepared for the Handbook of Law and Economics, A.M. Polinsky and S. Shavel, editors. Elsevier, B.V.

Joskow, P. e Tirole J. (2005), "Merchant Transmission Investment", The Journal of Industrial Economics, Vol. LIII, No. 2

Joskow, P. (2006) "Markets for Power in the United States: An Interim Assessment", The Energy Journal, Vol. 27, No. 1, pp. 1-36.

Kammen, D. e Pacca, S. (2004) Assessing the costs of electricity, Annu. Rev. Environ. Resour. 2004. 29:301–44 doi: 10.1146/ annu. rev.energy.

Karady, G. et all. (2006) Electric power generation transmission and distribution Taylor & Francis

Kaye, R. (1995) F. F. Wu, P. Varaiya, "Pricing for system security," IEEE Trans. On Power Systems, vol. 10, no. 2, May 1995.

Keithley (2004), Low level measurements handbook, precision Dc current, voltage and resistance measurements 6th edition

Kiessling, F et all. (2003). Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction (Power Systems)

Komarovsky, A. (2003). Physics of strength and fracture control 2003 CRC Taylor

Krawitz, A. et all. (1982) Measurement of stress in the interior of solids

with neutrons, in Residual Stress and Stress Relaxation, E. Kula and V. Weiss (eds.), Plenum, New York, 1982, pp. 139–155

Kumar, A. Et all. (2005), “Congestion Management in Competitive Power Market: A Bibliographical Survey”, Electric Power Systems Research (76), pp. 153-164.

Kumar, E. e Chaturvedi, S. (2008) Maintenance of industrial Equipment Degree of certainty with fuzzy modeling using predictive maintenance
Reliability Engineering Centre, IIT Kharagpur, Kharagpur, India

Leite, F.(2005) Amostragem Fora e Dentro do Laboratório, Editora Alínea, 2005

Lima, L. (2007) Aprimoramento da Metodologia Nodal para a Tarifação do Uso do Sistema de Transmissão, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2007.

Luenberger, D. (1997) Investment Science, Wiley, N.Y.

Mandell, C. (2005) Learning from the blackouts –Market learning - Transmission system security in competitive electricity markets IEA

Markowitz, H. (1952) Portfolio selection, Journal of Finance 7 (1) (1952),

Markowitz, H. (1990) Foundations of portfolio theory, World Scientific, N.Y. U.S.A

Mc McCullough, C. (2003) 477 kc mil 3M brand composite conductor compression joint evaluation mechanical holding strength – 3M report

McDonald, A. e Schrattenholzer, L. (2001) Learning rates for energy technologies, Energy Policy 29 (4) (2001)

McCrae, A. et all. , Data mining techniques to assess the condition of high voltage electrical plant National Grid Company Delft University of Tech. Noun InfraCore (United Kingdom) (The Netherlands)

Michael, M. et all. (2007) Elongation of overhead line conductors under combined mechanical and thermal stress, IEEE International conference on condition monitoring and diagnosis.

Ministério de Minas e Energia (2007), Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético; Empresa de Pesquisa Energética; Plano Decenal de Expansão de Energia 2007/2016

Muriti, P. (2008), Estatística Básica, editora Saraiva, São Paulo, S.P.

Moubray, J (1997) Reliability-Centered Maintenance, Industrial press, N.Y.

Murray, B. (1988) “Electricity Markets, Investment performance and analysis”, John Wiley and sons, W.S, England

Nagamani, H. (1998) Investigation of failure modes of XLPE cables and joints, IEEE Transactions on power delivery, vol. 13, n 3.

Norma Din. 48085 – “Conector de pressão resistente a tração”

NERC (2009) North American Electric Reliability Corporation, Disponível em <http://www.nerc.com>

Newbery, D. Et all. (2004) Core Indicators for Determinants and Performance of Electricity Sector in Developing Countries, Power System Economics, Wiley.

Newberry D. Et all. (2005), “Electricity Transmission: An Overview of Current Debate”, Utilities Policy (13).

Newberry D. Et all. (2009), “Allocating Transmission to Mitigate Market Power in Electricity Networks”, The RAND Journal of Economics, Vol. 35, No. 4

Mohasco, J. (2007) et all. “Reliability modeling of electricity transmission systems: An adaptation of traditional reliability methods” [Disponível]: coewww.rutgers.edu/ie/research/working_paper/paper_2005-012.pdf

Nuttall, J. et all. Fuel mix diversification incentives in liberalized electricity markets: a Mean-Variance Portfolio Theory Approach1

Oakland, J. (1994) Gerenciamento da qualidade total , Nobel

O'Connor, P. Et all. (2002) Practical Reliability Engineering, 4th Edition

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (2010), Plano Anual da Operação Energética – PEN 2008 –Janeiro de 2010.

ONS. (2008) Submódulo 15.12: Apuração mensal das parcelas variáveis referentes à disponibilidade de instalações da Rede Básica. Aprovação ONS em 31/01/2008.

Oren, S. et. all (1995) Nodal Prices and Transmission Rights: A Critical Appraisal, University of California Energy Institute Working Paper, PWP-025.

Oren S. et all. (2000), "Flow-Based Transmission Rights and Congestion Management", The Electricity Journal, pp. 38-58.

Outhred, H, (2006) Managing availability, quality and security in a restructured electricity industry with reference to the Australian National Electricity Markets, IEEE Proceedings 39th Hawaii Conference on Systems Science

Pansini, A. (2004) Power, transmission and distribution, Dekker CRC second edition

Pansini, A. (2004) Transmission Line Reliability and Security , Fairmont Press.

Paithankar, Y (1997) Transmission Network Protection (Power Engineering, 2) CRC

Pasini, C. (2006): The 8th IEEE International Conference on AC and DC Power Transmission

Pasini, C et all. (2010) High temperature current cycle test of implosive connectors on ACSS conductor

Pavlik, B. (1989) Tecnologia da ferragem para linhas de AT e EAT –, Edições Gente

Peerenboom, J. (2001) Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructures interdependencies, IEEE Control Systems Magazine, Dec. 2001.

Penserini, P. Et all. (1995) Live working diagnosis of joints of overhead lines, 12th International Conference on Electricity Distribution, vol. 3 pp. 33-41.

Pesch, E. e Von Olshausen (1999) Cable system for high and extra high voltage, ed. Publicis MCD Verlang

Piwko, R. Et all. (2004) "The effects of integrating wind power on transmission system planning, reliability, and operations phase 2," GE Energy, Schenectady, NY, Feb. 2004.

Piwko, R. Et all. (2007) What comes first? Transmission planning and competitive electricity market operation for delivery of wind energy, IEEE Power & energy magazine

Post D. (1995) Applications of auctions laws and pricing mechanism for the interchange of electric power IEEE Transactions on power delivery

Rao, B. (1886) Handbook of condition monitoring, Elsevier, Oxford, B. (1886)

Ramakumar, R. (1993) Engineering Reliability: Fundamentals and Applications, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey

Restrepo, C e Zimmerman, R. (2006), The next step: quantifying infrastructure interdependencies to improve security, International Journal of Critical Infrastructures 1475-3219 March 31, 2006, v2 i2-3, p215

Runde, M. et al. (2004) Compression connectors for stranded aluminum, IEEE Power delivery

Sauer, I. “Um novo modelo para o setor elétrico brasileiro” Universidade de São Paulo – Programa Interunidades de Pós graduação em Energia USP/IEE dezembro de 2002,

Seevers, O. (1995) Management of Transmission and Distribution Systems, Fairmont Press, Lilburn

Save, P. (1995) Substation reliability—practical application and system approach, IEEE Transactions on Power Systems 10 (1)

Shahidehpour, M., et al. (2002) “Market Operations in Electric Power Systems: Forecasting, Scheduling and Risk Management”, IEEE Press and Wiley-Interscience, New York

Schweppe, F. et al. (1988), “Spot Pricing of Electricity”, Norwell, MA: Kluwer

Sheblé, C. et al. (2006), Power systems, Taylor & Francis

Sheldon, F. et al. (2003) Energy Infrastructure Survivability, Inherent Limitations, Obstacles and Mitigation Strategies, IASTED Int’l Conference PowerCon. New York, NY, 2003

Shrestha G. e Fonseka P. (2007), "Optimal Transmission Expansion under Different Market Structures", IEEE Generation Transmission and Distribution

Silva, E. (2001), Formação de preços em mercados de energia elétrica, Porto Alegre, Editora Sagra Luzzatto

Simões Filho, S. (2006), Análise de árvore de falhas considerando incertezas na definição dos eventos básicos UFRJ 2006

Sood, V. (2004), HVDC and Facts Controllers. Kluwer Academic Publisher, 2004

Southwire Company (1994), Overhead Conductor Manual, first edition

Tabors R. e Monroe R. (1991), Planning for future uncertainties in electric power generation an analysis of transactional strategies for reducing carbon and sulphur emissions. IEEE Trans. Pwr. App. Systems PAS -6(4).

Taylor, R. (2006), Developing Portfolio Optimization Models Taylor R, The Math Works News & Notes, www.mathworks.com

Teixeira Jr., M.(2001), Cabos de energia; Editora Ficap

Tennbakk, B. (2000), Power Trade and Competition in Northern Europe, Energy Policy, 28.

Thue, W. (1999), *Electrical Power Cable Engineering*, Marcel Dekker, New York

Timsit, R. (2003), *Energy Loss in electrical connectors on power lines*; Timron review publication

Tolmaskim, M.; et all. (2005), *Geração de energia elétrica no Brasil*, Ed. Interciência

Turvey R., Anderson D. (1977), *Electricity Economics* World Bank Research Publication John Hopkins University Press Baltimore and London.

Ueda, S. et all. (2004), *Up rating of transmission lines – reconductoring ACSR by thermo resistant TACSR and TACIR (invariable)* IEEE PS Transmission and distribution conference & exposition Latin America

Vojdani, R. (1996) *Transmission Access issues* IEEE Transactions power systems

Wang, J. et all. (2008) *The Integrity of ACSR Full Tension Splice Connector at Higher Operation Temperature*; IEEE Transactions on +Wang, J.J.-A.+Lar Power Delivery.

Wang, J. et all. (2011) *The Lifetime Estimate for ACSR Single-Stage Splice Connector Operating at Higher Temperatures* IEEE Power delivery

Wang Y. et all. (2008), “Pareto Optimality-Based Multi-Objective Transmission Planning Considering Transmission Congestion”, *Electric Power Systems Research*.

Willis, H. e. Rackliffe, W. (1994) *Introduction to Integrated Resource T&D Planning*, ABB Guidebooks, Raleigh, NC.

Willis, H et al. (2001) Aging Power Delivery Infrastructures. New York: Marcel Dekker

Willis, H et al. (2001) Aging Power Delivery Infrastructures, Marcel Dekker, New York, 2001.

Willis, L e Rackliffe, G. (1994) Introduction to Integrated Resource T&D Planning, ABB Guidebooks, ABB Electric Systems Technology Institute, Raleigh, NC,

Wilson R. (2002) "Architecture of Power Markets", *Econometrica*, Vol. 70, No. 4,

Yoon, Y. e Ilic, M. (2001) "Price-Cap Regulation for Transmission Objectives and Tariffs", *IEEE*, pp. 1052-1057.

Yishan, L. (2005) Short-term and long-term reliability studies in deregulated power system. Doctoral dissertation, Texas A&M University.

Zavadil, R. Et al. (2007) Queuing up – interconnecting wind generation into the power system (2007) *IEEE Power &energy Magazine*

Zeng, S. (1997) Discussion on maintenance strategy, policy and corresponding maintenance systems in manufacturing, *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 55 (1997) (2).

Zeng, F. et al. (2006) Transmission investment and expansion planning in re-structured electricity market, *Energy* 31, 954.

Zhang, W. e Billinton, R. (1997) "Application of Adequacy Equivalent Method in Bulk Power System Reliability Evaluation," paper apresentado no encontro da IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Berlin.

Zhang, Z et al. (2003) Risk-based Maintenance Optimization for Transmission
IEEE Power systems

Zhong, W. (1986) Bend resistant transmission splices development in China,
Transmission & distribution

Zimmerman, R. e Robert F. Wagner (2004) Decision-making and the vulnerability of
interdependent critical infrastructures; Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE
International Conference on

Zimmerman, R. et al. (2007) Risk-management and risk-analysis-based decision
tools for attacks on electric power, Risk Analysis 27 (3).