

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CARLOS SIMOES PEREIRA

**PROCESSO DE ATTACHMENT, DENSIDADE DE RAIOS E A OCORRÊNCIA
DE FLASHOVER EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ELETRICIDADE**

TD: 13/2014

UFPA / ITEC / PPGEE

Belém - PA

Dezembro de 2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Pereira, Carlos Simoes Pereira, 1943-
Processo de attachment, densidade de raios e a ocorrência de
flashover em Linhas de Transmissão de Eletricidade / Carlos
Simoes Pereira, Pereira. – 2014,

Orientadora: Brígida Ramati Pereira da Rocha, Rocha
Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica, Belém, 2014.

1. Eletricidade Atmosferica. 2. Descargas
Elétricas - proteção. 3. Linhas elétricas - Proteção. I. Título.

CDD – 22. ed. 551, 563

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CARLOS SIMOES PEREIRA

**PROCESSO DE ATTACHMENT, DENSIDADE DE RAIOS E A OCORRÊNCIA
DE FLASHOVER EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ELETRICIDADE**

TD: 13/2014

Tese submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.
Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.
Orientadora: Profa. Dra. Brígida Ramati Pereira da Rocha.

UFPA / ITEC / PPGEE
Belém - Pará
2014


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**PROCESSO DE ATTACHMENT, DENSIDADE DE RAIOS E A OCORRÊNCIA
DE FLASHOVER EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ELETRICIDADE**

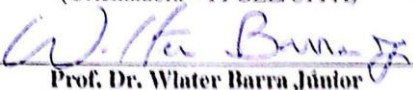
AUTOR: CARLOS SIMOES PEREIRA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA
APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS
DE ENERGIA ELÉTRICA.
APROVADA EM 19 / 12 / 2014

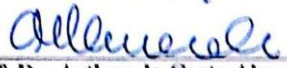
BANCA EXAMINADORA:




Prof.ª Dr.ª Brigida Ramati Perelra da Silva
(Orientadora – PPGE/UFPA)




Prof. Dr. Walter Barra Júnior
(Avaliador Interno – PPGE/UFPA)



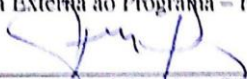
Prof. Dr. Arthur da Costa Almeida
(Avaliador Externo ao Programa – CCAST/UFPA)




Prof. Dr. Nildsen Fernando Lisboa da Silva
(Avaliador Externo ao Programa – CCAST/UFPA)



Prof.ª Dr.ª Valquíria Gusmão Macedo
(Avaliadora Externa ao Programa – FEE/UFPA)



Prof. Dr. José Pissolato Silva
(Avaliador Externo – UNICAMP)



Prof. Dr. Willamy Moreira Frota
(Avaliador Externo – UFAM)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(COORDENADOR DO PPGE/ITEC/UFPA)

AGRADECIMENTOS

Ao Arthur pela constante disposição de discutir e ajudar; à Luiza pela acolhida e o suco ou Coca-Cola que aliviam a sede; ao Diogo, Emilio e Tereza, a família, pelo incentivo, apesar da idade; ao prof. Walter Barra pelo incentivo; ao prof. Pissolato pelo incansável companheirismo e a minha orientadora Brigida Ramati cujas criticas me fizeram melhorar cada vez mais a coerência do texto.

Na verdade existem muitos outros a agradecer; mas eles sabem!

Oh! Raios

*Das brumas do tempo,
esmaecidos lampejos,
lembram sua ação.*

*Nos grandes ribombos
através das paredes da caverna,
o coração gelava.*

*No corisco do relâmpago,
pensamentos atávicos
lembra-nos
dos constantes perigos.*

*Mas na luminosidade
do ocaso,
a radiante esperança do futuro
assoma.*

Carlos Simoes Pereira

RESUMO

Esta tese refere-se ao uso de modelos de *attachment* de líderes (Leader Progression Model – LPM) para estimativa da distância de salto, que, junto com dados de densidade de raios como coletado pelo sistema de detecção de raios do SIPAM, são usados para estimar a taxa de *flashover* em linhas de transmissão de eletricidade na Amazônia.

O modelo de progressão de líder desenvolvido nesta tese é denominado ModSalto, que, para estimar a distância de salto: 1- integra a densidade linear de cargas elétricas devida ao líder, proporcional a prospectiva corrente de primeira descarga (1^o *stroke*) I_p , para determinar o campo elétrico produzido pelo líder descendente na estrutura sob estudo (para-raios, arestas, condutores, etc.); 2 – integra a distribuição imagem do líder descendente, fazendo uso da característica de poder das pontas como fator de estímulo e intensificação do campo elétrico devido a *streamers* nas partes aguçadas das estruturas sob estudo, para temporizar o momento do processo de *attachment*.

O gatilho para o líder descendente, por hipótese, se deve a ejeção aleatória de pacotes de cargas elétricas em domínios turbulentos no interior das nuvens que recebem energia por processos de cascata da turbulência geral, e o comportamento do líder descendente, deve obedecer à equação da força de Lorentz, no espaço de campos cruzados elétrico devido às nuvens a cima e o campo magnético da Terra, que obriga as cargas do líder a desenvolverem movimentos cicloidais que podem explicar a natureza tortuosa do trajeto do líder descendente.

Com o objetivo de formalizar dados consistentes de densidade de raios é feita uma reanálise do conjunto de dados coletado pelo LLS SIPAM de outubro de 2006 a julho de 2008 na região amazônica, com cerca de 3 milhões de eventos, comparando-os com dados de torres instrumentadas para evidenciar-se sua qualidade e usabilidade.

Dados de elevação de terreno do SRTM da NASA são usados para gerar fórmula do raio de atração (R_a) das estruturas passíveis de serem

atingidas por raios e para gerar formulas de área de atração, usadas para quantificar o numero de raios que provavelmente atingirão determinada estrutura, baseado no valor de densidade de raios (raios/km²/ano) na área em estudo.

Palavras-chave – Distancia de salto, densidade de raios, *flashover*, raio de atração.

ABSTRACT

This thesis refers to the use of leaders attachment model (Leader Progression Model - LPM) in the estimation of striking distance values and jointly use of lightning density data gathered by a LLS System to estimate the flashover rate of electricity transmission lines in the Amazon region.

The leader progression model developed here is called ModSalto, and to estimate the striking distance, it: integrate the linear density of the leader electric charge proportional to the prospective lightning first stroke (I_p) to estimate the electric field produced by the descending leader, in the tip of the structure under study (arrester, electric conductor, etc.); makes integration of the image leader charge distribution and makes use of the power of tips as a stimulus and intensification factor for the electric field due to the streamers on the edge of the structure under study, to time the attachment process.

The trigger of the descending leader is hypothesized to be on behalf of packets of charges turbulent domains in cloud, and the leader's behavior on the descending path is hypothesized to obey the equation of the Lorentz force in the space of movement of electric charges of the leader, influenced by crossed electric field due to the electrification of the clouds and the Earth's magnetic field, which imprints a cycloid motion on the leader' tip electric charges which may explain the stepped and tortuous nature of the downward leader.

The LFR parameters (Lightning Flashover Rate) is presented as an estimate of the probability of occurrence of flashover induced by lightning on an electric transmission line, that may be derived by a defined parameter J_v (Vulnerability Window) as a quantifying factor to the probability of insufficient protection provided by the EGM model to the transmission line, protected against lightning with use of shielding conductors (shield wire).

With the aim to get a usable lightning density data, we do a reanalyze of the dataset of occurrence of lightning collected by LLS SIPAM, from October 2006 to July 2008 in the amazon region, with over 3 million hits, comparing them with data from instrumented towers allowing an assessment of the quality of such data.

Terrain elevation data (SRTM) from NASA are used to generate attraction radius (Ra) formulas that takes into account the height of the structures and jointly with Log Normal distribution parameters describing the statistical behavior of first pulse current values (stroke) of the lightning, as estimated by LLS SIPAM, to generate a summation or integration area of attraction formula, used in the quantification of the number of lightning which are likely to hit a given structure, depending on the density of lightning (lightning / km² / year) at the study site.

Keywords: Striking distance, lightning density, flashover, radius of attraction.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 – Representação pictórica de um corte de eco típico de radar meteorológico indicando os mecanismos de convecção e vento	23
Fig. 2 – Registro de fases de uma descarga ou <i>flash</i> em função de variações no campo elétrico: B = Breakdown; I = Intermediário; L= Líder; R = Stroke; M = Continuing Current + m componentes; J/K = Processos J e K segundo Clarence e Malan	25
Fig. 3 – Desenho representando a cronologia de um flash (conjunto de uma ou varias descargas em um mesmo canal)	26
Fig. 4 – Movimento turbulento gerando dominios em cascata ..	28
Fig. 5 - Condições iniciais com a direção x coincidindo com o Sentido nuvem-terra	29
Fig. 6 – Trajetorias cicloides em campos elétrico e magnético cruzados, para algumas velocidades de ejeção de cargas elétricas	31
Fig. 7 – Desenho representando trajetória cicloidal de líder descendente com velocidade inicial $v_0 = 1.5 \frac{E}{B}$, submetido a campos Elétrico e Magnético, cruzados e comparado com descarga real, no detalhe à direita.	32
Fig. 8 – O campo elétrico do líder descendente.	41
Fig. 9 – O campo elétrico do <i>streamer</i> /líder ascendente.	43
Fig. 10 – Comparação da formula gerada pelo ModSalto com Formulas de diversos autores	45
Fig. 11 – Mapa de densidade de raios, índice ceraunio e eficiência de detecção	48
Fig. 12 – Densidade de raios na região de Belém do Pará	48
Fig. 13 - Histogramas do <i>dataset</i> SIPAM	52
Fig. 14 - Curva cumulativa inversa (1-CDF) das amplitudes de corrente de primeira descarga (stroke) para os raios negativos dos dados SIPAM	54

Fig. 15 – A competição pela atração de um líder descendente varia segundo o tipo de ambiente com campo (a); edifícios (b) ou presença de altas torres.	58
Fig. 16 – Densidade de raios e curvas de nível da Serra de Tiracambu próximo a Rondon do Pará. As curvas verdes delimitam áreas até 100m e as amarelas, áreas acima de 200m. Os tons pink são a densidade de raios no local, que atinge quase 10 raios/km ² /ano.	59
Fig. 17 – Dados de altura, corrente e densidade de raios na forma superfície 3D	60
Fig. 18 – Gráfico das formulas para raio de atração estão plotadas para valores de corrente de 10, 20, 30, 40 e 50 quilo Ampere (kA) (sequencia das curvas de baixo para cima). A formula de Rizk não leva em conta o valor da corrente, portanto só tem uma curva.	62
Fig. 19 – Formação da área de atração das estruturas	63
Fig. 20 – Principais Sistemas de Geração/Transmissão na Amazônia	68
Fig. 21 – EGM Analítico	70
Fig. 22 – Mapa de densidade de raios da Amazônia em raios/km ² /ano	84
Fig. 23 – Curva cumulativa da corrente I _p no formato log-log	85
Fig. 24 – Torre de 62m	86
Fig. 25 - Torre > 76m	87
Fig. 26 – Coordenadas cilíndricas	92
Fig. 27 - Condições iniciais do movimento	95
Fig. 28 - Trajetória de partículas em campos cruzados como calculadas pelas formulas.	97
Fig. 29 - Traçado do gráfico das curvas trochoides como pontos na superfície de um roda girante.	98
Fig. 30 – EGM Analítico	99
Fig. 31 - Vista geral do Sistema	106
Fig. 32 - Rack dos equipamentos	106
Fig. 33 - Gaiola de Faraday	107

Fig. 34 – Torre de radio e televisão RBA; esquema de medição Com monitores de corrente Pearson	108
Fig. 35 - Torre de radio e televisão RBA (a) com a localização dos elementos da instrumentação, como a sala de medições em (b) e a área de instalação dos sensores em (c).	109

LISTA DE TABELAS

Tab. 1 - Resumo estatístico geral do LLS SIPAM	50
Tab. 2 - Resumo estatístico do numero de stroke em um flash com dados do mundo todo	50
Tab. 3 - Valores de exatidão posicional do LLS SIPAM ...	51
Tab. 4 - Resumo comparativo dos dados do LLS SIPAM .	53
Tab. 5 - Visualização da LFR em Períodos de tempo	74
Tab. 6 - Valores de LFR para as travessias	89
Tab. 7 - Valores de distancia de salto para as Travessias	89
Tab. 8 - Modelo de planilha Excel para calculo	90
Tab. 9 - Lista dos equipamentos	107

LISTA DE SIGLAS

AC	Corrente Alternada
A/D	Analógico/Digital
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
ASIM	Atmosphere-Space Interactions Monitor
ATD	Arrive Time Difference
C	Coulomb (unidade de carga elétrica)
CB	Cumulus-Nimbus
CESI	Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano Giacinto Motta
CG	Cloud to Ground
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques ou International Council on Large Electric Systems
CSM	Combined Charge Simulation Method
DC	Corrente Contínua
DF	Direction Finder
DSP	Digital Signal Processor
EGM	Electro-Geometrical Method
EIWG	Earth-Ionosphere Wave Guide
ELF	Extremely Low Frequency (3 a 3.000 Hz)
EMTP	Electromagnetic Transients Program
FDTD	Finite Difference Time Domain
fps	Frames per second
GPS	Global Positioning System
kHz	kilo Hertz
IC	Intra Cloud
IEC	International Electrotechnical Comission
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
LEP	Lightning Electron Precipitation
LF	Low Frequency (30 a 300 KHz)
LFR	Lightning Flashover Rate
LIS	Lightning Imaging Sensor
LLS	Lightning Location System
LMS	Lightning Mapper Sensor
LORAN	Long Range Navigation
LPM	Leader Progression Model
LPATS IV	Lightning Processor And Tracking System IV
LT	Linha de Transmissão de energia elétrica
MATLAB	Matrix Laboratory (Software de matemática aplicada)
MHD	Magneto Hidro Dinâmica
MINOS	Main Injector Neutrino Oscillation Search
ModSalto	Modelo para calculo da distancia de salto
MoM	Método dos Momentos
NBR	Norma Brasileira
Np/m	Neper por metros (atenuação)
ns	nano segundo
pT	Pico Tesla
RBA	Rede Brasil-Amazônia de televisão
RF	Rádio Frequência

RNSS	Range Normalized Signal Strength
S	Siemens (unidade de condutância)
SFERIC	Radio Atmospheric (ruído atmosférico)
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SIPAM	Sistema de Proteção da Amazônia
SPD	Surge Protection Device
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas
Sprite	Air spirit (de comedia de Shakespeare)
SSW	Sudden Stratospheric Warming
TCS	Traveling Current Source
TE	Transverse Electric
TEM	Transverse Electric Magnetic
TGF	Terrestrial Gamma Ray Flash
TL	Transmission Line
TLE	Transient Luminous Events
TM	Transverse Magnetic
TOA	Time Of Arrive (usado no sistema GPS)
UTM	Universal Transverse Mercator
UTC	Universal Time Coordinated
VLF	Very Low Frequency (3 a 30 KHz)
V/m	Volt por metro (unidade de campo elétrico)
WLS	Weatherbug Lightning Sensor

SUMARIO

Capitulo I INTRODUÇÃO	18
1.1 PROBLEMA, MOTIVAÇÃO E OBJETIVO	18
1.2 PLANO DA PESQUISA	20
1.3 ESTRUTURA DA TESE	21
Capitulo II ELETRICIDADE NA ATMOSFERA	23
2.1 INTRODUÇÃO	23
2.2 QUEBRA DE RIGIDEZ DIELETRICA DO AR ATMOSFÉRICO	24
2.3 CRONOMETRANDO OS RAIOS	26
2.4 A HIPÓTESE DE INICIO DO LÍDER DESCENDENTE	27
2.5 A BASE DAS OBSERVAÇÕES PRATICAS	28
2.6 CAMPOS ELÉTRICO E MAGNÉTICO CRUZADOS ..	29
2.7 O PROBLEMA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES	33
2.8 CONCLUSÕES	34
Capitulo III O DESENVOLVIMENTO DO LÍDER, ATTACHMENT & PROTEÇÃO	35
3.1 A PROTEÇÃO CONTRA OS RAIOS	35
3.2 O MODELO ELETRO GEOMÉTRICO (EGM)	35
3.3 MODELOS DE PROGRESSÃO DE LÍDER (LPM)	36
3.4 O MODSALTO E A FÍSICA DA MODELAGEM	40
3.5 CAMPO ELÉTRICO DE CONDUTORES ENERGIZADOS	43
3.6 FORMULAS PARA A DISTANCIA DE SALTO	44
Capitulo IV CARACTERÍSTICAS DOS RAIOS NA AMAZÔNIA ORIENTAL	47
4.1 INTRODUÇÃO	47
4.2 A ESTATÍSTICA DOS RAIOS	49
4.3 GRÁFICOS & CURVAS ESTATÍSTICOS NA PROTEÇÃO CONTRA RAIOS	52
4.4 CURVA CUMULATIVA NA PROTEÇÃO CONTRA RAIOS	53
4.5 CONCLUSÕES	55
Capítulo V CARACTERISTICAS DOS RAIOS COM A ALTURA	57
5.1 ESTRUTURAS ALTAS E RAIOS	57
5.2 O RAIOS DE ATRAÇÃO	58

5.3	COMPARAÇÃO DE FORMULAS DO RAIÓ DE ATRAÇÃO	61
5.4	A ÁREA DE ATRAÇÃO	63
5.5	DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DA ÁREA DE ATRAÇÃO	64
5.6	CONCLUSÕES	65
Capitulo VI	APLICAÇÕES NA ÁREA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA & DISCUSSÕES	67
6.1	INTRODUÇÃO	67
6.2	SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E GERAÇÃO NA AMAZÔNIA	68
6.3	METODOLOGIA APLICADA À PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	69
6.4	EGM ANALÍTICO E JANELA DE VULNERABILIDADE	69
6.5	TAXA DE FLASHOVER DEVIDO A RAIOS LFR (LIGHTNING FLASHOVER RATE)	71
6.6	METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DA LFR	72
6.7	VISUALIZAÇÃO DE RESULTADOS	74
6.8	DISCUSSÕES FINAIS	75
	REFERENCIAS	77
APÊNDICES		
	Apêndice A: A Vulnerabilidade de LT's a incidência de raios	83
	Apêndice B: Movimento de Cargas em campos Elétrico e Magnético	91
	Apêndice C: Forma analítica do EGM	99
	Apêndice D : Forma de saída de parâmetros do ModSalto	101
	Apêndice E: Termos Técnicos usados na Pesquisa de Raios	102
	Apêndice F: Torre Instrumentada RBA	104

Capítulo I INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA, MOTIVAÇÃO E OBJETIVO

A atividade elétrica da atmosfera, que gera a ocorrência de raios é um fenômeno importante no campo da pesquisa de descargas atmosféricas (raios), por conta de desfechos catastróficos que pode causar à vidas humanas, a dispositivos e tecnologias dos quais dependemos em nível intenso, bem como o suprimento de energia elétrica e ao funcionamento de dispositivos baseados em eletrônica, por exemplo.

A motivação primária desta tese visa o estudo do processo de *attachment* do líder intermitente que parte da nuvem acima, até o encontro com *streamers* ou líderes de conexão, usando um modelo que permite estimar parâmetros como a distancia de salto e o estudo do movimento do líder através da atmosfera, com a aplicação desse conhecimento na avaliação do estado de proteção de linhas de transmissão de energia elétrica, entre outras estruturas.

Esse conhecimento permitira à avaliação de prováveis insuficiências de cobertura de dispositivos de proteção, tais como cabos de blindagem (*shield wire*), e estimar um valor de taxa de *flashover* devido a raios em linhas de transmissão de energia elétrica.

No entanto, aplicações na área de proteção contra raios somente são possíveis com a existência de estatísticas de ocorrência de raios no local onde o estudo está sendo efetuado. Assim sendo este trabalho também faz uma análise, para extração de dados estatísticos de um conjunto de dados coletado por uma rede de detecção de sensores do tipo LPATS IV, o LLS (Lightning Location System) do SIPAM.

As atividades de pesquisa correlacionadas a este trabalho podem ser traçadas desde a época da atividade do autor nas Centrais Elétricas do Para S/A como engenheiro atuante nas áreas de Projeto e Construção de Redes de

Distribuição; Telecomunicações; Operação, Proteção e Análise de Sistemas Elétricos de Alta Tensão. Depois como engenheiro no sistema de proteção da Amazônia onde operou, instalou e deu manutenção ao sistema LLS do SIPAM com participação em experimento de raios induzidos na Amazônia, entre outros que o motivou ao mestrado em sensores de raios. Ainda no SIPAM na área de meteorologia, trabalhou com radar meteorológico onde pôde fazer comparações de ocorrência de raios com dados de radar meteorológico.

Atualmente vem desenvolvendo atividades em um projeto de instrumentação da torre de TV da RBA (Rede Brasil Amazônia de Televisão), usando monitores de corrente Pearson com software *Picoscope* e câmeras de média velocidade (1000 fps) para medição direta dos raios atraídos por essa torre em um projeto liderado pela Prof. Dr. Brigida Ramati, também orientadora deste trabalho. No anexo F há uma descrição do referido Projeto.

Os resultados desta pesquisa têm aplicação direta na área de sistemas de proteção contra raios (SPDA), aplicado às linhas de transmissão de energia elétrica e outros tipos de estruturas e também no apoio e análise dos dados de raios que serão coletados na futura torre instrumentada da RBA.

As contribuições desta pesquisa são:

- a – Desenvolvimento de modelo LPM, denominado ModSalto usado como uma ferramenta de pesquisa e apoio a análise de dados coletados pela instrumentalização da torre RBA;
- b – Análise do movimento de partículas eletrificadas sob campos elétrico e magnético na modelagem da trajetória de líderes;
- c – Definição e formalização de metodologia para estimativa da insuficiência de proteção, considerando o modelo EGM e estimativa da taxa de *flashover* induzida por raios (LFR), através do parâmetro janela de vulnerabilidade (J_v) para avaliar a vulnerabilidade de LT's à descargas elétricas;
- d- Geração de fórmulas de raio de atração (R_a) e área de atração (A_e) a partir de dados de raios na Amazônia oriental, coletados pelo LLS da Rede de Detecção de Raios do SIPAM, para uma melhor avaliação da vulnerabilidade das LT's à raios na região;

- e – Caracterização estatística de raios na Amazônia oriental com comparação de parâmetros estatísticos com dados obtidos por K. Berger na Suíça e S. Visacro em Minas Gerais [1],[2].

1.2 PLANO DA PESQUISA

O plano desta pesquisa, e sua continuação com a operacionalização da instrumentação da torre RBA, possui três linhas básicas:

1 - O conhecimento da física do líder intermitente (ou líder descendente) no momento de seu início e seu trajeto da nuvem ao solo, culminando na determinação de uma distancia de salto, que influencia a correta localização de dispositivos de proteção, ou de outra maneira, a probabilidade de atingimento de determinado ponto geográfico situado na estrutura a ser protegida ou considerada na análise/simulação; a física da trajetória do líder, por hipótese esta contida na expressão da força de Lorentz e na turbulência de Kolmogorov, tendo como ferramenta o modelo ModSalto e os dados operacionais da Torre RBA.

2 – O conhecimento das características dos raios na área de estudo, através de sistemas LLS que fornecem estatísticas sobre estimativa de parâmetros de descargas como correntes, tempo de subida e tempo de descida do pulso de corrente das descargas, necessários no projeto de proteção; localização geográfica do evento com razoável precisão e densidade necessária para estimativa da probabilidade de atingimento por raios da estrutura em estudo/análise.

3 – Aplicação desse conhecimento para estimar o período de desligamento de uma linha de transmissão de energia elétrica por ocorrência de *flashover* induzido por raios e a aplicação também, com sua adaptação, para uso na proteção das estruturas localizadas nas áreas urbanizadas de Belém, bem como áreas de características campestres na periferia.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

O material apresentado nesta tese foi agrupado como um desenvolvimento contínuo do assunto, consubstanciado por apêndices que detalham melhor a origem desses desenvolvimentos. No entanto, cada capítulo é em si um elemento independente que precisa e pode ser ampliado futuramente, cada um com seus desafios específicos.

No capítulo II é mostrado o ambiente elétrico que envolve a Terra, a eletrosfera, e subsequentemente o processo de eletrificação por triboeletricidade nos ciclos de convecção dentro das nuvens; da quebra de rigidez dielétrica que leva aos raios e onde se introduz as hipóteses de formação de domínios de cargas; o processo de transferência de energia à esses domínios através de transferência em cascata da turbulência Kolmogoroviana, além do trajeto cicloidal da trajetória de cargas em campos elétrico e magnético cruzados.

No capítulo III são revistos os esquemas de proteção atrelados ao modelo de progressão de líder, o processo de ionização que, com a conexão com líderes ascendente cria o canal inicial do raio, propiciando a primeira descarga ou *stroke*. A matemática e a física que estão por trás desses fenômenos são abordadas.

No capítulo IV as características das descargas na Amazônia oriental são analisadas com o uso de um *conjunto de dados* oriundo do SIPAM, o Sistema de Proteção da Amazônia, que entre 2006 e 2008 operou um LLS denominado Rede de Detecção de Raios do SIPAM.

Nesse capítulo observou-se que esses dados estão condizentes com a pesquisa atual, restando mais pesquisa e acumulação de dados principalmente com o uso de torres instrumentadas para elucidar a característica de valores mais altos das amplitudes das correntes de pico observadas, talvez uma consequência da intensa atividade convectiva no equador terrestre.

No capítulo V as Características das descargas em função do relevo do terreno são analisadas, com o *conjunto de dados* SIPAM sendo sobreposto a modelo de elevação de terreno do SRTM da NASA, onde se mostra que as maiores densidades de raios ocorrem nos pontos mais altos. Nesse capítulo são geradas fórmulas de raio de atração e área equivalente, parâmetros

usados na quantificação da frequência anual de atingimentos na estrutura considerada.

No capítulo VI são abordados as necessidades da proteção de linhas de transmissão de energia elétrica, com ênfase a uma nova metodologia recentemente publicada pelo autor e colegas de pesquisa (2014) [3] que estima a proteção de LT's com auxílio dos parâmetros taxa de *flashover* induzida por raios (LFR) e janela de vulnerabilidade (J_v) além de uma inovadora apresentação em períodos das taxas calculadas que mais claramente especifica o espaço de tempo em que há grande probabilidade de desligamentos por *flashover*.

Nos apêndices estão apresentadas a metodologia para estimativa de LFR, o desenvolvimento de campos elétrico e magnético cruzados, a derivação de uma forma de EGM analítico, uma explicação dos termos em inglês usados na ciência de raios; e uma descrição do projeto de instrumentação da torre de TV RBA com 134m até a ponta do para-raios.

Capítulo II ELETRICIDADE NA ATMOSFERA

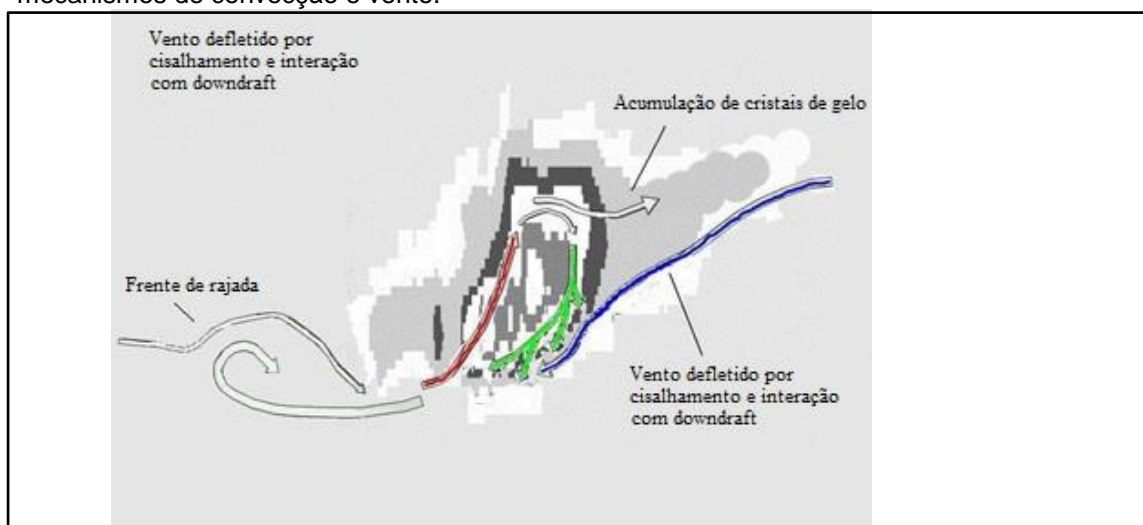
2.1 INTRODUÇÃO

Os processos atmosféricos que permeiam o desenvolvimento desta tese estão confinados no ambiente entre o céu e a Terra, a biosfera terrestre onde exercem sua principal influencia, e serão focados neste capítulo, estabelecendo-se as bases em que a pesquisa será desenvolvida.

A Terra é continuamente atingida por energia eletromagnética e matéria eletrizada, emitidas pelo sol (vento solar e ejeção de massa coronal), que se chocam com o escudo protetor provido pelo campo magnético da terra. Internamente a esse escudo ocorrem vários processos de eletrificação que influenciam inclusive o nosso clima. Assim a atmosfera que envolve a nossa biosfera, o minúsculo nível em que vivemos, são constantemente influenciados por descargas elétricas, com diferentes intensidades.

Um mecanismo específico, a nuvem e seu motor interno convectivo acumula eletricidade no seu interior e o descarrega sobre a superfície sob diversas formas, sendo o raio o mais poderoso. Na Figura 1 é usado um corte típico de uma célula convectiva como detectada pelo radar meteorológico do SIPAM [4], em Belém, usado aqui para ilustrar o processo convectivo com a localização dos canais de *updraft* e *downdraft*.

Fig. 1 – Representação pictórica de um corte de eco típico de radar meteorológico indicando os mecanismos de convecção e vento.



Fonte: Pereira et al. 2012, [4]

Importante na física de eletrificação das nuvens, é o canal *updraft* por onde ar úmido e quente sobe até se condensar em gotículas de água supercongelada e pequenos cristais de gelo. Do constante atrito desses dois constituintes (gotículas de água e cristais de gelo) agitados pela energia da convecção as gotículas ganham elétrons e os cristais perdem: é a Triboeletricidade, ou eletricidade de contacto [5].

A convecção é um poderoso circuito turbulento que sobe no canal de *updraft* e inicialmente forma um vórtice no entorno do *updraft* e na fase madura da convecção, desce pelo canal *downdraft*, produzindo chuva e outros fenômenos associados. Na curva de cima desse circuito os cristais de gelo, mais leves e eletrificados positivamente, começam a acumular-se na parte superior, na chamada bigorna da nuvem; mas alguns descem pelo canal de *downdraft* e são de novo carregados pelo canal de *updraft* juntamente com novos suprimentos de ar quente. Já as gotículas de água, carregadas negativamente se distribuem na parte mediana da nuvem [6]. A nuvem adquire assim uma configuração bipolar de eletricidade.

Algumas experiências com balão meteorológico conseguem detectar pacotes de eletricidade positivas nas áreas mais baixas, os quais supomos, são efêmeros, pois como já se viu, provavelmente são constituídos de cristais de gelo arrastados pelo canal de *downdraft*, ou mesmo cargas positivas através do canal *updraft*, que devido a forte turbulência devem ser rapidamente reciclados.

Essa seria a estrutura tripolar advogada por alguns pesquisadores e uma das inúmeras hipóteses desenvolvidas ao longo do tempo para explicar a eletrificação das nuvens.

2.2 QUEBRA DE RIGIDEZ DIELÉTRICA DO AR ATMOSFÉRICO

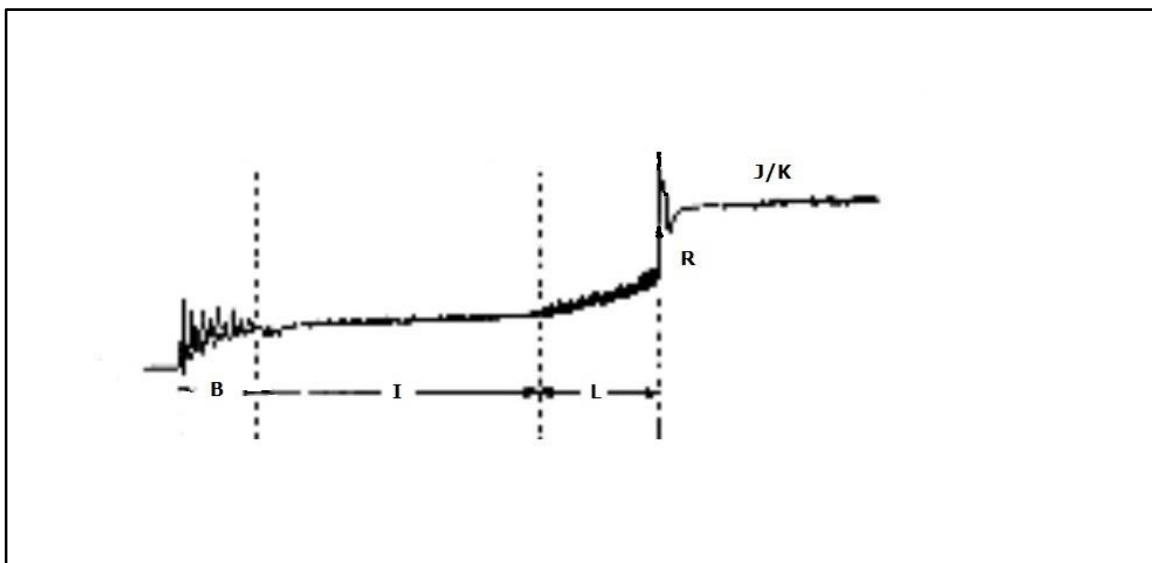
Antes de ocorrer a primeira descarga ou primeiro *stroke* vários processos concorrem para esse final, embora em nível muito especulativo, é reconhecido por vários autores [7],[8],[9] a seguinte sequência de eventos:

- 1- Um processo de quebra inicial de rigidez dielétrica ocorre dentro da nuvem;

- 2- Um líder (pacote de cargas elétricas) surge na base da nuvem e inicia seu deslocamento pelo ar na maioria dos casos em direção a terra;
- 3- Com a aproximação do líder intermitente, sobe o campo elétrico na ponta de varias estruturas localizadas abaixo da área de influencia do líder descendente, que emitem estruturas de *streamers*, sendo que em algumas dessas estruturas os *streamers* passam a condição de líderes ascendentes e se dirigem ao encontro do líder descendente.
- 4- Quando o campo combinado do líder descendente e o campo do líder ascendente ou do *streamer* atingem um valor de quebra, ocorre um salto direto com conexão ou *attachment* desses dois elementos, levando ao inicio da primeira descarga ou *stroke*.

A Figura 2 é composta por diversas medições de variações de campo elétrico efetuados principalmente por Clarence e Malan [7] na África do sul, que se supõe estejam ligadas aos processos indicados a cima, mas até o momento não há comprovação física dos mesmos, sendo de especial interesse o processo que causa o inicio do líder descendente.

Fig. 2 – Registro de fases de uma descarga ou *flash* em função de variações no campo elétrico: B = Breakdown; I = Intermediário; L= Líder; R = Stroke; M = Continuing Current + m componentes; J/K = Processos J e K segundo Clarence e Malan.



Fonte: Clarence & Malan, 1957, [7]

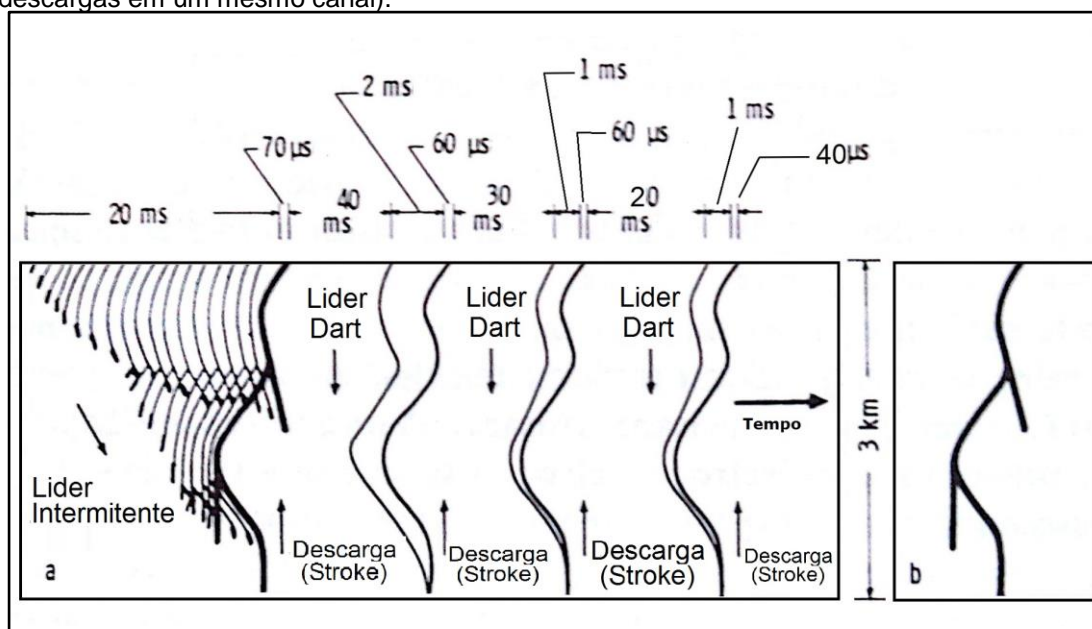
2.3 CRONOMETRANDO OS RAIOS

No final da propagação do líder descendente há o processo de *attachmente* com *streamer* ou líder ascendente oriundos do prospectivo ponto de atingimento, seja um para-raios, as arestas de um edifício ou mesmo em campo aberto.

Começa então a primeira descarga (1^o *stroke*), que pode ser seguido por descargas menores, com a drenagem das cargas negativas ou positivas concentradas nos domínios de cargas elétricas no interior das nuvens, neutralizando-os; eventos que em media duram pouco mais de uma centena de milissegundos.

No processo de estudo de raios é comum o uso de uma câmera denominada *streak-camera*, que imprime movimento ao filme e em consequência, registra a cena como uma sequencia continua de eventos discretos facilitando a analise das diversas fases do desenvolvimento de um raio.

Fig. 3 – Desenho representando a cronologia de um flash (conjunto de uma ou varias descargas em um mesmo canal).



Fonte: Uman, 1987, [10]

A Figura 3 mostra uma adaptação de uma figura de Uman [10] com o desenho de uma captura (exposição) por uma *strike-camera* da sequencia de

uma hipotética descarga completa ou flash, com uma descarga principal e três descargas subsequentes (a média registrada em detecções pelo mundo), somando um tempo médio de 114,23 milissegundos. É uma existência fugaz, mas mortal e danosa.

A já referida Figura 3 mostra em (a) o desenvolvimento gradativo no tempo e em (b) a forma do raio como seria visto por olhos humanos.

Tem sido documentado o fato de um mesmo lidar gerar múltiplos pontos de *attachment* como reportado por Cummins [11], baseado na hipótese de que o relevo do terreno é o propiciador desses eventos, enquanto outros [12] vêm a origem desses eventos na natureza do canal do líder.

Em função desse fato os grandes grupos de pesquisa que estudam raios, como o CIGRE chegaram a sugerir a adoção de um fator (1,5 a 1,7) para correção da densidade de raios usado na determinação do número de raios que provavelmente atingirão uma estrutura [13]. Também há autores que foram além e outros que consideram elevadas essas expectativas de correção [14].

2.4 A HIPÓTESE DE INICIO DO LÍDER DESCENDENTE

O início do líder descendente tem hipóteses que granjearam alguma aceitação, mas que minguaram posteriormente, como é o caso da hipótese de Gurevich [15], de que raios cósmicos forneceria o gatilho e a energia inicial para o nascimento do líder intermitente ou descendente.

Considerando que tudo na natureza ocorre por influência de quatro forças fundamentais (gravitação, eletromagnética, nuclear forte e decaimento nuclear fraco) e por motivo de completeza, este trabalho introduz uma hipótese geral para a organização das cargas no interior da nuvem e o início do líder descendente baseado na transferência de energia por cascata encontrada na turbulência de Kolmogorov [16] e do movimento do líder descendente na descida para o solo baseado na força eletromagnética de Lorentz [17].

2.5 A BASE DE OBSERVAÇÕES PRÁTICAS

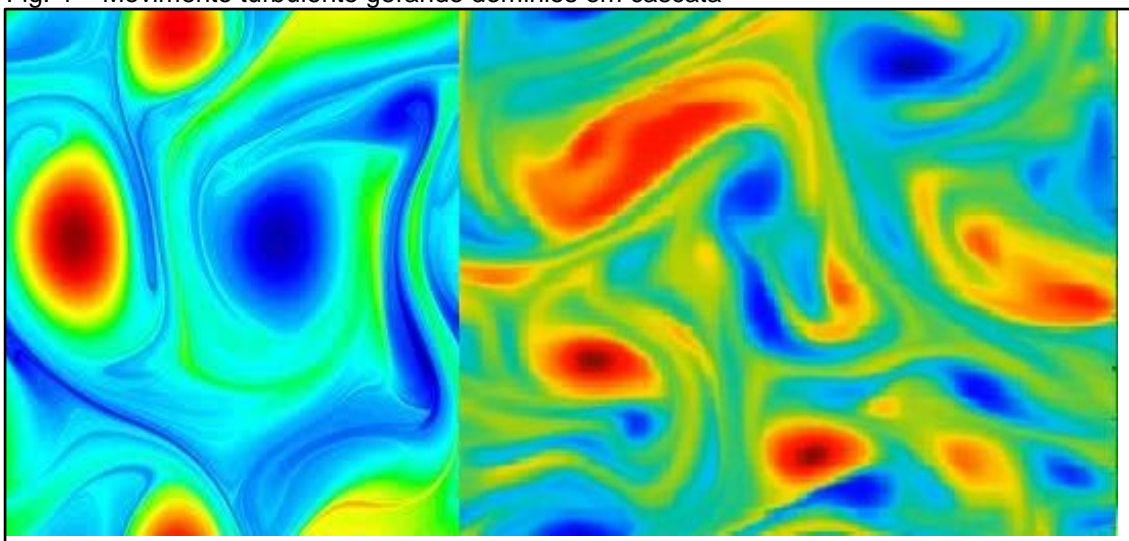
Da análise de dados de refletividade de radar e ocorrência de raios [18] e do fato de que se a estrutura de cargas na nuvem fosse compacta, existiria a possibilidade de um único raio descarregar toda a nuvem; logo as cargas devem ocorrer em pacotes ou domínios, semelhante à formação de bolhas em na convecção de uma panela com água fervendo.

Uma conjectura plausível é a da formação de domínios individuais de cargas (bolhas de cargas) na forma de íons negativos dentro da região de acumulação no interior da nuvem por força de processos turbulentos com transferência em cascata de energia da estrutura convectiva geral para domínios menores [16], [19] como as estruturas ilustradas na montagem da Figura 4.

O termo ‘cascata’ significa um processo de transferência de energia às estruturas ou domínios por um mecanismo inercial sem viscosidade.

Uma base para desenvolvimento dessa hipótese esta em rotinas Matlab para turbulência, com ferramentas para análise de campos de velocidade e vorticidade, computo de PDF (Probability Density Function) de velocidades, espectro de energias, etc., com as quais os níveis de energia de cada estrutura ou domínio, podem ser avaliados e relacionados com a quantidade de carga total drenada por um flash e à velocidade inicial das cargas do líder descendente.

Fig. 4 – Movimento turbulento gerando dominios em cascata



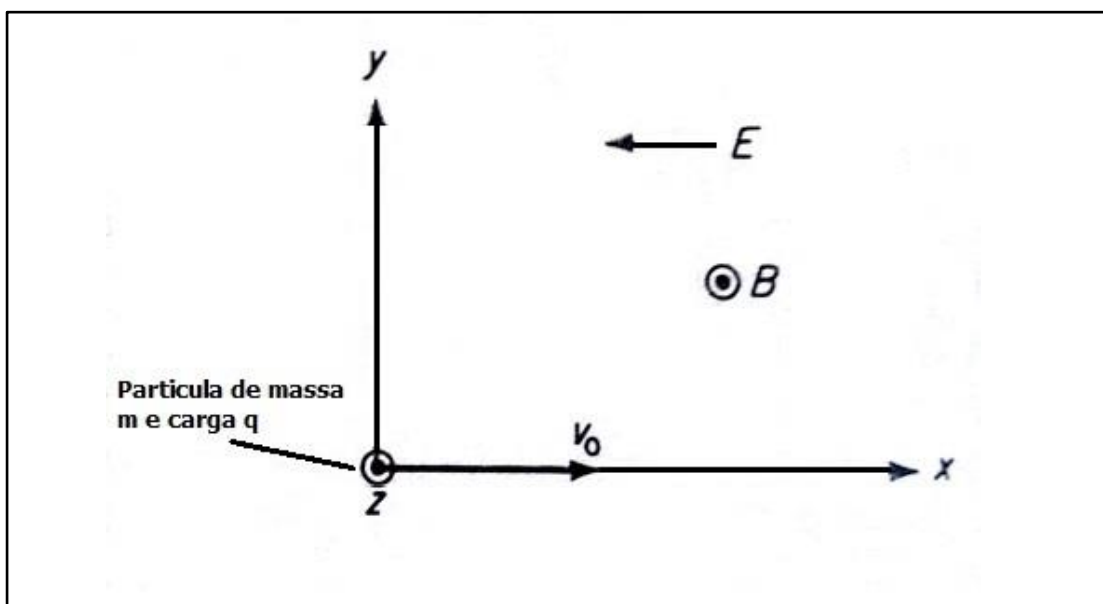
Fonte: Janus Kuo Chang/Matlab

Observe-se que dentro do domínio e em relação às regiões adjacentes ocorre uma força repulsiva latente, pois são cargas de mesma polaridade (negativas), como uma mola presa. Quando um desses domínios aleatoriamente ganha energia pode ser ejetado na direção do limite da base da nuvem e a energia recebida pode acelerar elétrons portados pelos íons negativos de água dentro do domínio que então são lançados com uma velocidade v_0 , na parte externa da nuvem iniciando um líder intermitente, que em seu trajeto para o solo disponibiliza as cargas elétricas para o primeiro *stroke* e os subsequentes, dependendo do tamanho desse domínio específico.

2.6 CAMPOS ELÉTRICO E MAGNÉTICO CRUZADOS

A partir do momento do seu início o líder (punhado de cargas elétricas) esta submetido a campos cruzados, elétrico originário das cargas acumuladas na nuvem e o campo magnético terrestre, e de acordo com a força de Lorentz, à essas cargas são impressos movimentos que têm trajetórias cicloidais (ver apêndice B para uma descrição mais detalhada do desenvolvimento).

Fig. 5 – Condições iniciais com a direção x coincidindo com o sentido nuvem-terra.



Fonte: Autor

Tendo como referencia a Figura 5 em que x é a direção nuvem solo e desenvolvendo-se a expressão da força de Lorentz

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

obtem-se as equações paramétricas:

$$y = \frac{E}{B}t + \frac{1}{\omega_c} \left(v_0 + \frac{E}{B} \right) \text{sen} \omega_c t \quad (2)$$

$$x = \frac{1}{\omega_c} \left(v_0 + \frac{E}{B} \right) (1 - \text{cos} \omega_c t) \quad (3)$$

$$\omega_c = -\frac{qB}{m} \quad (4)$$

$$x = n \frac{2\pi E}{\omega_c B} \quad (5)$$

Onde \mathbf{E} e \mathbf{B} são os campos, elétrico das cargas na nuvem e magnético da Terra;

v_0 é a velocidade inicial;

ω_c é a frequência de cíclotron;

q é carga elétrica;

m é massa das partículas portadoras da carga.

x é a distancia ou comprimento dos ciclos ou pontos focais

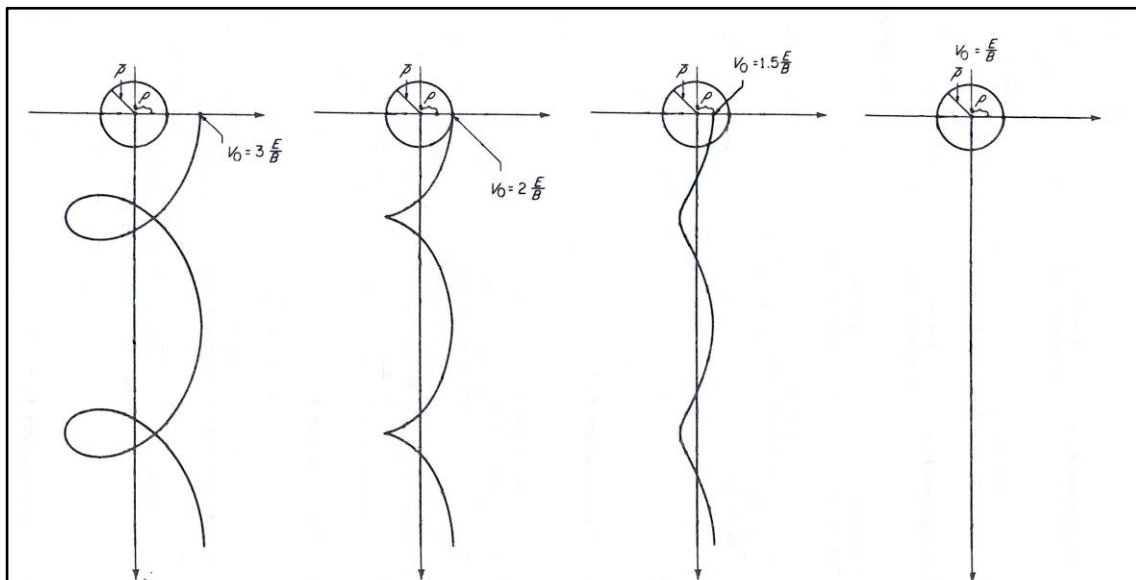
As equações (2) e (3), para $v_0 = 0$ são as equações paramétricas de uma cicloide com t atuando como parâmetro, e com a introdução desses parâmetros os gráficos tendem a mostrar uma superposição de diversos modos de deslocamentos (trajetórias).

Uma cicloide pode ser visualizada como a trajetória traçada por um ponto na periferia de uma roda rolante, que é uma forma adequada de se modelar os diversos tipos individuais de trajetórias [20]. Usando-se esse tipo de modelagem e o uso de coordenadas cilíndricas, obtêm-se as possíveis trajetórias cicloidais de uma partícula como mostrado na Figura 6, para diversos valores, de velocidade inicial v_0 , que apresentam n pontos focais ao longo do trajeto, dados por (5).

Podemos considerar esse movimento de cargas elétricas submetidas a campos elétricos e magnéticos cruzados e depositadas ao longo do canal do líder como um tipo diferente de ionização, ainda por ser detalhadamente definido.

Colisões das cargas com moléculas de ar e as condições turbulentas dos movimentos de massas de ar na atmosfera gerando vórtices, diferenças de pressão e a prevalência de ventos além da força de gravidade são os outros agentes atuando nesse ambiente e podem estar dispersando a uniformidade dessas trajetórias, mas a sua assinatura característica ainda é bem visível em fotografias de alta velocidade e mesmo em fotografias comuns, como no simples avistamento de uma longa descarga no início das tempestades características das tardes equatoriais amazônicas.

Fig. 6 – Trajetórias cicloides em campos elétrico e magnético cruzados para algumas velocidades de ejeção das cargas elétricas.



Fonte: Adaptação de figura de Jordan & Balmain, 1968, [20]

Numa simples vista d'olhos em uma coleção de fotografias de raios pode-se rapidamente identificar vários dos formatos de trajetória da Figura 6. Nessas trajetórias pode-se inferir a formação de *steps* característico do movimento dos líderes descendentes. Observe-se também da Figura 6 que no caso particular de velocidade inicial $v_0 = E/B$ a trajetória é retilínea como no caso do líder reto ou *dart leader*.

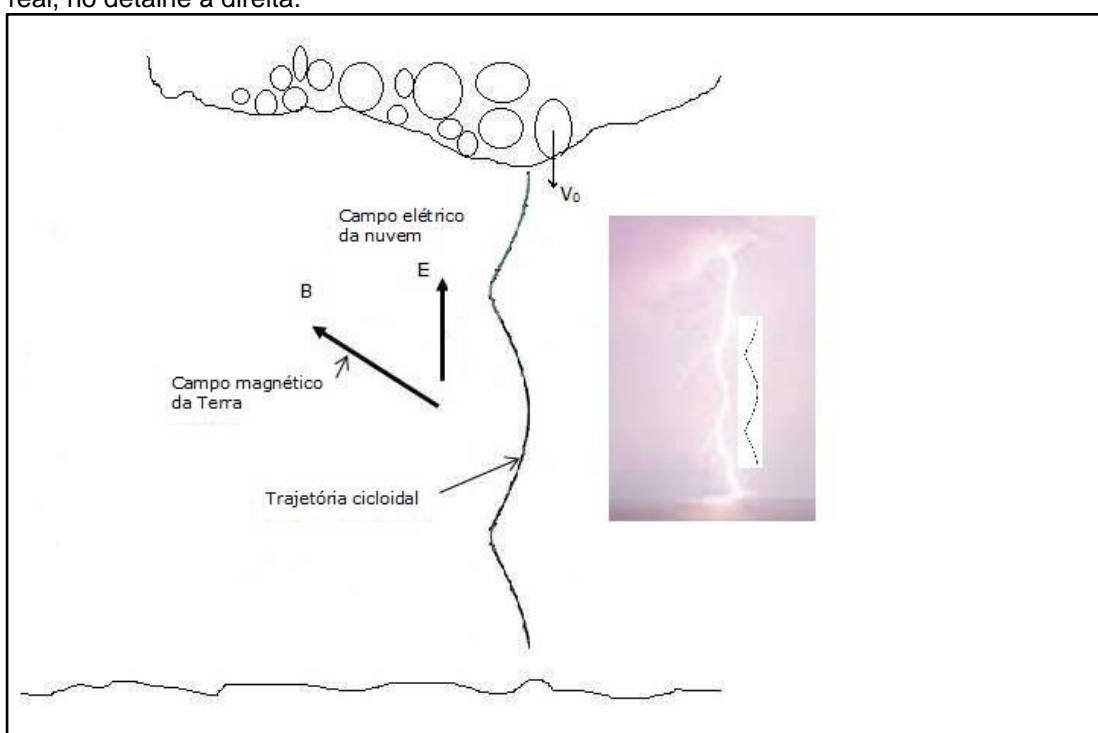
Dependendo das condições da atmosfera essas trajetórias podem também se dar em espiral.

Como desenvolvimento futuro, uma rotina computacional plausível seria a definição de um algoritmo contendo as diversas formas de trajetória em banco de dados, com um esquema de facilmente se superpor as trajetórias em

fotografias de raios, o que agilizaria as pesquisas e subsidiaria ajustes em função das velocidades de líder realmente existentes.

Na Figura 7 estão representados os elementos básicos das hipóteses comentadas acima, com uma ilustração dos possíveis domínios de cargas elétricas na base das nuvens; a trajetória cicloidal do líder considerando a atmosfera estática, sem turbulência, com a indicação das direções dos campos Elétrico na direção terra-nuvem e Magnético na direção Norte-Sul.

Fig. 7 – Desenho representando trajetória cicloidal de líder descendente com velocidade inicial $v_0 = 1.5 \frac{E}{B}$, submetido a campos Elétrico e Magnético, cruzados e comparado com descarga real, no detalhe à direita.



Fonte: Autor/Paint, 2014

Como já citado anteriormente, as discrepâncias das formas cicloides podem estar sendo ocasionadas com a ocorrência de ramificações a partir dos pontos de inflexão e também devido a natureza turbulenta da atmosfera, através de parâmetros como pressão, vorticidade, direção e intensidades dos ventos na região onde se dá o descenso do líder intermitente.

2.7 O PROBLEMA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES

A desaceleração no meio e no final de cada *step* causa a perda de energia cinética das partículas eletrizadas e como consequência a emissão de fótons de radiação [21], sendo a potência irradiada dada por

$$P = \frac{q^2 \dot{v}^2 \gamma^6}{6\pi\epsilon_0 c^3} \quad (6)$$

Sendo q a carga elétrica

v a velocidade da partícula (neste caso a aceleração)

γ é o fator de Lorentz (relação entre a velocidade da luz e a da partícula)

ϵ_0 é a constante dielétrica

c é a velocidade da luz.

Essa radiação, que pode acontecer com intensidade correspondente à radiação X, pode ser a causa do início das ramificações na trajetória do líder justo no momento de desaceleração.

Radiação X (ou gama) tem sido detectada por satélites, sendo conhecidos como TGF (Terrestrial Gamma Ray Flash) [22]. Embora raios gama impliquem processos de dissociação nucleares, supõe-se que, possivelmente, poderiam ser produzidos em descargas intra-nuvem dirigidas para o topo da nuvem.

Também em experiências de raios induzidos têm sido informado a detecção de radiação X que poderiam ter sua explicação na desaceleração das cargas nos *steps* do líder intermitente ou nas violentas colisões em função da corrente de primeiro *stroke* ou subsequentes.

Pelo fato de os TGF's, e a radiação X (já coletivamente denominados de *black lightning* ou raios negros), poderem originar-se perto das mesmas altitudes em que aviões comerciais voam rotineiramente, os cientistas têm tentado determinar se ou não apresentam um risco de radiação para os indivíduos nos aviões. A investigação preliminar sugere que no meio da tempestade, as doses de radiação poderiam ser mais ou menos igual a uma tomografia computadorizada de corpo inteiro [23].

2.8 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram discutidos os processos de eletrificação de nuvens, a estrutura de cargas no interior das nuvens, e movimento de cargas elétricas pelo líder descendente, quando foram apresentadas hipóteses para o processo de iniciação de um novo líder e sua trajetória da nuvem para a terra.

O próximo passo na avaliação dessas hipóteses está na solução das equações apresentadas e a comparação com valores verificados através de fotografias de alta velocidade e outros que se julgar conveniente.

No entanto essas hipóteses, baseadas em características físicas a longo tempo estudadas mostram uma possível e intuitiva abordagem que baseará o desenvolvimento do modelo ModSalto ao longo de sua vida útil.

Capítulo III DESENVOLVIMENTO DO LÍDER, ATTACHMENT & PROTEÇÃO

3.1 A PROTEÇÃO CONTRA OS RAIOS

Com a introdução do para-raios por Benjamin Franklin, a discussão se voltou para o que era realmente protegido pelo dispositivo. Em 1823, o físico e químico francês Gay-Lussac, mais conhecido por suas contribuições à lei dos gases, lançou a hipótese de que o para-raios protegia efetivamente estruturas situadas em um círculo em volta do para-raios cujo raio era igual duas vezes a altura do para-raios. Até 1874 DeFonvulle [24] havia aperfeiçoado a ideia de Gay-Lussac estabelecendo um cone de proteção cuja base era a área de Guy-Lussac e o vértice a ponta do para-raios: Nascia assim o modelo de ângulo de proteção e o conceito de nível de proteção com ângulos variáveis.

A história desses desenvolvimentos e discussões posteriores a esse modelo sobre o volume que realmente protegia, foram publicados por Rudolf Heinrich Golde em 1977 [25].

3.2 O MODELO ELETRO GEOMÉTRICO (EGM)

Atualmente o principal modelo para análise e projeto da proteção de sistemas de transmissão é o modelo elétrico geométrico EGM introduzido por Armstrong e Whitehead em 1968 [26]. O EGM supõe que o primeiro ponto de uma LT que vem a ficar a uma distância da ponta do líder descendente igual a distância em que ocorre a quebra final da rigidez dielétrica do ar (450 a 605 kV/m), denominada distância de salto, será o ponto atingido pelo raio. Eles intuíram que a distância de salto podia ser representada por uma fórmula de potência dada por

$$d_s = aI_p^b \quad (7)$$

Onde I_p é a amplitude máxima da primeira descarga em kA, a e b são constantes. Essa escolha de uma fórmula de potência é conveniente pois está

associada com a distribuição Log-Normal que representa a ocorrência da amplitude da corrente de raios.

Da análise de dados de descargas em laboratório eles observaram que o potencial limite de quebra de rigidez dielétrica V e, portanto, a descarga, estava relacionada com o comprimento do gap l através de

$$l = 1.4V^{1.2} \quad (8)$$

Da correlação entre a velocidade da corrente de descarga (*stroke*) e o valor da amplitude da corrente com o potencial da ponta do líder de Wagner [27] eles derivaram uma formula associando o potencial da ponta do líder com o valor da corrente em kA obtendo

$$V = 3.7I_p^{0.66} \quad (9)$$

Eles concluíram que o valor do gap em que ocorria a descarga era semelhante a distancia de salto, e da substituição de (8) em (7) eles obtiveram a conhecida formula para calculo da distancia de salto dada por

$$d_s = 6,72I_p^{0.8} \quad (10)$$

Posteriormente o potencial da ponta do líder foi substituído pela distribuição de carga ao longo do canal do líder que esta associado a corrente da primeira descarga (*stroke*) e varias formulas foram introduzidas por diversos autores, e continuam sendo introduzidas na tentativa de cada vez mais aprimorar a exatidão da determinação da distancia de salto.

3.3 MODELOS DE PROGRESSÃO DE LÍDER (LPM)

Outra alternativa para estimativa da distancia de salto esta nos modelos de progressão de líder (LPM-Leader Progression Model) que interativamente simulam a trajetória descendente do líder e a iniciação de filamentos

(*streamers*) e sua eventual transformação em líder ascendente (uma entidade carecendo de melhor qualificação e certamente diferente do líder descendente) determinando o ponto de conexão ou *attachment*. Nesses modelos os campos corona e filamentos (streamers) assim como o critério de transição *streamers*/líder ascendente são baseados em dados de ensaio em laboratório.

Com os dados desses modelos podem ser geradas novas formulas para o calculo da distancia de salto com o objetivo de maior portabilidade dos cálculos.

Observa-se que os modelos LPM usam simplificações e premissas que influem em seus resultados. As principais suposições são com respeito ao critério de iniciação de lideres ascendentes, o efeito da tortuosidade e ramificação do líder descendente, mesma velocidade para o líder descendente e o ascendente e a existência de lideres que levam a mais de um ponto de contacto, portanto múltiplas distancias de salto.

Apesar dessas limitações esses modelos são capazes de predizer o comportamento dos fenômenos pré-descarga, como a ionização do caminho do líder na atmosférica, além da já citada possibilidade de geração de formulas para estimativa da distancia de salto e raio de atração, e também se constituir em uma ferramenta importante na operação de uma torre instrumentada.

No entanto até o momento não existe suficiente dados de campo que possam validar completamente esses modelos, sendo as poucas evidencias existentes conseguidas com auxilio de sistemas de fotografia de alta velocidade.

A seguinte cronologia bibliográfica mostra o desenvolvimento desse tipo de modelo e assemelhados:

1987

O primeiro LPM foi introduzido por Eriksson [28], [29] do National Electrical Engineering Research Institute (NEERI) of the South African Council for Scientific and Industrial Research (CSIR). Baseado em dados de ensaios em

laboratório e introduzia o efeito da altura da estrutura, não incluído na fórmula de Armstrong, o lançador do EGM, para o cálculo da distância de salto [26].

1990

Dellera e Garbagnti do CESI (Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano Giacinto Motta), Milan, Italy lançaram seu LPM introduzindo modelos mais sofisticados de líder descendente baseado nos mais recentes conhecimentos da física de descarga em longos gaps de ar (10m) [30], [31].

1994

Rizk do Institut de Recherche d'Hydro-Québec (IREQ), Canada lança seu LPM [32],[33]. A ideia básica do LPM era semelhante à de Dellera e Garbagnati mas introduziu o conceito de que a densidade de carga decresce com a altura da ponta do líder, e também introduziu um modelo de campo inicial em condutores energizados diferente do de estruturas aterradas.

2000

V. Mazur da NOAA National Severe Storms Laboratory, Norman, Oklahoma [34] lança LPM baseado na modelagem teórica de líderes positivo e negativo e experimentos de laboratório para descargas longas (10m) [35],[36],[37].

2006

Becerra e Cooray da Division of Electricity and Lightning Research, Uppsala University, Sweden, introduziram seu LPM [38] o SLIM (Self-consistent Leader Inception Model). O modelo usa a abordagem termodinâmica proposta por Gallimberti em suas experiências com a formação de gaps longos em ensaios de laboratório [39] para estimativa do canal do líder e uma análise termodinâmica da zona de transição observadas nesses experimentos onde a corona converge para uma ponta de líder.

2008

B. Vahidi do Dept. of Electr. Eng., Amirkabir Univ. of Technol., Tehran et al. lança um método de análise de progressão de líder para cálculo de *shield failure* usando CSM (Combined Charge Simulation Method) [40], método numérico que usa as condições de contorno, estabelecendo relação contorno-carga.

2009

Bengang Wei do Departamento of Electrical Engineering da Universidade Jiao Tong de Shanghai et al. [41] usa uma metodologia que ele chama de um LPM

melhorado baseado em CSM e numa melhor avaliação do campo de condutores agrupados (*bundled*) com o uso da formula da Lei de Peek [42] (gradiente de potencia necessário para iniciar uma descarga corona) para calcular iniciação de corona no condutor de fase e o critério de Rizk, usados em linhas de transmissão de 500kv para calculo de *shield failure*.

2010

A. Borghetti da Universidade de Bolonha et al. [43] lança um modelo de elementos finitos para avaliação da progressão do líder ate o *attachment*, que mostras valores compatíveis com os obtidos com método CSM que modela equações empíricas baseadas em dados de ensaios.

2011

Mohammad Reza do Departamento of Electrical Engineering da universidade Shahid Bahonar, Kerman, Iran; et al. [44] usa um metamodelo usando técnicas de redes neurais e a curva cumulativa do IEEE e transformação de dias de trovão para calculo de *shield failure* em função do Angulo de proteção e a altura do cabo para-raios.

2012

Juan Hermoso da Universidade Tecnológica da Catalunha et al. [45] usa modelos detalhados de ionização cinética no canal do líder para investigar sua propagação ate o *attachment* junto com formulas empíricas de ensaios como uma alternativa a LPM.

Os modelos LPM de Eriksson, Dellara, Rizk, Mazur e Cooray são algoritmos computacionais que efetuam cálculos reiteradamente até que uma condição final seja alcançada; é uma simulação em computador do processo de desenvolvimento do líder descendente.

Todos esses métodos operam com cálculos de potenciais [46], que é o parâmetro mensurável nessas experiências, sendo o campo elétrico obtido dividindo-se o potencial pelo comprimento do gap, um processo menos preciso que o de integração de uma distribuição de carga.

Os outros trabalhos mencionados podem ser definidos como metodologias de calculo e são modelos no sentido que qualquer conjunto de equações pode ser considerado um modelo dos processos mensurados pelas mesmas.

3.4 O MODSALTO E A FÍSICA DA MODELAGEM

O processo de *attachment* tem sido estudado com o uso de modelos denominados modelos de progressão de líder ou LPM (Leader Progression Model) que inclui, entre outros, cálculos do desenvolvimento de *streamers* e eventual transformação em líder ascendente de conexão com o subsequente *attachment* (conexão) com o líder descendente, o que leva à primeira descarga ou *stroke* [47].

Os modelos LPM usam os resultados da engenharia de alta tensão que deriva formulas e parâmetros para processos de *streamers* e corona considerando uma tensão positiva na estrutura energizada e um suprimento estável de tensão e considera uma descarga de gap longo (cerca de 10 metros) como uma perfeita replica do ambiente da descarga atmosférica. No entanto esse modelo não representa muito bem as condições atmosféricas que levam ao raio principalmente pelo fato de a nuvem esta energizada negativamente e não mantem uma fonte estável de tensão. Por esses fatos é de se esperar que os processos de iniciação e deslocamento do líder intermitente é bem diferente do que o processo que ocorre em uma descarga em laboratório, mesmo com um longo gap. O uso de integração da distribuição de carga do líder é feito apenas para avaliar o potencial existente entre a nuvem e o solo [48].

Neste trabalho, por não possuímos a estrutura laboratorial para efetivar essas experiências, e também por considerar, como já citado acima, que a natureza dos fenômenos que estão acontecendo na base da nuvem não são exatamente iguais aos dentro do laboratório, usamos as equações físicas do ambiente de campos atmosférico (elétrico e magnético), integrando a densidade de carga atribuída ao canal do líder em função da corrente de *stroke*, obtendo não o potencial, mas o campo elétrico impresso pelo líder na ponta da estrutura em estudo, no caso um para-raios, ou outra estrutura. Esse é um esquema inovador para o desenvolvimento de um LPM com é o caso do ModSalto, pois prescinde do esquema de laboratório e consegue resultados semelhantes como mostrado no decorrer deste trabalho.

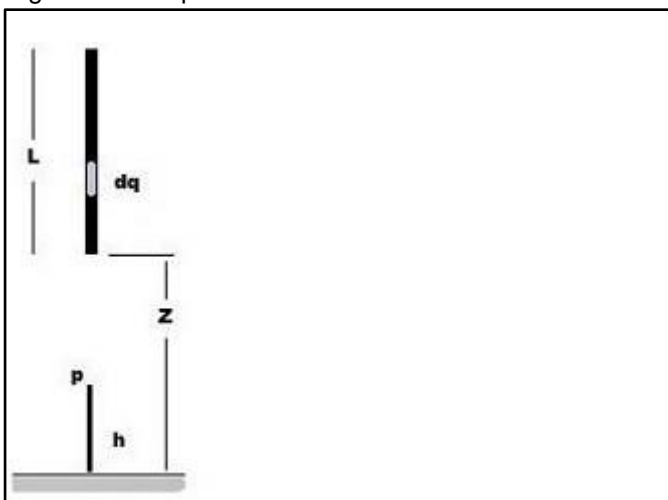
Como o campo elétrico é o gradiente negativo do potencial, observa-se nas formulações utilizando dados de laboratório que parte-se de um potencial e

pela simples divisão desse potencial pelo gap obtém-se o campo elétrico, um processo que embute um erro de aproximação. No entanto, todos os novos modelos pretendem trazer melhorias na exatidão dos cálculos da distancia de salto, parâmetro importante que estabelece a quantidade de proteção provida pelo cabo para-raios. Assim o ModSalto dá também uma boa contribuição a busca de exatidão nos cálculos.

O objetivo do ModSalto é modelar todas as fases do líder descendente até a conexão final com *streamers* ou líder ascendente, estimando variáveis como intensidade de campo elétrico e magnético em pontos selecionados, o caminho do líder e velocidade, usando a formula para a força de Lorentz, que lida com campos ortogonais devido à eletrificação das nuvens de tempestade (campo elétrico) agindo no sentido vertical e o campo magnético da terra agindo no sentido horizontal, e hipoteticamente, a força por trás do formato tortuoso do líder descendente. Adicionalmente o modelo calcula o salto final ou distancia de salto (d_s), e o raio de atração (R_a) da estrutura que recebe o salto, além do raio de atração para terra (d_{sg}).

O canal do líder é modelado como um segmento de reta que cresce com o movimento descendente do líder até o ponto do salto final, e pelo fato dessa distribuição de carga ter um formato simples o valor do campo elétrico (E_L) devido ao líder, estabelecido na ponta da estrutura (para-raios, condutor, aresta de prédio, etc.) e obtido por integração direta da distribuição de carga estabelecida ao longo do canal do líder como na Figura 8.

Fig. 8 – O campo elétrico do lider descendente.



Fonte: Autor/Paint, 2014

Considerando $\rho = \frac{Q}{L}$ e $dq = \rho dy$, obtém-se a formula integral

$$E_l = \frac{\rho}{4\pi\epsilon_0} \int_z^{z+L} \frac{dy}{y^2} \quad (11)$$

Que fornece o campo elétrico imposto pelo líder, E_l , na ponta da estrutura (P) em estudo (para-raios, aresta de edifício, condutor elétrico).

A distribuição de cargas usada é consistente com parâmetros de raios obtidas por Visacro [2] com valor médio de amplitude máxima de primeiro *stroke* na ordem de 45kA, valor proximo ao verificado na mediana do conjunto de dados produzido pelo LLS do SIPAM [49].

Para simular a variabilidade da distribuição de carga ao longo do canal do líder descendente esta sendo usado um fator de variação sugerida por Golde [50] dado pela formula

$$\rho = \rho_0 e^{\frac{-z}{la}} \quad (12)$$

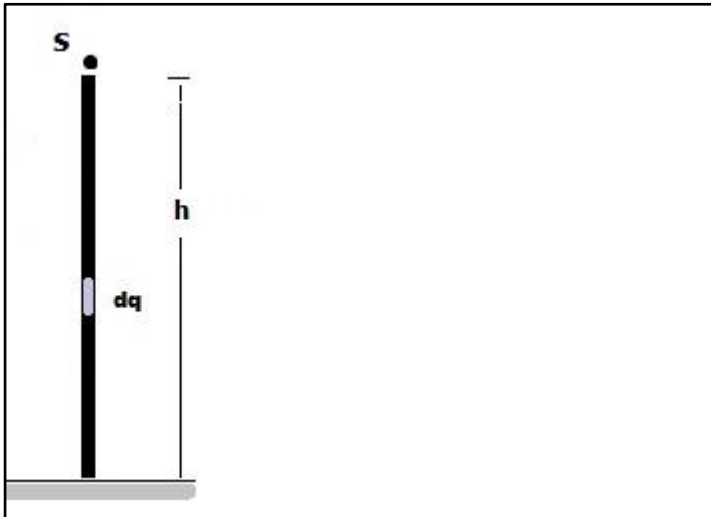
Onde $la = 1000$ é uma constante de propagação semelhante à usada em sistemas do tipo LLS na propagação de *sferics*. Essa formula esta de acordo com as características de propagação e atenuação de fenômenos elétricos na atmosfera que podem ser descritos através de função Log-Normal de distribuição estatística.

O campo próprio na ponta da estrutura aterrada (para-raios, condutores, etc.) devido a área buffer de *streamers* e sua conseqüente transformação em líder ascendente (ou não), é modelado por integração da distribuição imagem das cargas no canal do líder descendente, escalada pela razão entre a altura da estrutura e o tamanho do líder descendente no ponto considerado, como mostrado na Figura 9. Essa distribuição de cargas é corrigida levando-se em conta o poder das pontas (a tendência de cargas elétricas de se acumularem em áreas de alta curvatura) usado como um fator de intensificação do campo elétrico nessas regiões, expressado pela relação

$$\frac{\rho_s}{\rho} = \left(\frac{k_s}{k}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

Entre a densidade de carga e o raio de curvatura do topo da estrutura (ρ_s e k_s) com os seus respectivos valores médios [51],[52]. Esta técnica se contrasta com o uso de formulas obtidas em laboratórios de alta tensão [53],[54].

Fig. 9 – O campo elétrico do *streamer*/líder ascendente.



Fonte: Autor/Paint, 2014

A distribuição de carga ρ_s na estrutura aterrada é dada por $\rho_s = \left[\frac{h}{L} \left(\frac{k_s}{k}\right)^{1/3}\right] \rho$ e $dq = \rho dy$, com a qual obtém-se a forma integral

$$E_s = \frac{\rho_s}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{h+\Delta h} \frac{dy}{y^2} \quad (14)$$

Valor do campo elétrico na ponta (S) do para-raios, devida à carga imagem do líder descendente.

3.5 CAMPO ELÉTRICO DE CONDUTORES ENERGIZADOS

O campo elétrico inicial para condutores energizados é avaliado com o uso de métodos denominados CSM (Combined Charge Simulation Method)

[55] dependendo da tensão de operação da linha de transmissão, lembrando que esse campo muda de polaridade com a frequência da LT.

O ModSalto é um modelo que está no início de sua vida útil e além do cálculo da distância de salto e raio de atração, muitas outras análises podem ser efetivadas, como a estimativa de velocidades das cargas dos líderes, a trajetória do líder e a formação do canal ionizado do raio. No apêndice E é mostrados um dos conjuntos de dados de saída do modelo.

3.6 FORMULAS PARA A DISTÂNCIA DE SALTO

Com objetivo de validar os valores de distância de salto obtidos pelo ModSalto e também para se dispor de uma fórmula para portabilidade de cálculos, foram gerados valores de distância de salto correspondentes a um conjunto de valores de corrente prospectiva de primeira descarga (stroke), I_p , no intervalo 0 – 45 kA. Esses dados foram então ajustado a uma fórmula de potência como normalmente usada nas condições “distância de salto para terra plana”, fazendo-se $h = 0$ (altura da estrutura).

Essa fórmula é em seguida comparada com as fórmulas correspondentes usada pela Norma Brasileira NBR5419, Pela fórmula do EGM e pela fórmula do padrão do IEC (International Electrotechnical Commission) o IEC62305. A fórmula tem a forma

$$\text{ModSalto} \quad d_{ms} = 4.893 I_p^{0.8971}; \quad (15)$$

A distância de salto fornecida pela fórmula (14) será comparada com valores fornecidos por algumas das mais conhecidas fórmulas

$$\text{NBR5419} \quad d_{nbr} = 2I_p + 30(1 - e^{-I_p}) \quad (16)$$

$$\text{Armstrong \& Whitehead} \quad d_{a\&w} = 6.72I_p^{0.8}, \quad (17)$$

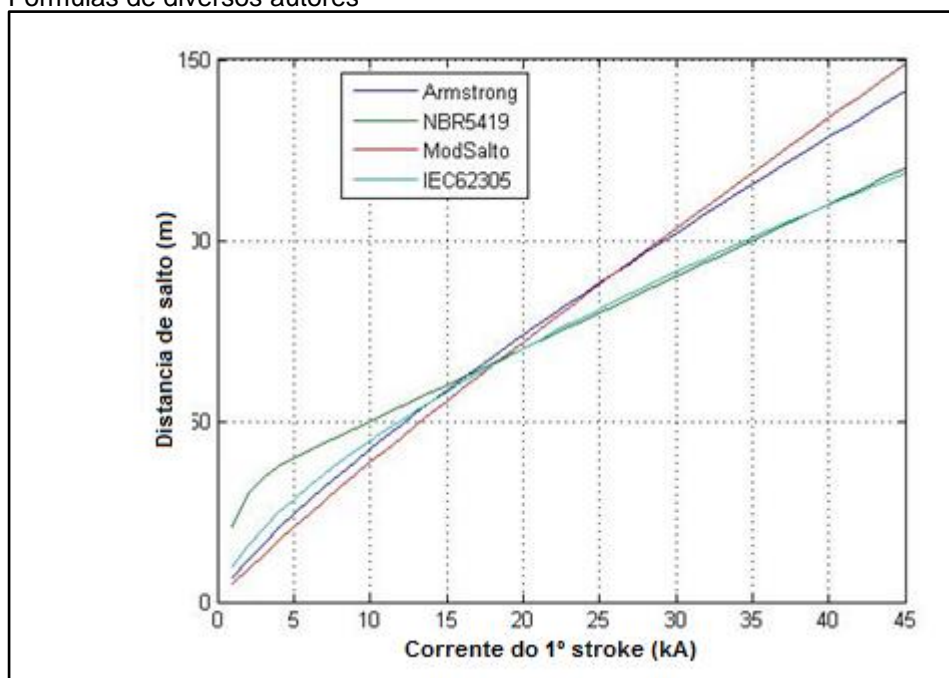
$$\text{IEC62305} \quad d_{iec} = 10I_p^{0.65}, \quad (18)$$

Onde d_{ms} , d_{nbr} , $d_{a\&w}$, d_{iec} nas equações (14, 15, 16 e 17) são a distância de salto para terra plana fornecidas pela equação gerada pelo ModSalto, pela

NBR5419, pela fórmula de Armstrong & Whitehead e a fórmula usada pelo IEC62305 [56]; I_p é a corrente prospectiva do primeiro *stroke* (kA).

Essa comparação lança a fórmula ajustada com dados gerados pelo ModSalto para utilização na determinação da distância de salto que poderá ser utilizada por qualquer método de proteção além do EGM. E tem sua métrica alinhada com os dados de raios característicos da região amazônica.

Fig. 10 – Comparação da fórmula gerada pelo ModSalto com Formulas de diversos autores



Fonte: Autor/Matlab, 2014

Da Figura 10, pode-se inferir a similaridade da forma gerada pelo ModSalto com a conhecida fórmula lançada por Armstrong & Whitehead para o EGM; A fórmula do IEC62305 produz resultados similares até valores da ordem de 20kA, quando a taxa de aumento da distância de salto começa a decair acentuando uma expectativa de menor proteção, em relação a ModSalto e Armstrong & Whitehead. A fórmula usada pela norma NBR5419 quando comparada com as outras, produz valores maiores para a distância de salto até cerca de 20 kA talvez considerando a maior probabilidade de ocorrência desses valores de acordo com curvas cumulativas da frequência de raios normalmente observadas. A partir desse nível de kA seu desenvolvimento é semelhante ao da fórmula da norma IEC62305;

Através dessa análise concluímos que a estimativa de distancia de salto para terra plana gerada pelo ModSalto mesmo com as discrepâncias esta em acordo como que a engenharia das normas existentes.

No entanto o aumento da distancia de salto com maiores valores de corrente de pico tem sido sistematicamente verificado pela pesquisa, o que leva a um superior nível de proteção para esses eventos. No entanto, como as variações entre valores de distancia de salto calculadas levando-se em conta a altura das estruturas apresentam pequenas variações em relação aos valores fornecidos pelas formulas de distancia de salto para solo plano, que são fortemente influenciadas por dados de ensaios em laboratório, que representam muito bem a características dos ambientes planos ainda são preferidas pelas normas em lugar daquelas; uma posição conservadora que só mais pesquisas e aplicações poderiam influenciar os comitês que produzem as normas e suas atualizações.

Capítulo IV CARACTERÍSTICAS DOS RAIOS NA AMAZÔNIA ORIENTAL

4.1 INTRODUÇÃO

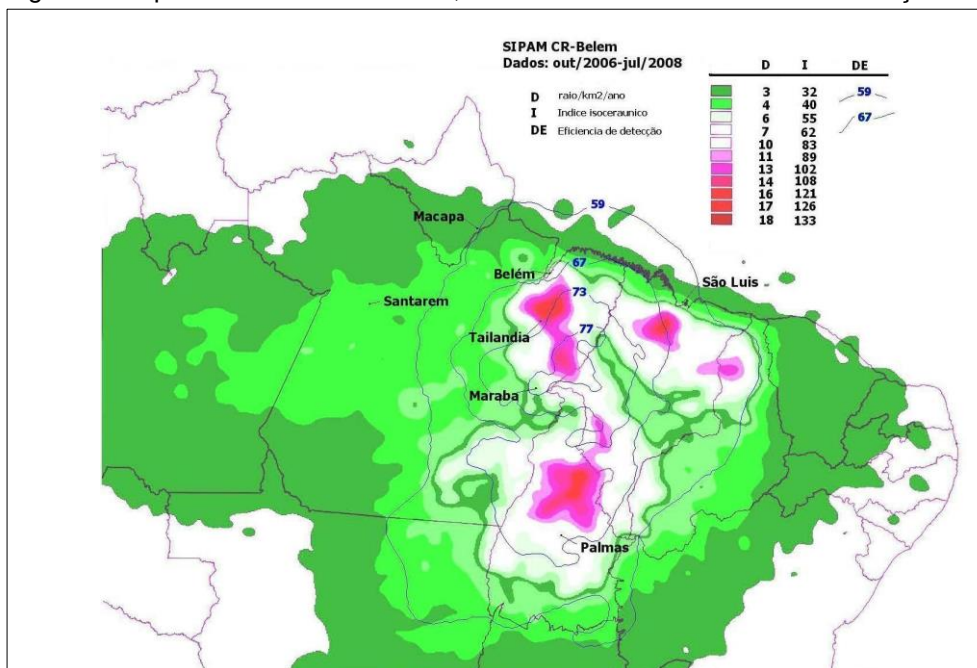
Uma real avaliação da consequência de atingimentos de raios nas mais diversas atividades humanas como a área de proteção de linhas de transmissão de eletricidade, só é possível com a existência de dados geográficos de parâmetros como a distribuição e densidade de raios, distribuição de valores de amplitude máxima de correntes, tempo de subida e descida da forma de onda desses pulsos de corrente em quantidade estatística robusta que permitam usar e/ou inferir parâmetros de raios usados na engenharia de sistemas de proteção contra raios (SPDA).

Atualmente só com o uso de sistemas do tipo LLS existe essa possibilidade. Observe-se que dados coletados por torres instrumentadas podem ser considerados como faróis de orientação para sistemas LLS mas pelo fato de serem medições localizadas, sofrem influências dos locais onde são instalados, normalmente posições em ambiente bem diferente dos encontrado em outras estruturas a proteger como linhas de transmissão de energia elétrica.

Neste trabalho é usado um conjunto de dados coletado pelo LLS do SIPAM, rede baseada em sensores LPATS IV, operando na faixa VLF/LF que estima todos os parâmetros necessários; efetuando-se uma reanálise desses dados, em grande área da Amazônia oriental, analisada em 2008 em trabalho deste autor [49] condensado no mapa da Figura 11, mostrando a densidade de raios na área do LLS SIPAM em que os valores em raios/km²/ano são equacionados a níveis ceraunios uma vez que esse parâmetro ainda é usado, principalmente quando há limitação de disponibilidade de dados de densidade de raios.

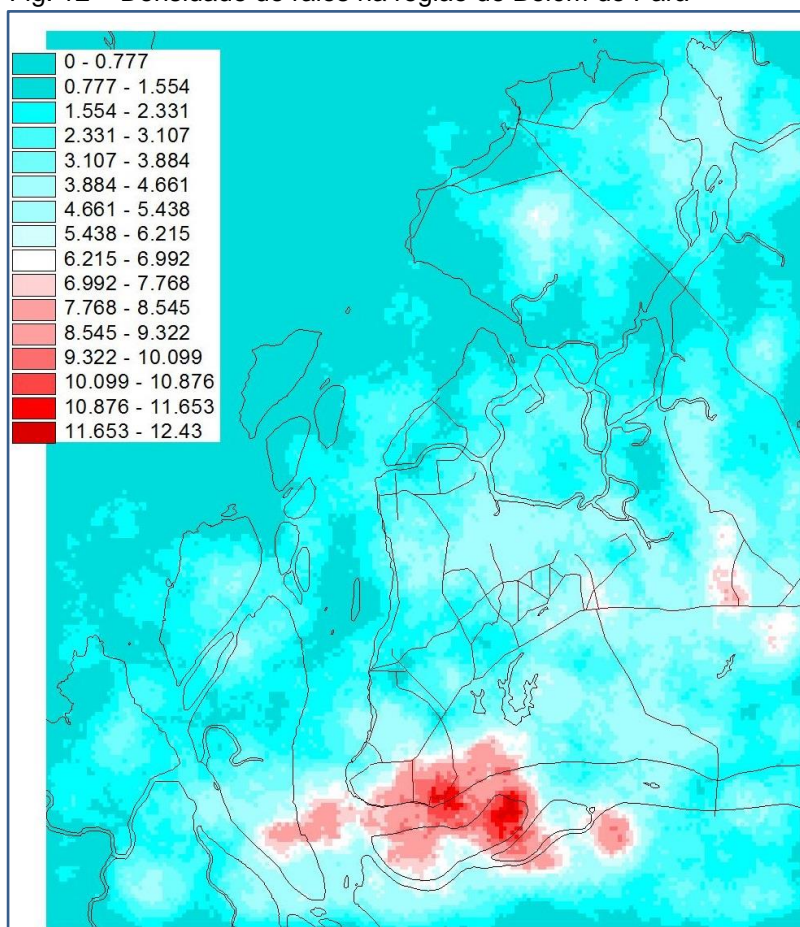
Na figura 12, usando-se uma combinação com dados da Rede STARNET podemos observar a distribuição de densidade de raios na área metropolitana de Belém que atinge seu máximo na região do bairro Terra Firme ao sul, englobando a região costeira do rio Guama e a ilha do Cumbu.

Fig. 11 – Mapa de densidade de raios, índice ceraunio e eficiência de detecção



Fonte: Pereira et al. 2008, [49]

Fig. 12 – Densidade de raios na região de Belém do Pará



Fonte: Arthur C. Almeida & Carlos S. Pereira. Descargas Atmosféricas na Amazônia, comunicação pessoal, 2014.

Como um mapa de densidade de raios fornece valores para obter-se o numero de raios que provavelmente atingirá determinada estrutura fica sempre no ar a esperança de se corrigir esses valores. Para por exemplo corrigir o fato de que um raio possa ter mais de um ponto de contacto na superfície é sugerido valores na ordem de 1,5 – 1,7 para correção da densidade de raios, embora esses eventos possam ser estimados em função de parâmetros detectados pelos LLS's. Outra preocupação é pelo fato de a eficiência de detecção não ser 100%, então aplicar-se-iam valores de regiões com melhores índices à regiões deficientes, o que fatalmente exportaria características topográficas que não existiria em outras regiões.

Talvez a alternativa seja estudos localizados específicos para derivar correções para implementações específicas.

4.2 A ESTATÍSTICA DOS RAIOS

O matemático, medico, astrólogo e jogador italiano Gerolamo Cardano (1501–1576) estabeleceu sem provas que a exatidão da estatística tende a melhorar com o numero de eventos [57]. Essa máxima esta contida na lei dos grandes números (LLN-Law of Large Numbers), um teorema que descreve o resultado de se executar um mesmo experimento por um grande numero de vezes. De acordo com essa lei, a media dos resultados obtidos de um grande número de tentativas deve estar perto do valor expectado, e tende a se aproximar à medida que mais eventos são ocorridos. Na derivação de estatística de raios é tentador restringir o conjunto de dados em torno de valores que julgamos mais convenientes, mas esse procedimento distorce a estatística pura, pois pode modificar valores como as medianas e está em frontal desacordo com a lei dos grandes números.

O conjunto de dados coletado pelo LLS SIPAM no período considerado compreende 3.389.200 *strokes* em um período de 22 meses com valor médio anual de mais de 2 milhões de *strokes*, sumarizado na Tabela 1.

Tab. 1 - Resumo estatístico geral do LLS SIPAM

Tipo de Evento	Quantidade	%
Total <i>strokes</i>	3.389.200	100,00
Intra-nuvem	534.435	15,76
Nuvem-solo	2.854.775	84,23
<i>Strokes</i> positivos	690.776	24,21
<i>Strokes</i> negativos	2.163.711	75,79
Max <i>stroke</i> /km ² /ano	17	

Fonte: Autor/Excel, 2014

A atividade de raios computada neste trabalho mostra um valor máximo de 17 raios/km²/ano. Verifica-se que não ha preponderância de valores de amplitude da corrente de raios +CG sobre os raios -CG e os valores de multiplicidade têm uma contagem media de 3 *strokes* num *flash*.

Segundo Anderson & Eriksson [58] a Tabela 2 mostra uma estatística do numero de *strokes*/flash baseada em 6000 flash coletados em diferentes regiões do mundo cuja distribuição cumulativa inversa (1-CDF) tem valor mediano 2 e a media 3, a partir da qual foram extraídos os dados da tabela.

Tab. 2 - Resumo estatístico do numero de *stroke* em um flash com dados do mundo todo

<i>Stroke</i> /flash	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>10
probabilidade	0,45	0,14	0,09	0,08	0,07	0,04	0,03	0,02	0,02	0,06
1-CDF	1	0,55	0,41	0,32	0,24	0,17	0,13	0,10	0,08	0,06

Fonte: Anderson & Eriksson, 1980, [58]

Verifica-se então que o valor de 3 descargas (*strokes*) por flash verificado nos dados do LLS SIPAM estão dentro da normalidade geral.

O resumo estatístico da Tabela 1 mostra que os sistemas LLS têm uma péssima eficiência de detecção para descargas intra-nuvem (15,76%) uma vez que esses eventos são acreditados para terem um índice de cerca de 75% do numero total de atividade de raios. A atividade de raios intra-nuvem é melhor avaliada com o uso de antenas com polarização horizontal e frequências na faixa de HF/VHF.

A percentagem de raios positivos (24.21%) quando comparada com a de raios negativos (75.79%) e com os valores obtidos em outras partes da

terra mostram um valor um pouco maior, no entanto ainda permanecem dentro de valores considerados normais. Os valores baixos de atividade de raios positivos se deve ao fato de a acumulação de cargas positivas concentram-se próximo ao topo da nuvem nos cristais de gelo mais leves e as negativas em baixo nas gotículas de água mais pesadas, o que torna negativa a superfície terrestre em baixo da tempestade, que obriga as cargas positivas a longas descargas laterais e algumas poucas na fase de dissipação da tempestade.

Um trabalho de 1941 já observava que o valor da corrente de *stroke* é menor em altas altitude do que ao nível do mar [59] e que nesses casos temos 64% de negativos e 36% de positivos.

O LLS SIPAM esta configurado para máxima distancia de 2000 km, sendo ignoradas detecções acima desse alcance. Usando as grandes distancias de propagação experimentadas pelos *sferics* gerados pelas correntes de *strokes* na faixa VLF/LF do espectro eletromagnético, mesmo que o algoritmo de localização não use qualquer forma de sintonia para recepção a longa distancia [60],[61], obteve-se boa detecção com um valor de exatidão de localização (LA=Location Accuracy) da ordem de 5,5km (min 0.3km, max. 50km) como mostrado na Tabela 3.

Tab. 3 – Valores de exatidão posicional do LLS SIPAM

Local	LA	Alcance
Itaituba	20km	875 km
Manaus	8km	1.270 km
Codajas	9km	1.500 km
Belém	300m	

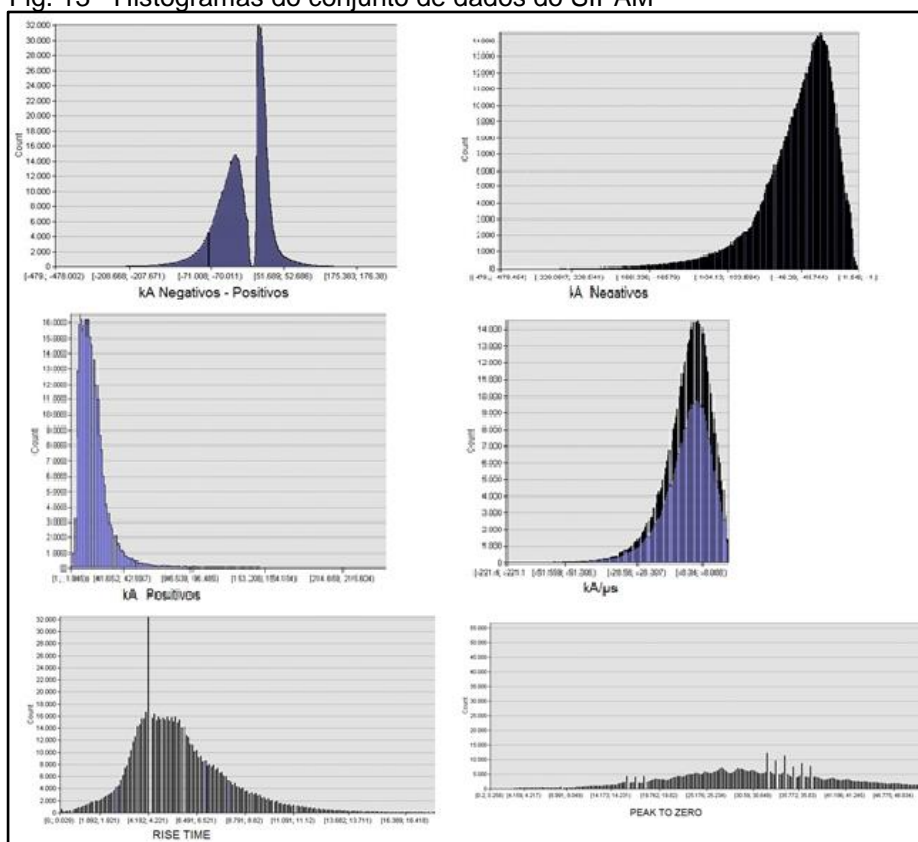
Fonte: Autor/Excel, 2014

A localização de tempestades em áreas distantes é normalmente checada por contactos através da rede SIPAM VSATNET, uma rede de vsats espalhadas por toda Amazônia. Foram também realizados algumas experiências de comparação com dados do sensor LIS a bordo do satélite da missão TRMM da NASA [62].

4.3 GRÁFICOS & CURVAS ESTATÍSTICAS NA PROTEÇÃO CONTRA RAIOS

Na Figura 13, podemos ver o conjunto de histograma do conjunto de dados utilizado, para o qual um ajuste foi executado, mostrando que as melhores correlações foram obtidas com as distribuições Gamma e Log-Normal. A distribuição Log-Normal tem sido bastante usada na área de proteção contra raios, inclusive em alguns padrões internacionais, por esse motivo será adotada neste trabalho como uma função densidade que melhor representa os valores de amplitude da corrente do primeiro *stroke* de raios.

Fig. 13 - Histogramas do conjunto de dados do SIPAM



Fonte: Autor/ArcGis, 2014

O conjunto de histogramas da Figura 13 mostra os raios -CG a esquerda e os +CG a direita, de onde pode-se inferir uma assimetria entre os dois tipos de raios, observando-se também um grande aumento localizado de raios +CG com pequenos valores de corrente que segundo Cummins [63] e outros autores têm sido classificada erroneamente pelo algoritmo de processamento e foi cunhado como “contaminação de raios CG por raios IC”, que talvez possam ser expurgados com um retraçado da parte direita do histograma.

Além dos valores de amplitude da máxima corrente, é mostrado também o histograma de outras variáveis importantes para a proteção de estruturas e sistemas como:

1. Taxa de variação da corrente em kA/ μ s (*Steepness*) que em circuitos com características indutivas pode levar a sobre tensões perigosas.
2. Tempo de subida da frente em μ s (*Front time*) que pode gerar quebra explosiva da rigidez dielétrica dos isolamentos.

Essas variáveis estão contidas em todos os padrões de sistemas de proteção contra raios (SPDA), usados no mundo todo [64] e são resumidas na Tabela 4 onde se compara os valores calculados pelo LLS SIPAM com dados da torre do Morro do Cachimbo de Visacro [2] e os dados da torre de San Salvatore de Berger [1].

Tab. 4 – Resumo comparativo dos dados do LLS SIPAM

Parâmetro	LLS SIPAM	S. Visacro	K. Berger
Tempo de subida/tempo p/ zero (μ s)	6/32		
<i>Front time</i> (μ s)	6	5,6	5,5
<i>Steepness</i> (kA/ μ s)	12,2	18,9	12
Valor mediano da corrente (kA)	53	48,4	31.1

Fonte: Autor/Excel, 2014

Os dados, coletados por K. Berger até 1975 são até hoje utilizados em todos as normas de proteção, mas podemos inferir pela comparação mostrada na Tabela 4 que os dados de Berger não são os mais representativos para as condições da região amazônica.

4.4 CURVA CUMULATIVA NA PROTEÇÃO CONTRA RAIOS

A base para as ações de proteção contra raios está contida em função estatística de distribuição cumulativa de amplitude máxima de corrente [65]; essa função (Cumulative Distribution Function – CDF) fornece a frequência

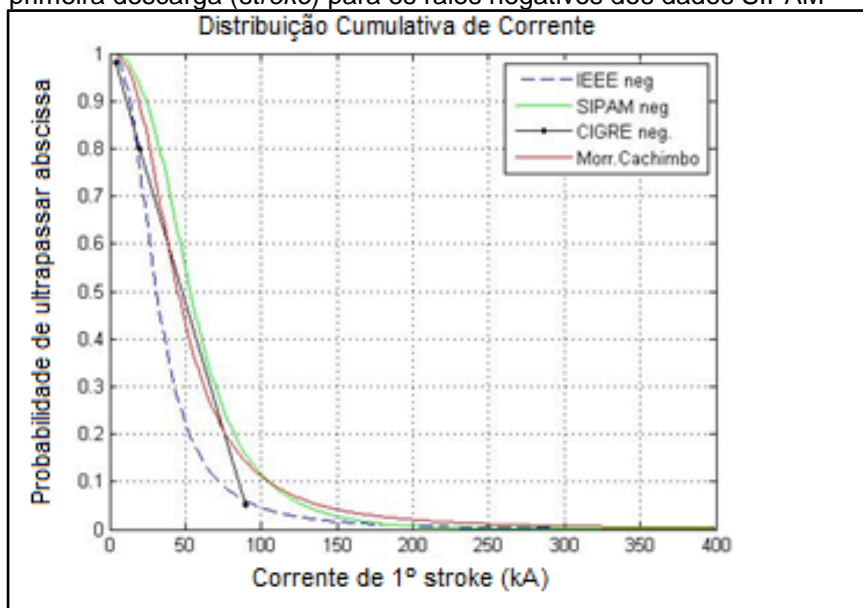
relativa com a qual observações ou medições são esperadas para serem menor do que (à esquerda de) um determinado valor de abscissa; no entanto, para as pesquisas de raio, é adotada uma curva cumulativa inversa (1-CDF), ou seja, que fornece a frequência relativa de uma observação ultrapassar determinado valor em abscissa. Essa estatística é baseada em medições diretas em torres instrumentadas como as executadas por K. Berger até 1975 [65], mas podem ser obtidas a partir de dados de LLS

Outras medições em torres instrumentadas estão mostrando valores de amplitude máxima de corrente diferentes e maiores das medidas por K. Berger, mas que não têm recebido atenção de alguns segmentos da comunidade de pesquisa em descargas elétricas na atmosfera.

Dois grupos fortemente engajados na pesquisa de proteção contra raios são o CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Électriques ou International Council on Large Electric Systems) com sede em Paris e o IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos), organização profissional sem fins lucrativos, fundada nos Estados Unidos.

Os documentos técnicos produzidos pelos dois grupos são razoavelmente semelhantes, mas há algumas divergências entre os documentos produzidos pelos dois grupos e uma boa visão dessas diferenças e semelhanças pode ser encontrada na referência [66].

Fig. 14 - Curva cumulativa inversa (1-CDF) das amplitudes de corrente de primeira descarga (*stroke*) para os raios negativos dos dados SIPAM



Fonte: Autor/Matlab, 2014

Na Figura 14 estão plotadas curvas cumulativas da distribuição da amplitude de corrente de raios para varias situações, entre as quais:

1. A curva básica para o padrão do IEEE (tracejado azul)
2. Reta passando por pontos específicos, endossada pelo CIGRE
3. Curva para a torre instrumentada do Morro do Cachimbo de Visacro, usando-se a formula (18) do IEEE e corrente mediana de 45kA
4. Curva empírica com os dados do LLS do SIPAM, em traçado verde

Como se pode inferir pela análise da Figura 14, os dados do LLS SIPAM com uma corrente máxima mediana de 53kA, estão dentro do limite de variação das medições obtidas na torre do Morro do Cachimbo e mesmo das expectativas da curva do CIGRE.

A curva IEEE é baseada em dados de Popolansky [67] como desenvolvido por Anderson [68] e é dado por

$$P(I_p) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_p}{31}\right)^{2,6}} \quad (19)$$

onde $P(I_p)$ é a probabilidade que a corrente seja igual ou maior que o correspondente valor em abcissa [69]. O valor 31 é a mediana da corrente de pico da primeira descarga (*stroke*), de acordo com dados de K.Berger como já informado anteriormente.

4.5 CONCLUSÕES

A área de cobertura do LLS SIPAM é sede de variados tipos de influencias, como sistemas de brisa marinha oriundos do litoral norte, sistemas locais coma a Linha de Convergência do Marajó (LCM), o dossel de florestas e sistemas globais como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) [4], todos promovendo forte convecção e raios.

As análises mostram que o conjunto de dados coletado pelo LLS SIPAM mantem características físicas e elétricas com dados coletados em torres instrumentadas, como os dados de K. Berger em San Salvatore na Suíça e principalmente com dados de Visacro na torre do Morro do Cachimbo em Belo Horizonte, Brasil.

A comunidade de pesquisa em descargas atmosféricas ainda não aceita os valores medianos de correntes máximas obtidas no Brasil por considerar muito poucos dados coletados, baseando as normas nos valores de K. Berger principalmente.

Mas é de se esperar que nos trópicos, principalmente devido a grande atividade convectiva, o motor por trás da eletrificação das nuvens, os valores medianos de corrente máxima são maiores.

Nos grandes projetos de construção de sistemas geradores hidroelétricos e a necessidade de linhas de transmissão em construção na Amazônia está faltando um item imprescindível: a implantação de sistemas LLS que dê apoio a proteção e operação desses sistemas de geração e transmissão.

Sem esse tipo de sistema não ocorre o completo aproveitamento do aperfeiçoamento metodológico e científico no entendimento dos processos de ocorrência de raios como base para um melhor sistema de proteção contra raios, pois se não conhecermos os níveis de densidade de raios nos locais a serem protegidos e a variação dessas características durante a operação das linhas de transmissão esses benefícios não são alcançados.

Uma opção sumamente importante seria a existência nas salas de despachos do setor elétrico de informações em tempo real da atividade de raios ao longo das linhas e subestações sendo operadas.

Capítulo V CARACTERÍSTICAS DOS RAIOS COM A ALTURA

5.1 ESTRUTURAS ALTAS & RAIOS

É bem conhecido desde tempos imemoriais que a frequência de atingimento por raios em uma determinada região, aumenta com a altitude ou altura da estrutura em relação ao nível do mar. Na idade média era notório o atingimento de torres de igrejas ou torres de vigia [70] o que levou à primeira técnica de proteção conhecida: os sinos eram batidos na tentativa de afastar os raios, causando inclusive varias mortes de sineiros; essa observação perpassa pela época pioneira de Benjamin Franklin que propôs um experimento “*on the top of some high tower or steeple place a kinde of sentry box...*” [71]; James Clark Maxwell em 1876 postula que os para-raios tipo Franklin atraiam mais raios que as outras estruturas. Debutando na época moderna nos estudos de Eriksson de 1987 em seu trabalho “*Lightning and tall structures*” [72]. Então num mundo em que as estruturas estão cada vez mais altas é importante incorporar essa variável nos modelos que lidam com o comportamento dos raios.

Neste trabalho são geradas formulas (mini modelos) para o calculo do raio de atração, um parâmetro importante que incorpora as ações das variáveis amplitude máxima de corrente do primeiro *stroke* (I_p) e da altura da estrutura (h), e utilizado no calculo da área de atração (A_a), usando-se dados gerados:

- 1 - Pelo modelo LPM ModSalto;
- 2 - Pela correlação da densidade de raios com a altitude para os eventos de raios na Amazônia Oriental, como detectado pelo LLS SIPAM.

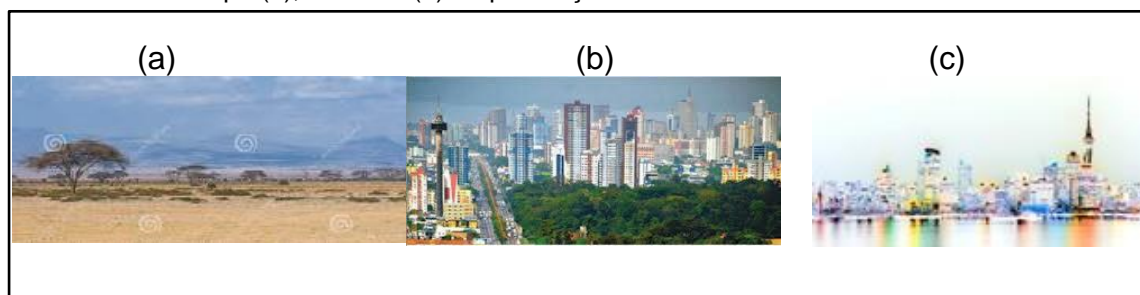
As formulas obtidas serão comparadas com formulas já estabelecidas por renomados pesquisadores na área de sistemas de proteção contra raios, ou SPDA's.

5.2 O RAIÃO DE ATRAÇÃO

A estimativa da quantidade de raios que atinge uma dada estrutura usa uma técnica advinda da ciência das antenas, onde a área efetiva da antena considera o tamanho elétrico da estrutura da antena maior que sua estrutura física ([73], [74] correlacionando a potencia coletada com a densidade de potencia por metro quadrado interceptada pela área efetiva da antena e esta com o ganho da antena e comprimento de onda da radiação envolvida, com a formula $A = \lambda^2 G / 4\pi$.

Analogamente uma estrutura tem em sua altura um fator equivalente ao ganho da antena, ou seja quanto mais alta a estrutura maior será a atração e portanto a quantidade de raios que a atingirão, até um ponto de saturação.

Fig. 15 – A competição pela atração de um líder descendente varia segundo o tipo de ambiente com campo (a); edifícios (b) ou presença de altas torres.



Fonte: Autor/Photoshop, 2014

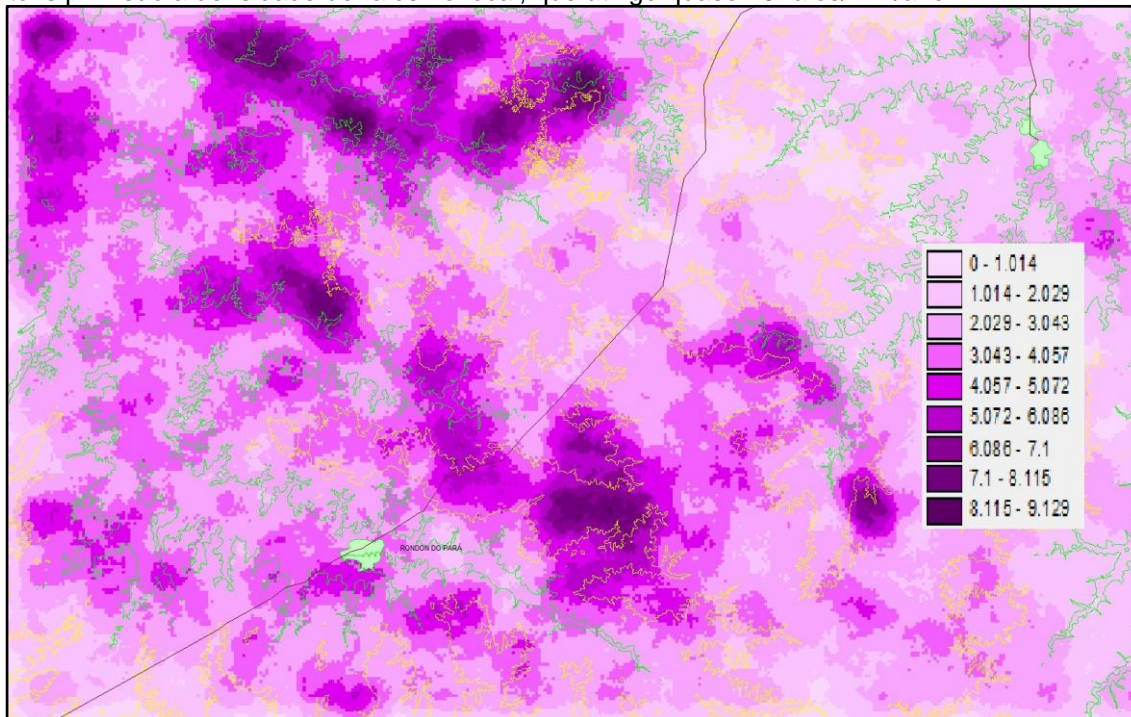
Durante a trajetória de um líder descendente na atmosfera, pela lei de Coulomb haverá uma força atrativa entre as cargas do líder e as cargas opostas surgidas nas estruturas aterradas na superfície. Na Figura 15 estão mostradas as alternativas de competição: na condição (a) de superfície plana e altura equivalente das estruturas a probabilidade de atração é igual para as diversas estruturas que estejam aterradas; já em situações (b) em que existam variações na altura, as mais altas têm aumentada sua probabilidade de atração; até uma situação extrema (c) em que uma estrutura, por ser a mais alta da redondeza, tem atribuída a si um máximo de probabilidade de atração.

A probabilidade de uma estrutura ser atingida por raios é função da área projetada no solo, já o raio de atração (R_a) tem a finalidade de quantificar o aumento dessa probabilidade em função de sua altura.

Para a formatação de uma fórmula para cálculo do raio de atração foram selecionadas áreas dentro da cobertura do LLS SIPAM com reconhecida ocorrência de elevações como a serra do Tiracambu e serra dos Carajas.

A condição de aumento da densidade de raios com a altura pode ser observado em algumas áreas da Figura 16, que representa a densidade de raios obtida com os dados do LLS SIPAM. Esses dados localizados (região entre Dom Eliseu e Marabá nas faldas da Serra do Tiracambu) são correlacionados com dados de altimetria do SRTM da NASA, obtendo-se matriz de dados contendo a variação estatística da altura, da amplitude de corrente e da densidade de raios no local.

Fig. 16 – Densidade de raios e curvas de nível da Serra de Tiracambu próximo a Rondon do Pará. As curvas verdes delimitam áreas até 100m e as amarelas, áreas acima de 200m. Os tons pink são a densidade de raios no local, que atinge quase 10 raios/km²/ano.

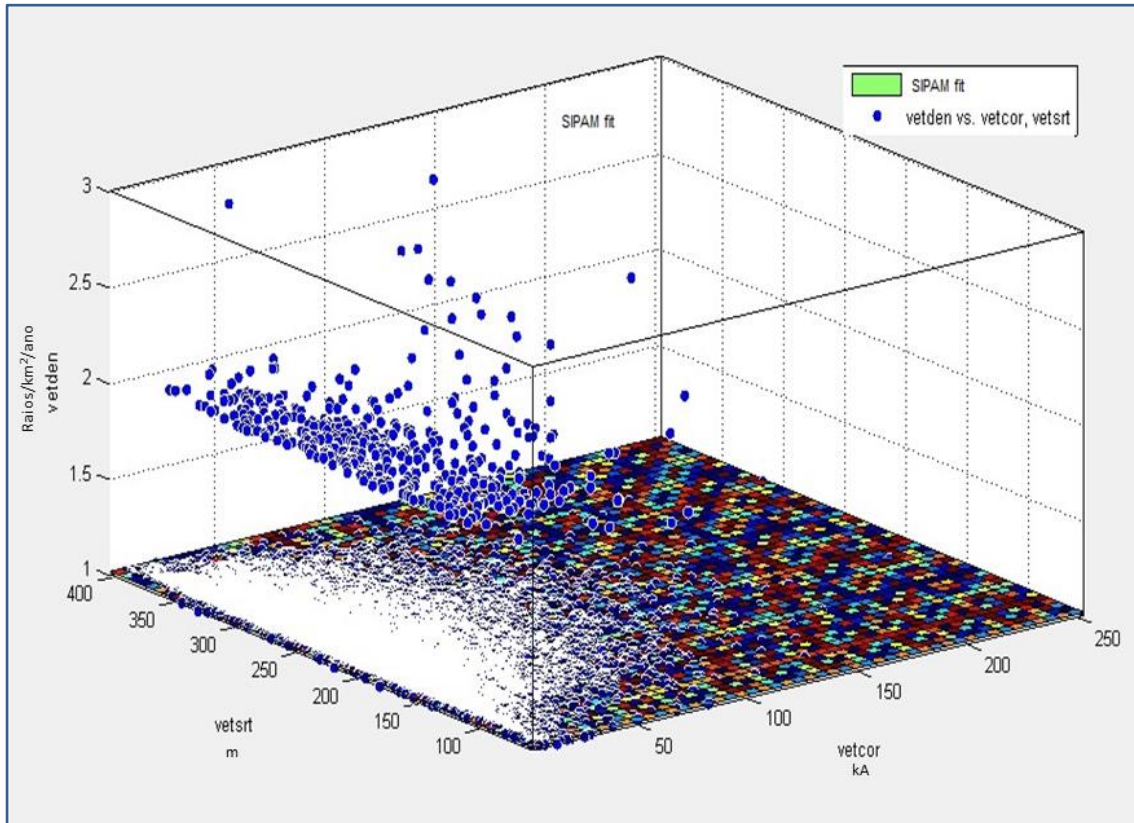


Fonte: Autor/ArcView, 2014

De cada área é retirado um conjunto de três vetores representando sua inter-relação no local (vetor de amplitude de corrente em kA, de altura em metros e de densidade de raios em raios/km²/ano); cada conjunto de vetor é analisado com software de ajuste de curva, gerando-se equações expressando essa dependência. Na Figura 17 está mostrado esse tipo de análise. Com o objetivo de saturar o valor do raio de atração a partir de um determinado nível,

é suposto haver uma relação linear entre o raio de atração e a densidade de raios em cada célula. Depois se compõem as duas equações, chegando-se a formula final.

Fig. 17 – Dados de altura, corrente e densidade de raios na forma superfície 3D



Fonte: Autor/Matlab, 2014

Com os dados da análise de superfície 3D da Figura 17 é derivado uma forma 2D apropriada para a geração de uma família de curvas, estabelecendo-se uma formula de potência que fornece a densidade de raios em função da altura e da amplitude máxima de corrente, dada por

$$D_r = 8.6956 I_p^{0.67} h^{0.45} \quad (20)$$

Assumindo uma correlação linear entre o raio de atração R_a e a densidade de raios D_r , temos que

$$R_a = k D_r . \quad (21)$$

Definindo-se a constante k em função de uma reta de coeficiente angular 0,3 para assegurar o nível de saturação desejado e com a substituição de (19) em (20) obtém-se

$$R_a = 1.23I_p^{0.67}h^{0.45} \quad (22)$$

Como a expressão para o raio de atração não pode subir indefinidamente, foi ajustado um nível de saturação, a partir do qual o valor do parâmetro k pôde ser avaliado.

5.3 COMPARAÇÃO DE FÓRMULAS DE RAIOS DE ATRAÇÃO

Como forma de avaliação da formula do raio de atração determinada neste trabalho e utilizada no LPM ModSalto, utilizando dados do LLS SIPAM para a Amazônia, fazemos uma comparação de formulas para calculo do raio de atração desenvolvidas por diversos autores; por sua importância e credibilidade foram selecionados as formulas de trabalhos de Eriksson [29], Rizk [33], Petrov [12].

As formulas selecionadas para esta comparação foram escolhidas por sua grande aceitação na comunidade de engenharia que faz análise e projeto de sistemas de proteção contra raios, e apresentadas aqui, sendo dadas por

$$R_a = 0.84I_p^{0.74}h^{0.6} \quad \text{Eriksson} \quad (23)$$

$$R_a = 25.9h^{0.48} \quad \text{Rizk} \quad (24)$$

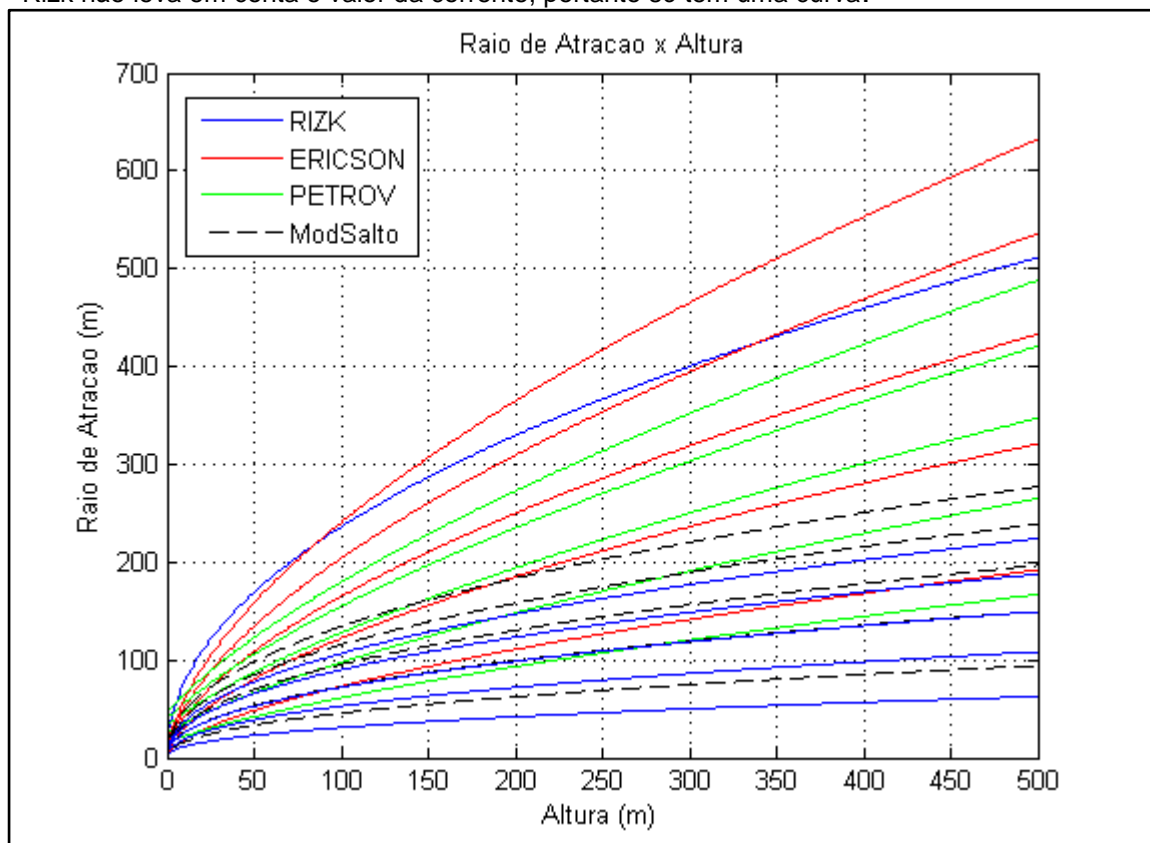
$$R_a = 0.56[(h + 15)I_p]^{2/3} \quad \text{Petrov} \quad (25)$$

$$R_a = 1.23I_p^{0.67}h^{0.45} \quad \text{Pereira} \quad (22)$$

A formula de Eriksson foi estabelecida para ser usada com um método de alocação de para-raios (também denominados terminal aéreo ou *air-terminal*) denominado CVM (Collection Volume Method) que complementaria o método EGM [28], por introduzir a influencia da altura e da relação de velocidades do líder ascendente e descendente. Por esse método o ponto de atingimento do raio deveria estar dentro da distancia de salto do líder

descendente, e também dentro de um volume determinado pelo raio de atração. O CVM tem sido criticado por inúmeros autores como Mousa [75] entre outros, em função de reportes de falhas de proteção em estruturas que segundo ele, explicitamente usaram o método.

Fig. 18 – Gráfico das formulas para raio de atração estão plotadas para valores de corrente de 10, 20, 30, 40 e 50 quilo Ampere (kA) (sequencia das curvas de baixo para cima). A formula de Rizk não leva em conta o valor da corrente, portanto só tem uma curva.



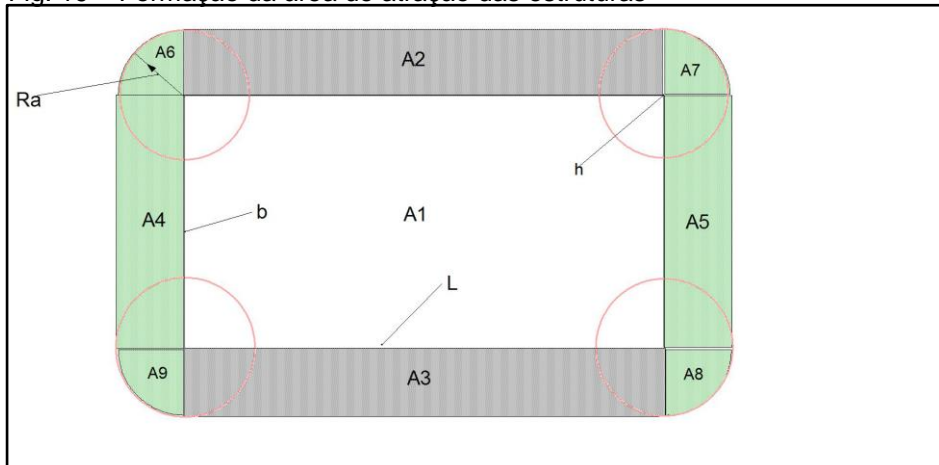
Fonte: Autor/Matlab, 2014

Observa-se da Figura 18 que todas as formulas plotadas apresentam um aumento exponencial com a altura da estrutura. A formula do ModSalto satura mais rapidamente que as outras a partir de 300 metros de altura, isso reflete a crença do autor que o raio de atração não pode crescer indefinidamente, pois numa redução ao absurdo poderíamos ter uma estrutura que conseguisse coletar todos os raios da terra, o que é um exagero. A aferição dessa hipótese só pode ser conseguida com muita observação, principalmente com fotografia de alta velocidade.

5.4 A ÁREA DE ATRAÇÃO

O raio de atração descreve a influencia da altura na capacidade de coletar raios, mas a estrutura de per si também compõe essa capacidade, em função de seu desenvolvimento espacial, assim, dado uma estrutura, a área de atração é formada como mostrado na Figura 19.

Fig. 19 – Formação da área de atração das estruturas



Fonte: Autor/Arcview, 2014

Dado uma estrutura cuja área projetada no solo é a área A1 como mostrado na Figura 19, com a equação (21) podemos calcular o raio de atração para as quatro arestas verticais com altura h (círculos vermelhos) cujo efeito é o de aumento da área original as expensas dos retângulos A2, A3, A4 e A5 cujas alturas são iguais ao raio de atração, bem como das áreas A6, A7, A8 e A9 que correspondem a área do círculo devido ao raio de atração, que materializa o conceito de área de atração dada por

$$A_a = \sum_1^n A_n = A1 + (A2 + A3) + (A4 + A5) + (A6 + A7 + A8 + A9) \quad (26)$$

Que arrumando-se os termos da soma fica

$$A_a = Lb + 2(R_a L) + 2(R_a b) + \pi R_a^2 = L(b + 2R_a) + 2bR_a + \pi R_a^2 \quad (27)$$

Para uma linha de transmissão, que é uma estrutura contínua, apenas as áreas A1 a A3 são retidas (uma vez que as outras áreas em tonalidade verde, estão

contidas na zona de continua da linha de transmissão), conforme sugestão de Rakov [76] levando a equação

$$A_a \cong L(b + 2R_a) \quad (28)$$

5.5 DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DA ÁREA DE ATRAÇÃO

Como alternativa ao somatório de áreas da equação (23) ou no caso de estruturas de difícil quantificação da área projetada no solo, a área de atração também pode ser obtida de forma analítica de acordo com o seguinte raciocínio: o raio de atração sendo função da amplitude máxima da corrente da primeira descarga e da altura da estrutura é representado pela função $R(I_p, h)$. A fração de raios com amplitudes no intervalo $i+di$ pode ser calculada com $f(I_p)di$. A fração de raios com amplitudes no mesmo intervalo que provavelmente atingirá a estrutura em um ano, num local em que a densidade de raios é N_g é dado por

$$dN = N_g \cdot \pi [R(I_p, h)]^2 \cdot f(I_p) di \quad (29)$$

logo o numero total de raios N é dado por

$$N = N_g \cdot \pi \int_0^\infty [R(I_p, h)]^2 \cdot f(I_p) di \quad (30)$$

Então a expressão à direita de N_g tem dimensão de uma área, a área de atração, dada por

$$A_a = \pi \int_0^\infty R_a^2(I_p, h) f(I_p) dI_p \quad (31)$$

Onde $f(I_p)$ é uma função dada pelo intervalo onde está a corrente prospectiva da descarga usada na definição do R_a , que para uma distribuição log-normal, que quantifica a probabilidade de ocorrência de descargas de raios, é dada por

$$f(I_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot I_p} \exp \left[-\frac{(\ln I_p - \ln \bar{I})^2}{2\sigma^2} \right] \quad (32)$$

Que substituindo na equação (25) da

$$A_a = \pi \int_0^\infty R_a^2(I_p, h) \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot I_p} \exp \left[-\frac{(\ln I_p - \ln \bar{I})^2}{2\sigma^2} \right] dI_p \quad (33)$$

onde \bar{I} é a intensidade mediana de corrente e σ é o desvio padrão da amplitude das correntes de primeira descarga. Com a integração de (27) obtém-se o valor para a área de atração.

Como já foi citado anteriormente a aplicabilidade da distribuição Log-Normal às características de corrente de raios tem sido comprovada por inúmeros trabalhos como o de Anderson & Eriksson [58] entre outros. Observar que a media μ , para esta distribuição é maior que a mediana. Para os valores de $\bar{I}=31$ kA e $\sigma=0.7368$, encontramos que $\mu \approx 40$ kA.

5.6 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi avaliada a questão do aumento do raio de atração com a altura, ou que estruturas mais altas são mais atingidas por raios que estruturas mais baixa.

A partir de dados de ocorrência de raios na área de cobertura do LLS SIPAM e dados altimétricos SRTM da NASA foi feito estudo em áreas apresentando relevo, usando um programa de computador, obtendo-se vetores inter-relacionados de densidade de raios, altura e amplitude de corrente de primeira descarga. Com esses vetores foi ajustado uma superfície tridimensional e depois escalada para 2D usando-se o vetor de amplitude de corrente como parâmetro definindo-se uma formula que melhor descreva a variação dos dados da Amazônia oriental com a altura da estrutura, fórmula que esta incorporada no ModSalto, o modelo construído neste trabalho, se constituindo, de per si, em uma alternativa 'tropicalizada' para uso em projetos e análise de proteção contra raios.

Esse tipo de pesquisa é importante, pois tem influencia no calculo da distancia de salto que define o nível de proteção obtido, no entanto, até o momento esse fato não é levado em conta pelas diversas normas existente, inclusive a norma brasileira.

Capítulo VI APLICAÇÕES NA ÁREA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA & DISCUSSÕES

6.1 INTRODUÇÃO

O objetivo principal do estudo dos raios esta em conhecermos o processo de seu desenvolvimento e aplicar esse conhecimento em formas de proteção contra raios, já que seu poder destrutivo pode causar mortes, a danificação de sistemas importantes à sobrevivência e bem estar da humanidade, etc.

Nos capítulos anteriores foram abordados vários tópicos da Ciência dos Raios, como:

1. No Capítulo II, foi apresentada uma visão geral do desenvolvimento da eletricidade na atmosfera terrestre baseado em experiência e hipóteses teóricas sobre a física envolvida no processo de eletrificação das nuvens e as descargas ou raios.
2. No Capítulo III, abordamos o processo de *attachment*, o gatilho para a descarga com a apresentação do modelo ModSalto, que entre outras simulações calcula a distancia de salto usada nas análises e definição da proteção contra raios.
3. No capítulo IV, a característica dos raios na Amazônia Oriental foi reanalisada tendo como base trabalho do autor de 2008 [49] e onde a comparação com dados internacionais concluiu por sua usabilidade em estudos e projetos de proteção contra raios.
4. No Capítulo V, a variação da incidência de raios com a altura foi analisada, determinando-se formula para calculo do raio de atração baseado em dados do LLS SIPAM e comparada com formulas de outros autores, normalmente utilizadas em analise de sistemas de proteção contra raios.

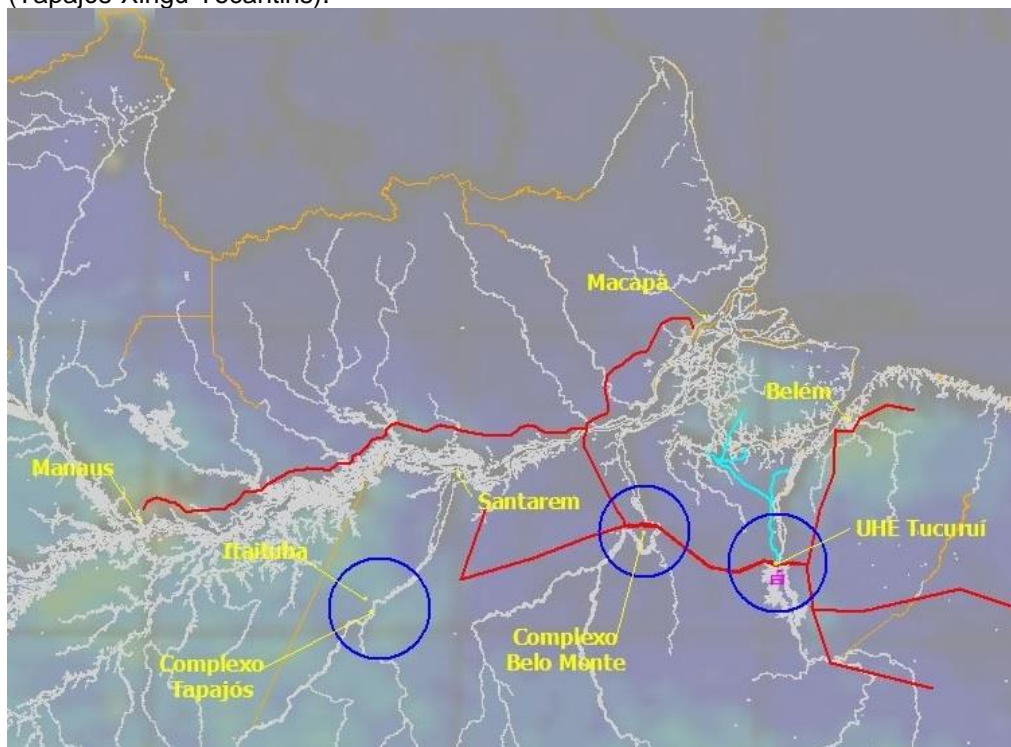
Neste ultimo capítulo será focado a aplicação dos conhecimentos da ciência dos raios na proteção dos sistemas de transmissão de eletricidade.

6.2 SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E GERAÇÃO NA AMAZÔNIA

O Brasil possui uma matriz de geração elétrica onde a geração hidráulica responde por 74% da oferta, conforme dados da Empresa de Pesquisa Energética – EPE no Balanço Energético Nacional [77].

Em 2012, o consumo de energia elétrica do setor residencial cresceu 4,4%, o setor industrial cresceu 3% e os demais setores – público, agropecuário, comercial e transportes – cresceram 6,4%, como um todo. Esse consumo de energia é suprido através do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Fig. 20 – Principais Sistemas de Geração/Transmissão no arco energético da Amazônia (Tapajós-Xingu-Tocantins).



Fonte: Autor

Para o período 2012-2021, o PDE 2021 [78] prevê um aumento médio anual de 3.074 MW, correspondente a 4,3% ao ano. A maior parte dessa demanda será suprida por hidroelétricas em existentes e em construção na Amazônia como os complexos de Belo Monte (11.233 megawatts) em Altamira e o Complexo Tapajós (8,5 mil megawatts) em Itaituba (Figura 20).

Para levar essa energia aos centros de consumo há que se basear em extensos sistemas de transmissão com características únicas, com grandes

extensões, altas torres de transmissão grande incidência de descargas atmosféricas e grandes blocos de energia sendo transmitidos, aumentando significativamente a vulnerabilidade a raios desses sistemas de transmissão.

6.3 METODOLOGIA APLICADA A PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Esta pesquisa tem como uma de suas contribuições uma metodologia para avaliação da proteção de linhas de transmissão de energia elétrica usando o modelo EGM (Electro-Geometrical Model), que permite a verificação do estado de proteção propiciado por cabos para-raios, que são instalados a cima dos condutores de fase da linha.

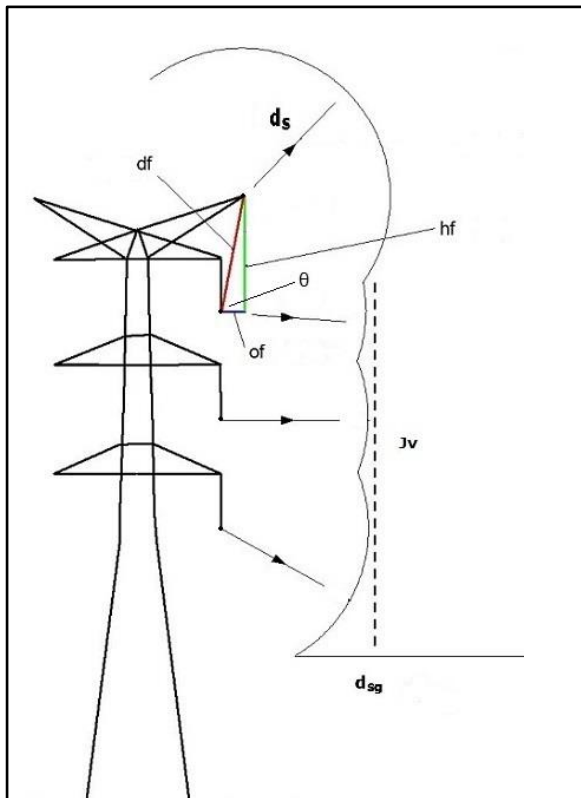
Essa metodologia é Baseada no método EGM com o uso de um parâmetro chamado janela de vulnerabilidade (J_v) que pode ser extraído de forma gráfica e analítica com mostra os dados da Figura 21, para uma torre de transmissão semelhante às usadas na Amazônia.

6.4 EGM ANALÍTICO E A JANELA DE VULNERABILIDADE

O estudo e análise de sistemas de proteção contra raios é efetivado com o uso do Modelo Eletro-Geométrico (EGM, Armstrong & Witehead) que é um modelo de avaliação gráfica, permitindo a introdução de erros adicionais no processo de desenho e medição gráfica.

Neste capítulo é desenvolvida uma ferramenta analítica para avaliação do EGM, consistindo de calculo do ponto de intercepção dos círculos de proteção que têm o centro no nível dos cabos para-raios, com o circulo locado no nível da fase da LT. A partir desse ponto são resolvidos os valores de janela de vulnerabilidade, entre outros, simplificando a extração de parâmetros característicos do modelo.

Fig. 21 – EGM Analítico



Fonte: Autor/ArcView, 2014

Na Figura 21 é mostrado o desenho simplificado de uma torre de 62 metros usada em linhas de transmissão na Amazônia, onde estão assinalados os principais elementos construtivos:

d_s distancia de salto

df distancia da fase ao cabo para-raios

of afastamento lateral do cabo para-raios em relação ao condutor da fase

J_v janela de vulnerabilidade

d_{sg} distancia de atração a terra

θ Equivalência ao ângulo de proteção

A janela de vulnerabilidade, que quantifica a insuficiência de proteção oferecida pelo cabo para-raios é representada pelo segmento de reta que inicia nas coordenadas de intercepção dos dois círculos com raio igual a distancia de salto (um no cabo para-raios e outro no condutor de fase) a direita da mediatriz

da reta que une o ponto do cabo para-raios ao ponto da fase ate a reta que representa o raio de atração da terra. Essas coordenadas são dadas pelas formulas

$$y = \frac{d_f^2 - 2o_f x}{2h_f} \quad (34)$$

$$e \quad x = \frac{o_f d_f + \sqrt{o_f^2 d_f^2 - 4d_f^4 + 16h_f^2 d_s^2}}{4d_f} \quad (35)$$

A janela de vulnerabilidade pode ser avaliada com

$$J_v = y + 2d_f + d_s \quad (36)$$

quando a conformação das fases é vertical, ou

$$J_v = y + d_s \quad (37)$$

quando a conformação é horizontal.

O ângulo θ da Figura 21 é dado por

$$tg\theta = \frac{h_f}{o_f} . \quad (38)$$

Esse ângulo é equivalente ao angulo de proteção que pode servir para complementar avaliação cruzada do nível de proteção, como fornecido pelo Método do Ângulo de Proteção.

6.5 TAXA DE FLASHOVER DEVIDO A RAIOS LFR (LIGHTNING FLASHOVER RATE)

Como parâmetro normativo para avaliar a proteção de uma linha de transmissão sob a ação de raios é usado o índice denominado raios/100km/ano, especificando o numero de raios tolerável que provavelmente atingirão os condutores de fase da LT numa extensão de 100km por ano. Isso

é chamado no jargão dos engenheiros da área como ‘falha da blindagem’ (*shielding failure*) implicando que houve uma falha na proteção.

Observe-se que uma definição desse tipo implica na consideração de que a linha estava totalmente protegida e que houve uma falha de proteção. A associação do índice só com os condutores de fase exclui o *backflashover*, tanto nos originários de atingimentos do cabo para-raios como os atingimentos na estrutura; a especificação apenas para um trecho de 100km leva também a um índice variável quando a LT exceder esse valor. Observa-se também que eventuais cálculos de taxa de *flashover* esperadas na LT muitas vezes não têm nenhuma conexão com esse índice.

Por esses fatos e pela natureza do que está sendo calculado por esta metodologia estamos sugerindo o uso de um parâmetro denominado LFR (Lightning Flashover Rate) a ser usado como parâmetro normativo de avaliação da tolerância de uma LT a raios, e como um atingimento por raio em qualquer ponto de uma estrutura de um sistema de transmissão é potencialmente um *flashover*, daí vem o seu nome. A unidade de medida a ser utilizada na quantificação desse índice é a mesma dos mapas de densidade de raios ou ‘raios por quilometro quadrado por ano’.

6.6 METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DA LFR

Usando metodologia definida neste trabalho e detalhada no apêndice A, a eficiência de proteção do cabo para-raios é avaliada calculando-se a taxa de *flashover* devido a raios (LFR), principalmente em pontos sensíveis do trajeto da LT como travessia de rios, trajetos sobre o dossel de florestas densas, trajetos em cerrados, alagados, etc., considerando-se

1. Níveis de densidade de raios obtidos de mapas de densidade de raios;
2. Numero prospectivo de atingimentos obtidos com o uso de parâmetros como raio de atração e área equivalente;
3. Nível de proteção usando Método EGM e distancia de salto, materializado por janelas de vulnerabilidade, indicativo de insuficiência de proteção;

4. Parâmetros fornecidos por gráfico de estatística cumulativa de máxima amplitude corrente na área da LT em análise.

Valores obtidos com o uso de janelas de vulnerabilidade do método de proteção e valores de distancia de salto com formulas derivadas pelo ModSalto e densidades de raios da ordem de 5 a 12 raios/km²/ano têm mostrados níveis de LFR (raios/km²/ano) de 0,3403 a 0,8227 para linhas de transmissão longas (~1500km) com tensão de 500 kV na região amazônica [3], principalmente na parte oriental, mostrando significativos aumentos de LFR em relação ao valor equivalente ao comprimento da linha, de 0,15, usados em licitações de obras de linha de transmissão na Amazônia, por órgãos oficiais.

Trabalhos baseados em modelos do tipo EMTP e similares para as mesmas condições elétricas de LT's apresentaram valores de LFR de 0.836 para a região amazônica [79]; outros trabalhos em diferentes ambientes usando técnicas semelhantes à deste trabalho, quando adaptados para as condições de comprimentos de LT na Amazônia apresentam valores de LFR da ordem de 0.9373 [41].

Esses resultados são encorajadores para a metodologia apresentada neste trabalho.

No entanto as discrepâncias verificadas entre as diversas formulas de estimativa de distancia de salto nos lembra o estado primário dessas avaliações, necessitando mais pesquisa, inclusive quanto a real existência física da distancia de salto, o que não invalida sua adoção como um parâmetro de avaliação da proteção.

O valor do índice de raios da ANEEL de 0,01/raios/100km/ano [80], significa que uma linha de transmissão de 100km, só seria atingida por raios em uma fase a cada 100 anos. Esse mesmo índice se aplicado a uma linha de 1500 km, por exemplo, seria equivalente a um raio a cada 6.6 anos, ainda aqui um numero difícil de acontecer. Esses números são extremamente otimistas, de difícil atingimento por projetos de linhas de transmissão, principalmente na Amazônia, assim estamos propondo:

1. A adoção dos valores dos índices elétricos associados a raios nos mesmos moldes da especificação da densidade de raios,

ou seja em unidades de quilometro quadrado por ano, independente do comprimento da LT.

2. Recomendar um valor denominado LFR (taxa de *flashover* devida a raios), mais provavelmente acessível de 0,255 raios/km²/ano, o que equivale uma ocorrência a cada 4,4 anos.

Observe-se que esse estado de coisa se deve também a dificuldade de verificação das taxas de *flashover*, normalmente avaliadas com o uso de recursos computacionais pouco disponíveis, sendo, principalmente por esses fatos que a rotina como a aqui apresentada, que usa modelos LPM, tem sua utilização, como um avaliador mais simples, não dispensando uma avaliação com ferramentas mais sofisticadas quando se fizer necessário.

6.7 A VISUALIZAÇÃO DE RESULTADOS

A simples visualização da taxa de *flashover* devido a raios (LRF) pode não dizer muita coisa ao leitor menos avisado; assim para um melhor compreensão desse parâmetro, mais eficaz seria a apresentação do período de tempo equivalente à taxa de variação, como mostra a Tabela 5, contendo os períodos equivalentes a LFR calculada para travessias de rios e florestas na Amazônia comparados com os períodos equivalentes da norma brasileira e com valores propostos como apresentado pelo autor em trabalho recente [3].

Tab. 5 – Visualização da LFR em Períodos de tempo

Travessias	Período da LFR em meses		
	ModSalto	Licitação ANEEL	Proposta
Rios	14,49	80	36
Dossel de florestas	35,26	80	36

Fonte: Autor/Excel, 2014

Os valores da Tabela 5 realçam a vulnerabilidade de linhas de transmissão na Amazônia como se vê pelos valores estimados pelo ModSalto e o valor contido na norma de licitação da ANEEL para construção das linhas de transmissão [80].

6.8 DISCUSSÕES FINAIS

O desenvolvimento desta tese foi baseado nas experiências do autor com a operação da Rede de Detecção de Raios do SIPAM, aqui denominado LLS SIPAM, que coletou uma considerável massa de dados, a partir da qual as observações e insight foram consolidados.

Neste trabalho tivemos o desenvolvimento inicial da hipótese de iniciação de líder e trajetórias de líderes baseado na física da força de Lorentz e na turbulência de Kolmogorov o que demandará bastante pesquisa que podem ser atendidas com a operacionalização da instrumentação da torre de TV RBA.

No estudo do processo de *attachment* foi desenvolvido um modelo, o ModSalto, que entre outras simulações permite a estimativa da distância de salto, possibilitando a gênese de fórmula de distância de salto para terra plana, usada em projetos e análise de proteção contra raios.

Com dados do LLS SIPAM foi efetivado análise de densidade de raios vs altitude, gerando dados para a criação e teste de fórmula para raios de atração, o principal parâmetro para quantificar o número de raios a atingir uma determinada estrutura.

Como aplicação da pesquisa foi desenvolvida uma metodologia para estimativa da LFR de uma LT baseada em um novo parâmetro denominado Janela de Vulnerabilidade, usando o modelo EGM em forma analítica, também lançada neste trabalho. Essa metodologia expande a 'capabilidade' do EGM de Armstrong & Whitehead, mostrando compatibilidade com resultados a trabalhos na área de engenharia Elétrica, principalmente nas de proteção contra raios e coordenação de isolamento, inclusive mostrando resultados compatíveis com os fornecidos por software há muito estabelecidos com é o caso do EMTP. Essa metodologia pode ser usada para derivação de parâmetros operacionais utilizados em despacho de carga e ferramenta de primeira mão para a avaliação de projetos de LT na Amazônia, avaliando sua resiliência a atingimentos por raios.

Como desenvolvimentos futuros e contando com a operação normal dos sensores da torre RBA, todos os tópicos desta pesquisa serão ampliados com o conhecimento advindo dessa operação, quando as hipóteses lançadas neste

trabalho serão detalhadas e confrontadas com os valores registrados nas descargas capturadas pela torre.

A metodologia para estimativa da LFR também será ampliada pelo acompanhamento da operação da LT Tucuruí-Macapá-Manaus que serviu de base para seu desenvolvimento, inclusive com a adição de rotinas para separação das frações de *flashover* e *backflashover* devido à atingimentos no cabo para-raios e atingimento da estrutura das torres.

Levando-se em conta os desenvolvimento mostrados neste trabalho e a ampliação da pesquisa internacional, o campo do estudo dos raios continuará sendo uma área de grandes desafios científicos.

REFERENCIAS

- [01] BERGER, K., ANDERSON, R.B., KRONINGER, H. *Parameters of lightning flashes. Electra*; 41: 23-37. 1975
- [02] VISACRO, S. *Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo Station, Atmospheric Research Journal* 117, 55-63. 2010,
- [03] PEREIRA, C.S.; ALMEIDA, A.C.; ROCHA, B.R.P.; FROTA, W.M. *Transmission line vulnerability to lightning over areas of dense rainforests and large rivers in the Amazon region. Electric Power Systems Research*, v. 119, p. 287-292, 2015.
- [04] PEREIRA, C.S.; SIMÕES NETO, B.; ANDRADE, V. *Wind Strengthening Mechanisms end Lightning Generation in Equatorial Storms. ERAD 2012 - THE 7TH EUROPEAN CONFERENCE ON RADAR IN METEOROLOGY AND HYDROLOGY.*
- [05] GUABG, Z. et al. *Linear-Grating Triboelectric Generator based on Sliding Electrification. Nano Letters*, 13 (5), pp 2282-2289. 2013.
- [06] WILLIAMS, E.R.; ZHANG, R.; RYDOCK, J. *Mixed-Phase Microphysics and Cloud Electrification. Journal of the Atmospheric Science*, v. 48, n19, pp 2195-2203. 1991.
- [07] CLARENCE, N.D.; and MALAN, D.J. *Preliminary discharge processes in lightning flashes to ground. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 83:161-172, 1957.
- [08] THOMSON, E.M. *Characteristic of port Moresby ground flashes. Journal of Geophysical Research* 85-1027-1036. 1980.
- [09] SUN, Z.; Q. and LIU M.. *Characteristics of a Negative Cloud-to-Ground Lightning Discharge Based on Locations of VHF Radiation Sources. Atmospheric end Oceanic Science Letters*, VOL. 7, NO. 3, 248–253. 2014.
- [10] UMAN, Martin A. *The Lightning Discharge*, Academic Press, Orlando, 1987.
- [11] CUMMINS, K.L. *Mapping the Impact of Terrain on Lightning Incidence and Multiple Ground Contacts in Cloud-to-ground Flashes*, XV International Conference on Atmospheric Electricity, Norman, Oklahoma, U.S.A. 2014.
- [12] PETROV, N.I, PETROVA, G, WATERS R.T. *Determination of attractive area and collection volume of earthed structures. In Proceedings 25th ICLP, Rhodes, Greece, 2000.*
- [13] CIGRE TB 549, *Lightning Parameters for Engineering Applications*, WG C4.407, 2013.

[14] BOUQUEGNEAU, C. *The Need for an International Standard on Lightning Location Systems*, 23rd International Lightning Detection Conference, Tucson, Arizona, USA. 2014.

[15] GUREVICH, A.V.; ZYBIN K.P. et al. *Lightning initiation by simultaneous effect of runaway breakdown and cosmic ray showers*, *Physics Letters A*, 254, 79-87, 1999.

[16] FRISCH, Uriel. *Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov*. Cambridge University Press, 1995.

[17] LORENTZ, H.A. *La Théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants* on Internet Archive, Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles 25: 363–552. 1892.

[18] PEREIRA, C.S.; ALMEIDA, A.C.; LOPES, J.L.M. et al. *Combining LLS Data with Meteorological Radar Data to Gain Insight in Lightning Physics*. Proceedings of Ground'2010 LPE & 4d, Salvador, Brazil.

[19] SHUNICHI, T. *The Kolmogorov turbulence theory in the light of six-dimensional Navier-Stokes' equation*. arXiv:nlin. CD/0303013 v2 12, 2003.

[20] JORDAN, E.C. & BALMAIN, K.G. *Electromagnetic Waves & Radiating Systems*. Prentice-Hall, 1968 – 753p.

[21] LAMOR, J.J. *On the theory of electrodynamics*, *Proceedings of the Royal Society*. 1891.

[22] CARLSON, B.E. *Terrestrial gamma-ray flash production by lightning*. Ph.D. Thesis Defense, August 6, 2009.

[23] DWYER, Joseph; LIU, Ningyu and RASSOUL, Hamid. *Dark lightning: Are airplane passengers exposed to radiation from intense bursts of gamma-rays from thunderclouds?* Press conference meeting of the European Geosciences Union in Vienna, Austria, April 10. 2013.

[24] DEFONVILLE, W. *Thunder and Lightning*, New York, 1869.

[25] GOLDE, R.H. *Lightning. Volume 2: Lightning protection*. New York: Academic Press; 1977. pp. 545–76.

[26] ARMSTRONG, H.R. and WHITEHEAD, E.R. *Field and analytical studies of transmission line shielding*, *IEEE Transactions, PAS-87(1)*, 1968, 270–79.

[27] WAGNER, C.F. *Relation between stroke current and the velocity of the return stroke*. *IEEE Transactions. Power App. Syst.* 1963; 82:609–17.

[28] ERIKSSON, A.J. *An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis*. *IEEE Transactions*. 1987; PWDR-2:871–77.

- [29] ERIKSSON, A.J. *The incidence of lightning strikes to power lines. IEEE Transactions.* 1987; PWDR-2:859–70.
- [30] DELLERA, L. and GARBAGNATI, E. *Lightning strike simulation by means of the Leader Progression Model, Part I: Description of the model and evaluation of free-standing structures. IEEE Transactions.* 1990; PWRD-5:2009–23.
- [31] DELLERA, L. and GARBAGNATI, E. *Lightning strike simulation by means of the Leader Progression Model: II. Exposure and shielding failure evaluation of overhead lines with assessment of application graphs. IEEE Transactions on Power Delivery.* 1990; PWRD-5:2023–29.
- [32] RIZK, F. *Modeling of transmission lines: exposure to direct lightning strokes. IEEE Transaction on Power Delivery.* 1990; PWRD-5:1983–89.
- [33] RIZK, F. *Modeling of lightning incidence to tall structures Part I: Theory. IEEE Transaction on Power Delivery.* 1994; PWRD-9:162–71.
- [34] MAZUR, V.; RUHNKE, L. H.; BONDIOU-CLERGERIE, A. and LALANDE, P. *Computer simulation of a downward negative stepped leader and its interaction with a ground structure, Journal of Geophysical Research.* 2000, 105(D17), 22,361–22,369, doi:10.1029/2000JD900278.
- [35] LES RENARDIERES GROUP. *Negative discharges in longa air gaps at Les Renatdieres, 1978 results. Electra* 74; 67-216. 1981.
- [36] BACCHIEGA, G. L.; GAZZANI, A.; BEMARDI, M.; GALLIMBERTI, I. and BONDIOU, A. *Theoretical modeling of the laboratory negative stepped leader, paper presented at 1994 International Aerospace and Summary and Discussion on Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Bunderakademie fur Wehrverwaltung und Wehrtechnik, Mannheim, Germany, May 24-27, 1994.*
- [37] BONDIOU, A. and GALLIMBERTI, I. *Theoretical modeling of the development of positive spark in long gaps. Journal of Physics D: Applied Physics.* 27, 1252-1266, 1994.
- [38] BECERRA, M. and COORAY, V. *A self-consistent upward leader propagation model. Journal of Physics D: Applied Physics.* 2006;39:3708–15.
- [39] GALLIMBERTI, I. *The mechanism of long spark formation. Journal of Physique College.* 1972; 40(C7, Suppl. 7):193–250.
- [40] VAHIDI, B. TAVAKOLI, M.R.B. AHADI, S.M. *Leader Progression Analysis Model for Shielding Failure Computation by Using the Charge Simulation Method. IEEE Transactions on Power Delivery.* (Impact Factor: 1.52). 11/2008; DOI: 10.1109/TPWRD.2008.2002850.
- [41] BENGANG, W., ZHENGCAI, F. and HAIYAN, *Analysis of Lightning Shielding Failure for 500-kV Overhead Transmission Lines Based on an*

Improved Leader Progression Model. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 3, July 2009.

[42] PEEK JR., F.W. *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*. McGraw-Hill. New York 1915.

[43] BORGHETTI, A., NAPOLITANO, F., NUCCI, C.A., PAOLONE, M., BERNARDI, M. *Numerical Solution of the Leader Progression Model by means of the Finite Element Method*. 30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010 (Cagliari, Italy - September 13th -17th, 2010).

[44] REZA, M.; TAVAKOLI, B. and VAHIDI, B. *A metamodeling Approach for Leader Progression Model-based Shielding Failure Rate Calculation of Transmission Lines Using Artificial Neural Networks*. *Journal of Electrical Engineering & Technology* Vol. 6, No. 6, pp. 760~768, 2011, <http://dx.doi.org/10.5370/JEET.2011.6.6.760>.

[45] HERMOSO, J. R., MONTANYA, J., MARCH, V., VAN DER VELDE, O., SOLA, G., ROMERO, D., HERMOSO, B. and PINEDA, N. *A Propagative Model for Simulations of Electric Fields Produced by Downward Leaders*. *Journal of Lightning Research*, 2012, 4, (Supp 12: M5) 78-84.

[46] MAZUR, V. and RUHNKE, L.H. *Determining leader potential in cloud-to-ground flashes*. *Geophysical Research Letters*, VOL. 29, NO. 12, 1601, 10.1029/2001GL014159, 2002.

[47] COORAY, Vernon. *Lightning Protection*, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2010.

[48] Rizk, F.A.M.; Trinh, G.N. *High Voltage Engineering*, CRC Press, Florida, 2014.

[49] PEREIRA, C.S. ALMEIDA, A.C. ROCHA, E.J.P. SIMÕES NETO, B. PEREIRA DA ROCHA, B.R. *Lightning frequency of occurrence distribution over Eastern Amazon*, 2008, GROUND'2008 & 3rd LPE, Florianopolis, Brazil.

[50] GOLDE, R.H. *The frequency of occurrence and the distribution of lightning flashes to transmission lines*. *AIEE Transactions* 64, 1945, 902–10.

[51] MAXWELL, J.C. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Dover Publ., 1954, Chap. 9, section 145a.

[52] FERREIRA, G.F.L. *An approximate treatment for the strength of points*, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Brasil, v. 24, n. 3, p. 367-370, 2002.

[53] LI, Q.M. et al. *Physical mechanism and numerical simulation of the inception of the lightning upward leader*, *Physics of Plasmas* 19 (2012).

[54] RIZK, F.A.M. *Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes*, *IEEE Transactions on Power Delivery* 4 (1990) 596.

- [55] JIN, S., RUAN, J.J., DU, Z.Y. *Improved calculation method of electric field and power loss of EHV AC bundled conductors*, Guodong Huang School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan, China.
- [56] BOUQUEGNEAU, C. *Lightning Protection IEC EN 62305 Standard*, ETZ, Zurich, 2011.
- [57] MLODINOW, L. *The Drunkard's Walk*. New York: Random House, 2008. p. 50.
- [58] ANDERSON, R.B. & ERIKSSON, A.J. *Lightning Parameters for Engineering Application ELECTRA* 69, Mar. 1980, pp. 65-102.
- [59] ROBERTSON, L.M., LEWIS, W.W. and FOUST, C.M. *Lightning Investigation at High Altitude in Colorado, AIEE Transactions.*, Dec. 1941.
- [60] VAISALA M210557EN, *CP Series, CP7000, CP8000 User's Guide*, Vaisala Oyj, Helsinki, 2004
- [61] ROGER, C.T. et al. *Location Accuracy of Long distance VLF Lightning Location Network, Anaes of Geophysicae*, 2004
- [62] ZEMICHIEK, K. et al. *TRMM/LIS Observations of Lightning Activity, Journal of Remote Sensing Society of Japan*, 1998
- [63] CUMMINS, K.L., MURPHY, M.J., BARDO, E.A., HISCOX, W.L., PYLE, R.B. and PIFER, A.E. *A Combined TOA/MDF Technology Upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network. Journal of Geophysical Research*, VOL. 103, NO. D8, PAGES 9035-9044, APRIL 27, 1998
- [64] RAKOV V.A. *Lightning Discharge and Fundamentals of Lightning Protection. Journal of Lightning Research*, 2012, 4, (Suppl 1: M2) 3-11.
- [65] CDF-Cumulative Distribution Function. Princeton University, <http://www.princeton.edu>
- [66] NUCCI, C.A. *A Survey on CIGRE and IEEE Procedures for the Estimation of the Lightning Performance of Overhead Transmission and Distribution Lines*, X International Symposium on Lightning Protection, 2009, Curitiba, Brazil.
- [67] POPOLANSKÝ, F. *Frequency Distribution of Amplitudes of Lightning Currents, Electra* No. 22, pp. 139-147, Maio de 1972.
- [68] ANDERSON, J.G. *Lightning Performance of Transmission Lines* chapter 12 of *Transmission Line Reference Book* Palo Alto CA: Electric Power Research Institute.
- [69] IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines, *A Simplified Method for Estimating the lightning Performance of Transmission*

Lines IEEE Trans. On PA&S, Apr. 1985, pp 919-932 of Transmission Lines, Chapter 8 of EHV Transmission Line Reference Book, New York, Edison Electric, 1968.

[70] PLESTER, JEREMY. *Weatherwatch: Lightning made castles and churches very dangerous places.* The Guardian, Thursday 16 June 2011

[71] WRIGHT, ESMOND. *Franklin of Philadelphia*, Harvard College, 1986.

[72] ERIKSSON, A. J. *Lightning and tall structures.* *Transactions of South African IEE* 69: 2-16. 1978.

[73] JASIK Henry. *Antenna Engineering Handbook.* McGraw-Hill book Company New York, 1961

[74] BALANIS, Costantine. *Antenna Theory.* John Wiley & Sons. New Jersey, 2005.

[75] MOUSA, A.M. *Failure of the Collection Volume Method and Attempts of the ESSE Lightning ROD Industry to Resurrect it, Journal of Lightning Research,* 2012, 4 (Supp12:M9) 118-128

[76] RAKOV, V.A., UMAN, M.A. *Lightning: Physics and Effects.* Science Cambridge University Press, 2003.

[77] EPE-Empresa de Pesquisa Energetica/Ministerio de Minas e Energia, BEM-2012 Balanço Energetico Nacional, Rio de Janeiro, 2012.

[78] EPE-Empresa de Pesquisa Energetica/Ministerio de Minas e Energia, PDE-2021 Plano Decenal de Expansão de Energia 2021, Brasilia, 2012.

[79] ROCHA, L. et al. *Influence of long-span crossings on the shielding failure flashover rate of the Tucuruí-Manaus 500kV transmission line,* GROUND'2008 & 3rd LPE, Florianopolis, Brazil, 2008.

[80] ANEEL- Agencia Nacional de Energia Elétrica. Edital de Leilão nº004/2008-ANEEL. Anexo 6-Lote A- Interligação Tucuruí-Macapá-Manaus, 2008.

[81] IEEE, *Lightning Peak Current Cumulative Distribution for first negative stroke,* 1991.

[82] ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas 2001: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, NBR-5419, 2001.

[83] DIENDORFER, G. *LLS Performance Validation Using Lightning to Towers,* 21st International Lightning Detection Conference, Orlando, USA. 2010.

Apêndice A: Vulnerabilidade de LT's a Incidência de Raios

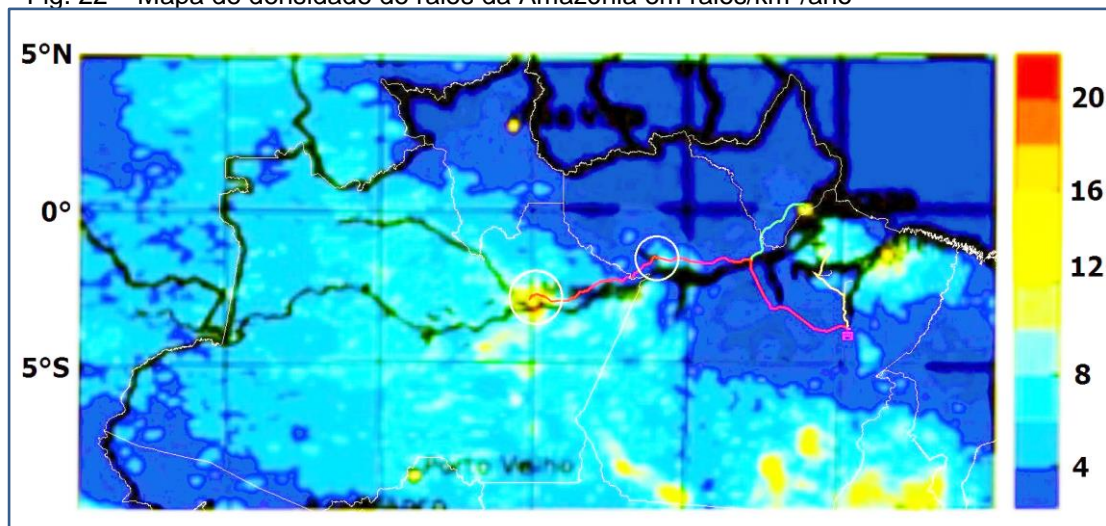
A taxa de *flashover* devido a raios (LFR) em uma linha de transmissão tem sido a maior causa de desligamentos na linha, (mesmo considerando que as rotinas de registros de ocorrência não conseguem esclarecer todas as ocorrências) e sua avaliação nas fases de projeto e operação é importante para se quantificar o desempenho da linha de transmissão no ambiente amazônico.

Quando uma descarga de, por exemplo, 5 kA, atinge uma fase da LT com uma impedância impulsiva de 400 ohm, será gerada uma onda de tensão de cerca de 1000 kV ($V = \frac{1}{2}ZI$), que se propaga ao longo do condutor em duas direções opostas, possivelmente causando avaria em equipamentos de subestações como transformadores e/ou um arco elétrico (*flashover*) através da superfície dos isoladores para terra, entre condutores de fase, etc. causando um curto-circuito para terra ou entre condutores de fase causando o desligamento da linha principalmente na estação das chuvas muito comum na região (o uso de equipamentos de religação automática e descarregadores podem suavizar esse tipo de desligamento).

Dados sobre densidade anual de ocorrência de raios são obtidos de valores coletados por redes do tipo LLS como STARNET e SIPAM (desde 2006 até o presente), esses dados são usados para geração de imagens georeferenciadas denominadas mapas de densidade de raios, nas quais são sobrepostos os trajetos da LT, obtendo-se valores de raios/km²/ano das áreas em que a proteção e a taxa de *flashover* serão calculadas. A Figura 22 mostra esse tipo de mapa e o traçado das linhas em estudo.

Principalmente devido ao fato de a eficiência de detecção das redes LLS não ser 100%, sempre há a expectativa de aplicar-se correções a esses mapas, como o fator de ajuste de 1,5 a 1,7 para levar em conta a característica de um raio possui múltiplas terminações para terra (supostamente não detectado pelo LLS) como recomendado pelo CIGRE [13].

A nossa orientação nesta metodologia é a de que cada caso que suscitar dúvida sobre o melhor valor de densidade de raios a ser usado, deve ser objeto de avaliação específica para cada região em estudo, aplicando-se esses fatores de correção quando o estudo indicar sua necessidade.

Fig. 22 – Mapa de densidade de raios da Amazônia em raios/km²/ano

Fonte: Arthur C. Almeida, Descargas Atmosféricas na Amazônia, comunicação pessoal, 2014

As torres normalmente usadas na Amazônia são as comuns de 42m; a torre de 62m usadas na travessia de dossel de florestas e as torres acima de 76m usadas para travessias de rios. O cálculo da proteção é efetuado graficamente com o uso do método EGM para as diferentes, alturas das torres usadas em travessias de rios e dossel de florestas.

Os valores calculados de LFR devem estar de acordo com o valor de 0.01 raios/100km/ano, como especificado pela agência brasileira de eletricidade ANEEL. Observe-se que esse índice é um índice linear e que, para uma linha de 1500 km é trasladado em 0,15 raios/km²/ano, pois o valor de densidade de raios é especificado nessa unidade.

Como o método EGM está baseado na distancia de salto, que é função da corrente prospectiva do primeiro *stroke* em kA, a técnica é fazer uma avaliação para e media de correntes mais prevalentes na região de estudo ou para valores de corrente mínima, média e máxima, de acordo com a curva cumulativa de corrente de pico (percentuais ultrapassando valores de corrente de pico), como por exemplo a do IEEE [81]. Um valor que atenderia a maioria das exigências seria um valor de 15 kA, que corresponde ao 95% de ultrapassagem.

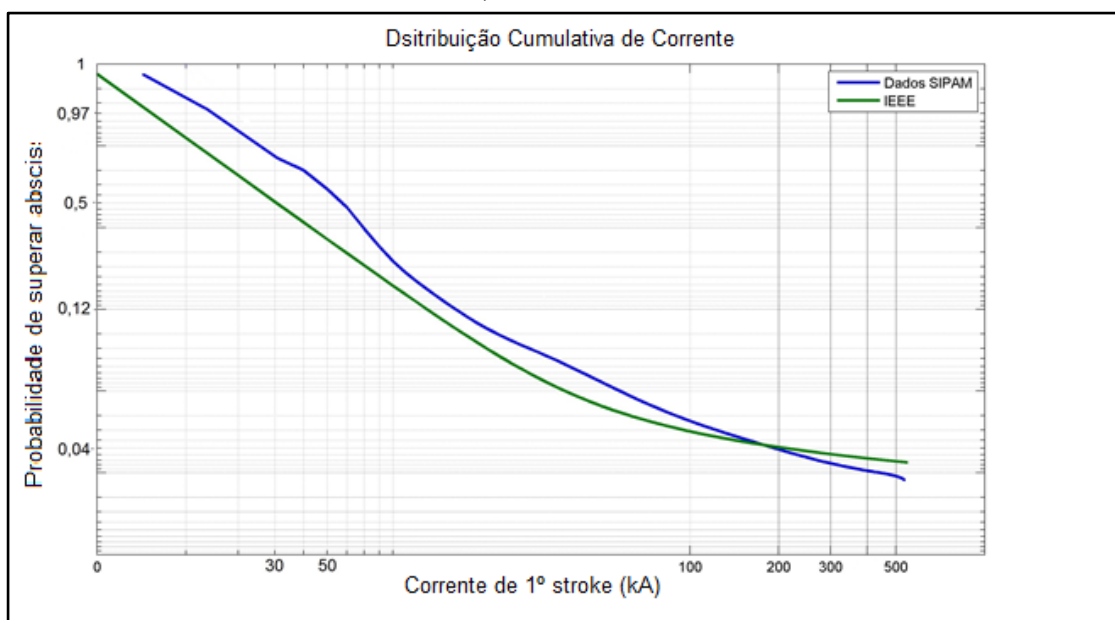
Depois da implementação do EGM, é avaliado a existência de janelas de vulnerabilidade, um parâmetro correspondente a um segmento linear não coberto pelo cabo para-raios, de acordo com o EGM, a partir do qual é

estimado a probabilidade ou percentual de insuficiência de proteção, representando a fração do número de raios coletados pela área de atração da estrutura considerada, que provavelmente gerarão um evento de *flashover*, determinado por

$$P_f = J_v/h \quad (39)$$

Onde P_f é a probabilidade de insuficiência de proteção, J_v é a janela de vulnerabilidade e h a altura da estrutura considerada na determinação do raio de atração.

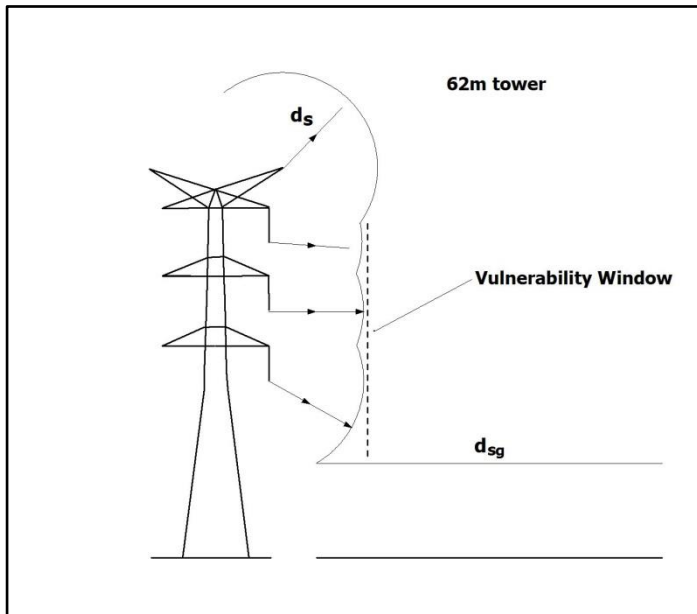
Fig. 23 – Curva cumulativa da corrente I_p no formato log-log



Fonte: Autor/Matlab, 2014

Com o uso de curvas cumulativas de distribuição de amplitude de primeira descarga de raios (como a Figura 14 do capítulo IV) ou no formato log-log com as da Figura 23, podemos escolher um valor de corrente com grande probabilidade de ocorrência, que neste caso selecionamos o valor de 15kA que para a torre de 62m (usadas para travessias acima do dossel) a janela de vulnerabilidade equivale a uma probabilidade de insuficiência de proteção de 0,55, como indicado no desenho da Figura 24, para a torre de 62m.

Fig. 24 – Torre de 62m



Fonte: Autor/ArcView, 2014

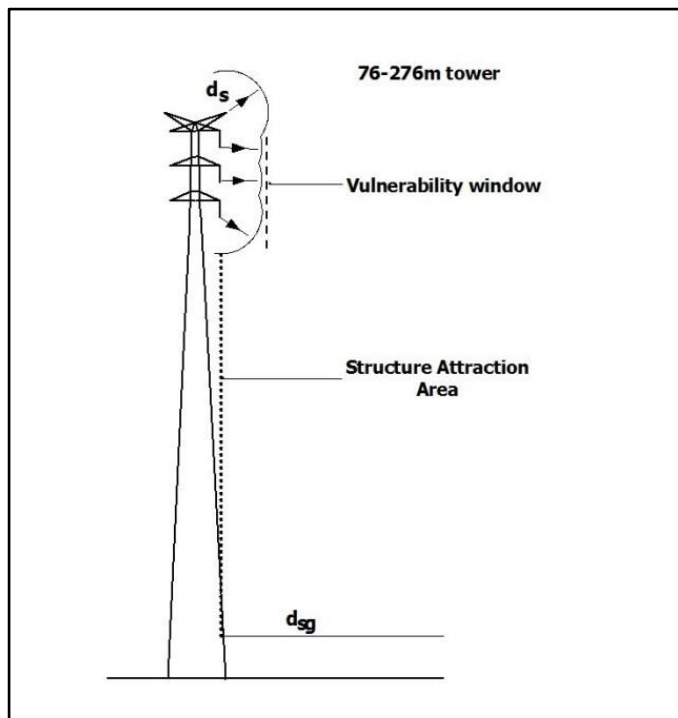
Para as torres maiores (76 a 276 m, Figura 25) e mesmo valor de corrente de pico do primeiro *stroke* (15 kA), as janelas de vulnerabilidade mostram probabilidade de insuficiência de proteção (P_f) variando de 0.098 a 0.347.

Com o aumento da altura das torres (\Rightarrow 76m) observa-se a existência de uma proporção de raios que atingirão a estrutura, entre o raio de proteção da fase mais baixa (distancia de salto) e a distancia de atração para a terra, o que se constitui em uma proteção adicional e também um risco de *back flashover* no caso de o Sistema de aterramento da estrutura não estar abaixo dos níveis exigidos, uma condição fácil de acontecer se não houver uma rotina de monitoração dos valores de resistência de aterramento (*footing resistance*).

Observe-se que a engenharia de proteção de uma LT contra raios só tem um índice de avaliação, que supostamente quantifica uma taxa de atingimento nos condutores de fase. É por esses fatos que neste trabalho advogamos o uso do índice LFR (taxa de *flashover* devido a raios) que é estatisticamente vinculada a probabilidade de atingimento em toda a estrutura da LT, e não só aos condutores de fase.

Com um índice global, torna-se mais fácil desenvolverem-se rotinas para segregação das frações que podem ocorrer no cabo para-raios, nas fases e na estrutura.

Fig. 25 - Torre > 76m



Fonte: Autor/ArcView, 2014

O numero de raios que podem atingir as estruturas de uma linha de transmissão por ano é função da área de atração, que pode ser calculado por

$$A_a = L(b + 2R_a) \quad (40)$$

Onde L é o comprimento da seção de linha considerado, b é a largura dessa seção (distancia entre cabos para-raios) e R_a , o raio de atração correspondente a altura da estrutura [76].

Considerando-se a densidade de raios N_g em raios/km²/ano no trecho da LT sob estudo e do conhecimento da área de atração equivalente calculado para a estrutura, a frequência de atingimento por raios N_d [82] pode ser estimada pelo produto da densidade de raios pela área de atração, com o uso da formula

$$N_d = N_g A_a 10^{-6} \quad (41)$$

Adicionalmente, pela norma NBR5419, pode ser avaliada a necessidade de uso de dispositivos descarregadores (SPD), definidos com o seguinte critério:

$$\begin{array}{ll}
 N_d \geq 10^{-3} & \rightarrow \text{precisa de SPD} \\
 10^{-3} \geq N_d > 10^{-5} & \rightarrow \text{compromisso de um SPD} \\
 N_d \leq 10^{-5} & \rightarrow \text{nao precisa SPD}
 \end{array}$$

Observe-se que se usarmos esse critério da NBR5419 como um índice de atingimento em uma linha de transmissão chegamos a um índice de atingimentos de $10^{-3}/100\text{km/ano}$, que comparado com o valor especificado na licitação ANEEL de $10^{-2}/100\text{km/ano}$ para a LT Tucuruí-Oriximina-Manaus é um valor menos restritivo.

Levando em conta a probabilidade de insuficiência de proteção P_f , calculado com o valor da janela de vulnerabilidade em cada sitio de travessia, a frequência de *flashover* por ano, devido a raios LFR pode ser calculada por

$$LFR = N_d P_f \quad (42)$$

No caso de perfeita proteção ($P_f=0$) o P_f é associada ao complemento da curva cumulativa de frequência de raios para a faixa de kA considerada (5%, $P_f=0,05$), lembrando que mesmo com nível de proteção completa há sempre uma possibilidade estatística de ocorrência de *flashover*, mesmo que pequena.

As Tabelas 6 e 7 contêm um sumario dos parâmetros calculados por esta metodologia usando o ModSalto; a Tabela 8 foi usada no Excel para calculo dos parâmetros.

Para a análise da linha Tucuruí-Macapá-Manaus, a especificação ANEEL de 0.01 atingimentos/100km/ano (shielding failure), foi transladado para 0.15/*flashover*/ano, com um período equivalente de 80 meses (podendo sofrer um desligamento por raios a cada 80 meses) – um índice que a LFR estimada não atende.

Tab. 6 – Valores de LFR para as travessias

Travessias	Ng (raios /km²/ ano)	h (m)	L (m)	Nd (raios/ano)	LFR (flashover/an o)
Jurupari-2	5	27 6	2.07 8	0,8096	0,0793
Faro	6	26 0	2.15 8	0,9912	0,1031
Jatapu	6	20 4	1.81 5	0,7755	0,1016
Jurupari-1	5	20 0	1.57 2	0,5567	0,0746
Uatumã	7	12 1	1.12 9	0,4855	0,1073
Trombetas-1	10	11 6	1.07 0	0,6494	0,1500
Trombetas-2	10	10 0	875	0,5109	0,1359
Trombetas-3	10	76	403	0,2187	0,0759
	Totais				0,8277
florestas					
Manaus	12	62	1.00 0	0,7058	0,3403
	Totais				1,168

Fonte: Autor/Excel, 2014

Tab. 7 – Valores de distancia de salto para as travessias

Travessias	d_s (m)	J_v (m)	P_f	P_e
Jurupari-2	14,902	27,08	0,098	0,860
Faro	15,130	27,02	0,104	0,860
Jatapu	15,980	26,80	0,131	0,820
Jurupari-1	16,060	26,85	0,134	0,820
Uatumã	17,360	26,80	0,221	0,700
Trombetas-1	17,450	26,80	0,231	0,680
Trombetas-2	17,720	26,57	0,266	0,640
Trombetas-3	18,14	26,42	0,347	0,526
Florestas	18,41	34,43	0,550	0

Fonte: Autor/Excel, 2014

Tab. 8 - Modelo de planilha Excel para calculo

Altura da estrutura	Comprimento do trecho	Distancia de salto	Altura do attachment	Janela de vulnerabilidade	Prob. De incidencia na estrutura	Insuficiência de proteção	Raio de atração	Area de atração	Frequência de atingimento	Frequência de flashover devido a raios
h	L	ds	Z	jv	Pe	Pf = jv/h	Ra	Aa	Nd	LFR
276.000	2078	14.000	291,02	27.080	0,86	0.098	28.06281	0.161929	0.809647	0.079345
260.370	2158	15.130	275,5	27.020	0,86	0.104	27.37574	0.165198	0.991189	0.103084
204.520	1815	15.980	220,5	26.800	0,82	0.131	24.70527	0.129247	0.775483	0.101588
200.780	1572	16.060	216,84	26.850	0,82	0.134	24.51222	0.111336	0.55668	0.074595
121.740	1129	17.360	139,1	26.800	0,7	0.221	19.81761	0.06936	0.485523	0.107300
116.420	1070	17.450	133,45	26.800	0,68	0.231	19.445	0.064938	0.649383	0.150007
100.880	875	17.720	118,6	26.570	0,64	0.266	18.29697	0.051095	0.510947	0.135912
76.160	403	18.140	94,30	26.420	0,526	0.347	16.23827	0.021873	0.218734	0.075901
										0.827733
62.000	1000	18.410	80,41	34.430	0	0.550	14.88041	0.051561	0.61873	0.340301

Fonte: Autor/Excel, 2014

Apêndice B: Movimento de cargas em Campos Elétricos e Magnéticos cruzados

A velocidade v de uma partícula de massa m sob a influência de uma força externa \mathbf{F} é governada pela equação do movimento

$$\mathbf{F} = \frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) \quad (43)$$

Que estabelece que a taxa de variação do momento é igual a força aplicada. A velocidade v é definida como a taxa de variação do raio vetor r que denota a localização da partícula, isto é

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \dot{\mathbf{r}} \quad (44)$$

sob condições não relativista, m é constante e (43) é equacionada para a familiar equação da força

$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = m\dot{\mathbf{v}} \quad (45)$$

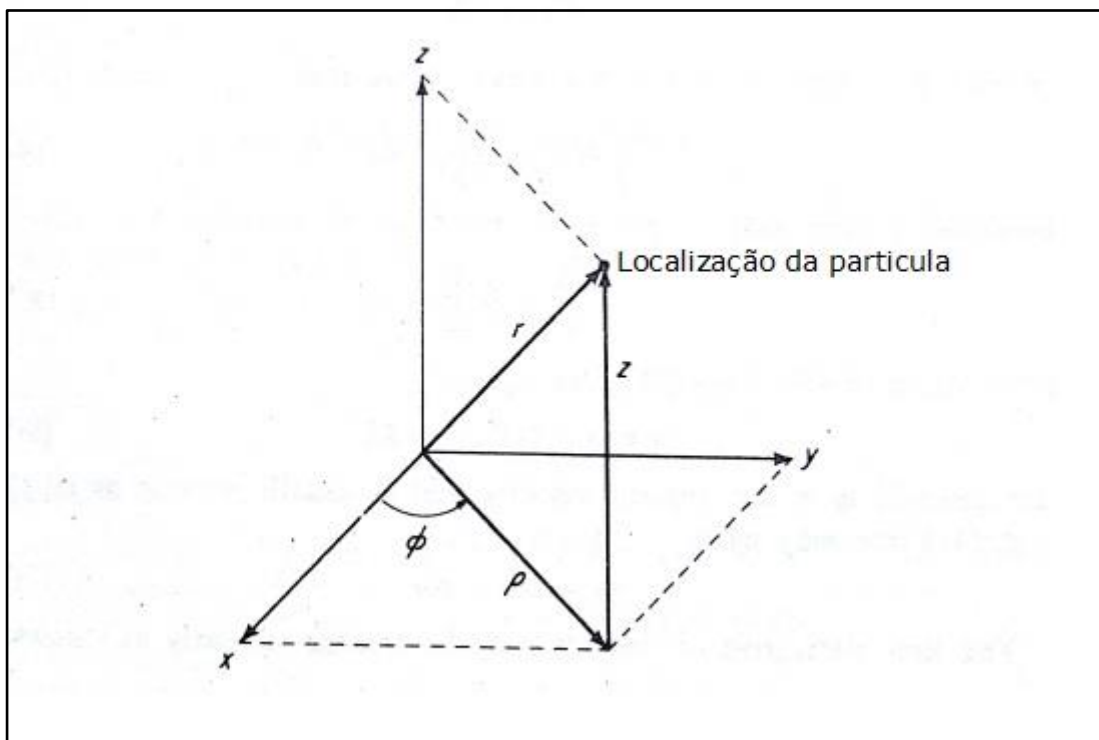
A força externa \mathbf{F} pode ser elétrica, magnética, gravitacional ou mecânica e é através dessa força que o mundo externo age sobre a partícula. A aceleração $\dot{\mathbf{v}}$ representa a resposta da partícula à força aplicada.

Em coordenadas retangulares temos

$$\mathbf{F} = m[\hat{x}\dot{v}_x + \hat{y}\dot{v}_y + \hat{z}\dot{v}_z] = m[\hat{x}\ddot{x} + \hat{y}\ddot{y} + \hat{z}\ddot{z}] \quad (46)$$

para a equação da força. Para uma dada força duas integrações sucessivas expressam a órbita de uma partícula.

Fig. 26 – Coordenadas cilíndricas



Fonte: Jordan & Balmain, 1968, [20]

Em coordenadas cilíndricas como mostra a Figura 26, a expressão da velocidade é complicada pelo fato de que a direção $\hat{\rho}$ não ser constante. A expressão da aceleração em coordenadas cilíndricas é mais complicada do que em coordenadas retangulares, no entanto em coordenadas cilíndricas certos efeitos de movimento rotacional que são encobertos em coordenadas retangulares são facilmente visíveis. Esses efeitos ficam evidentes quando a equação do movimento é escrita fazendo-se

$$v_{\phi} = \rho\dot{\phi} = \rho\omega \quad (47)$$

$$F + \hat{\rho}m\rho\omega^2 - \hat{\phi}mv_{\rho}\omega = m(\hat{\rho}\dot{v}_{\rho} + \hat{\phi}\dot{v}_{\phi} + \hat{z}\dot{v}_z) \quad (48)$$

A equação (48) é a equação do movimento escrita com duas das acelerações presentes trazidas para o lado da força na equação (o esquerdo). O lado direito de (48) representa a massa vezes a aceleração que pode ser medida em um plano de referencia que gira com a partícula na velocidade angular ω . Assim o lado esquerdo representa a força sobre a partícula como medida em rotação no

plano de referencia. As duas forças adicionais não são externas, são devidas somente a rotação da partícula; por isso são algumas vezes referidas como fictícias, a despeito do fato de sua existência não ser fictícia. A primeira é a familiar força centrífuga dirigida pra fora e a outra é a força de Coriolis que tende a forçar aceleração angular a partícula com um componente de velocidade para dentro (negativa).

A força eletromagnética age sobre partículas carregadas eletricamente, e neste caso particular é denominada força de Lorentz, dado por

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (49)$$

Onde q é a carga na partícula. É importante notar que a força magnética age só em partículas em movimento e age em uma direção perpendicular a direção do movimento. A inserção da (49) em (45) produz a equação não relativista do movimento, dada por

$$q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = m\dot{\mathbf{v}} \quad (50)$$

o determinante do produto vetorial $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ tem a forma

$$\mathbf{v} \times \mathbf{B} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ v_x & v_y & v_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}$$

Que pode ser escrita como

$$\mathbf{F} = q[\hat{x}(E_x + v_y B_z - v_z B_y) + \hat{y}(E_y + v_z B_x - v_x B_z) + \hat{z}(E_z + v_x B_y - v_y B_x)] \quad (51)$$

Em coordenada cilíndrica temos

$$\mathbf{v} \times \mathbf{B} = \begin{vmatrix} \hat{\rho} & \hat{\phi} & \hat{z} \\ v_\rho & v_\phi & v_z \\ B_\rho & B_\phi & B_z \end{vmatrix}$$

Que pode ser escrito na forma

$$F = q[\hat{\rho}(E_{\rho} + v_{\phi}B_z - v_zB_{\phi}) + \hat{\phi}(E_{\phi} + v_zB_{\rho} - v_{\rho}B_z) + \hat{z}(E_z + v_{\rho}B_{\phi} - v_{\phi}B_{\rho})] \quad (52)$$

Consideremos o movimento de uma partícula carregada em um campo magnético constante dado por

$$\mathbf{B} = \hat{z}B \quad (53)$$

Supondo velocidade constante e esta completamente na direção ϕ . Sob essas condições, a equação do movimento só tem um componente ρ obtida por substituição de (52) em (48)

$$qv_{\phi}\mathbf{B} + m\rho\omega^2 = 0 \quad (54)$$

a equação (54) estabelece condição de força radial sob a qual movimento circular uniforme pode existir. Essa condição pode ser simplificada usando (47), que resulta

$$qB + m\omega = 0 \quad (55)$$

estabelecendo que uma partícula com carga negativa deve girar na direção $\hat{\phi}$. Essa rotação ocorre com uma frequência angular ω_c , chamada frequência de ciclotron em virtude de sua importância no projeto de ciclotrons para pesquisa nuclear. A frequência de ciclotron é dada por

$$\omega_c = -\frac{qB}{m} \quad (56)$$

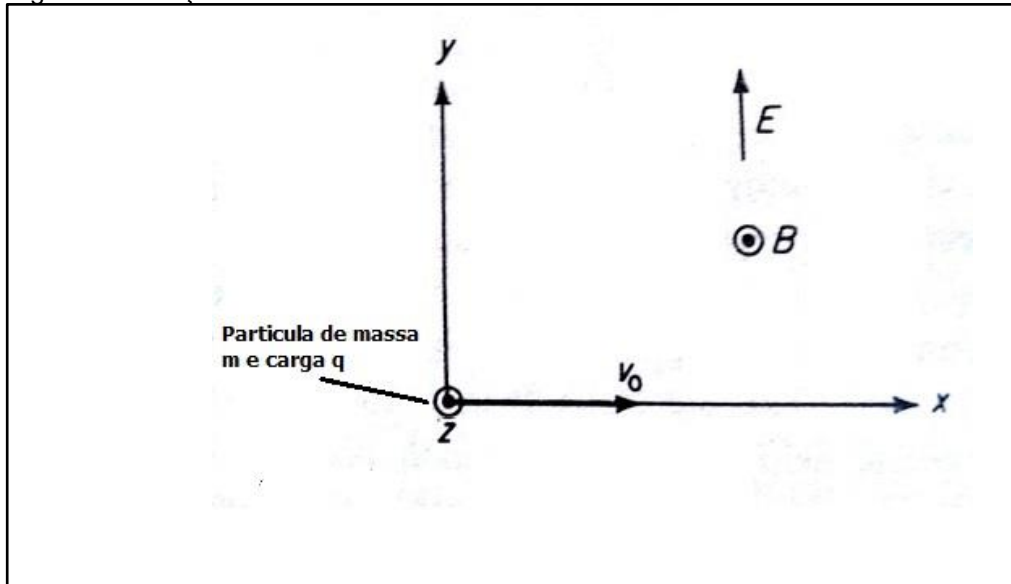
A equação (47) estabelece que o raio da orbita circular é proporcional a velocidade, desde que a frequência é constante.

Se o movimento da partícula portadora de carga ocorre sob a influência de campos cruzados elétrico e magnético, como por exemplo os campos

$$\mathbf{B} = \hat{z}B \quad e \quad \mathbf{E} = \hat{y}E$$

E se uma partícula eletrificada positivamente de q coulomb e massa m esta inicialmente na origem e deslocando-se na direção x com uma velocidade v_0 como mostrado na Figura 27, usando-se a equação (51) a equação do

Fig. 27 - Condições iniciais do movimento



Fonte: Jordan & Balmain, 1968, [20]

movimento pode ser expressa como

$$m\dot{v} = q[\hat{x}v_y B + \hat{y}(E - v_x B)] \quad (57)$$

A definição de frequência de cíclotron $\omega_c = -q(B/m)$ permite expressar a eq. (57) na forma de componentes como

$$\dot{v}_x = -\omega_c v_y \quad (58)$$

$$\dot{v}_y = \frac{q}{m} E + \omega_c v_x \quad (59)$$

$$\dot{v}_z = 0 \quad (60)$$

Como não existe velocidade inicial na direção \hat{z} , $v_z = 0$. Também, como a partícula parte da origem, $z = 0$ em todos os pontos ao longo de sua trajetória.

As equações (58) e (59) são acopladas e assim devem ser combinadas para obter-se uma equação diferencial com uma incógnita. Efetuando a derivada com relação ao tempo da equação (59) e eliminando v_x temos

$$\dot{v}_y = -\omega_c^2 v_y \quad (61)$$

Que tem como solução geral

$$v_y = C_1 \text{sen} \omega_c t + C_2 \text{cos} \omega_c t \quad (62)$$

A constante arbitrária C_2 deve ser zero uma vez que $v_y = 0$ em $t = 0$. O componente x da velocidade pode ser encontrado substituindo-se (65) em (59) dando

$$\omega_c v_x = -\frac{q}{m} E + \omega_c C_1 \text{cos} \omega_c t$$

Desde que $v_x = v_0$ em $t = 0$, a constante arbitrária C_1 é dada por

$$C_1 = \frac{q}{m\omega_c} E + v_0 = -\frac{E}{B} + v_0$$

Assim, a velocidade em qualquer tempo t pode ser expressada na forma de componentes dados por

$$v_x = \frac{E}{B} + \left(v_0 - \frac{E}{B}\right) \text{cos} \omega_c t \quad (63)$$

$$v_y = \left(v_0 - \frac{E}{B}\right) \text{sen} \omega_c t \quad (64)$$

A posição da partícula eletrizada pode ser encontrada integrando-se o componente da velocidade em relação ao tempo. Integrando-se (1) temos

$$x = \frac{E}{B} t + \frac{1}{\omega_c} \left(v_0 - \frac{E}{B}\right) \text{sen} \omega_c t + C_3 \quad (65)$$

Com a constante arbitrária de integração igual a zero desde que $x = 0$ em $t = 0$.
A integração da (60) dá

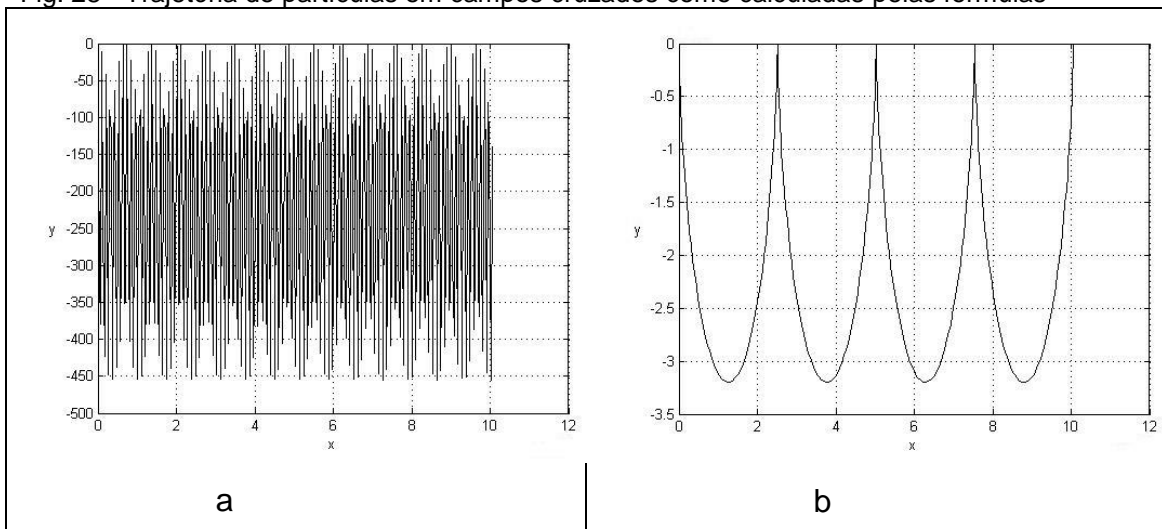
$$y = -\frac{1}{\omega_c} \left(v_0 - \frac{E}{B} \right) \cos \omega_c t + C_4$$

A constante arbitrária C_4 é determinada pela condição $y=0$ em $t = 0$ que dá

$$y = \frac{1}{\omega_c} \left(v_0 - \frac{E}{B} \right) (1 - \cos \omega_c t) \quad (66)$$

Com $v_0 = 0$, (65) e (66) são equações paramétricas de uma curva cicloide com t o parâmetro.

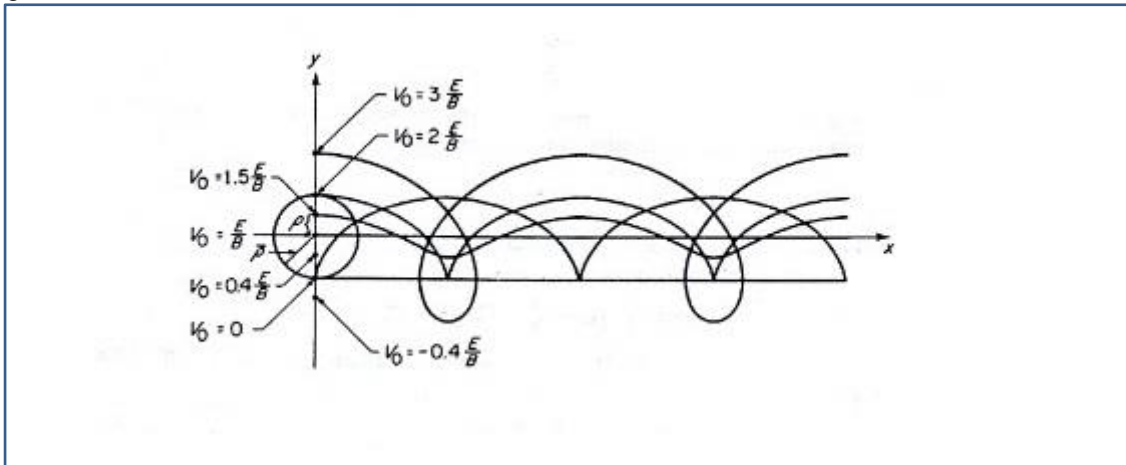
Fig. 28 - Trajetória de partículas em campos cruzados como calculadas pelas formulas



Fonte: Autor

Os gráficos da figura 28 mostram em a) a superposição de diversos modos de trajetórias, enquanto em b) mostram uma cicloide básica quando se iguala a zero a velocidade inicial e um valor unitário para a frequência de ciclotron, o que pode ser uma dificuldade a mais nesse tipo de pesquisa. Uma solução consiste na modelagem da trajetória através do movimento de um ponto na superfície de uma roda rolante, evidenciando os diversos formatos assumidos. As formas de trajetórias cicloidais (também conhecidas como trochoides) da partícula são mostradas na Figura 29 para diversos valores de velocidade inicial diferentes de $v_0 = 0$, [20].

Fig. 29 - Traçado do gráfico das curvas trochoides como pontos na superfície de um roda girante.



Fonte: Jordan & Balmain, 1968, [20]

É de especial interesse que se note o efeito de focalização que obriga a partícula eletrizada a passar por uma sucessão de pontos fixos no eixo x para qualquer valor da velocidade inicial v_0 . Esses pontos focais são dados por $\cos \omega ct = 1$ ou $\omega ct = n2\pi$ onde n é um número positivo ou negativo inteiro ou zero; a posição dos pontos focais é dada por

$$x = n \frac{2\pi E}{\omega c B} \quad (67)$$

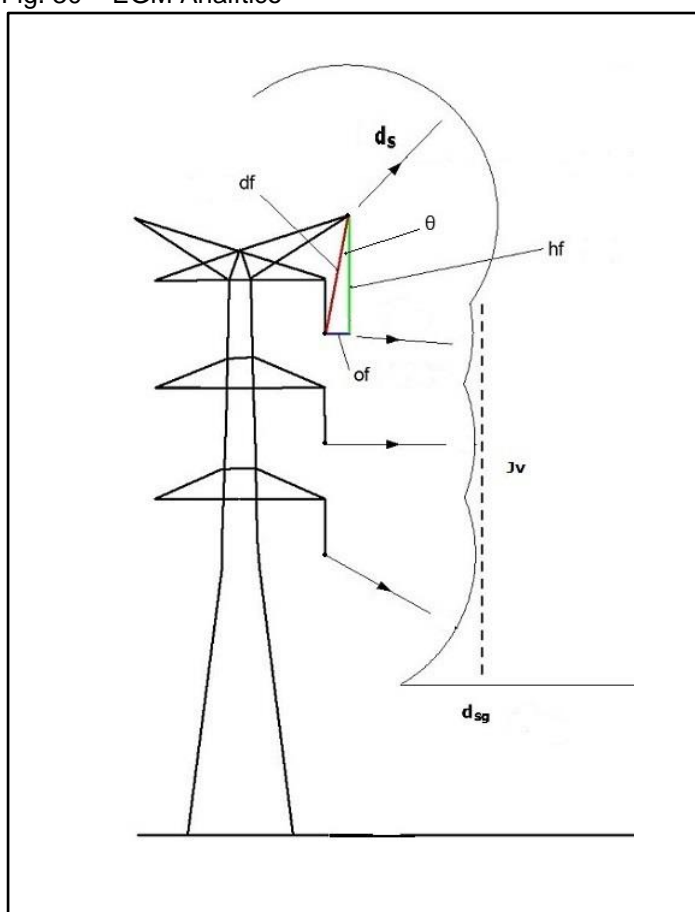
Outros pontos de interesse são que o tempo de voo entre pontos focais é independente de v_0 e a condição $v_0 = E/B$ produz uma trajetória em linha reta.

Assim as propriedades de campos cruzados podem ser usados para explicar o movimento do líder intermitente que traça o caminho para os raios, assim como no projeto de magnetrões, válvulas de ondas caminhantes, e que também poderiam se tornar em instrumento de laboratório para estudo da trajetória de líderes intermitentes, os precursores das descargas na atmosfera.

Apêndice C – Forma Analítica do EGM

Na Figura 30 temos um gráfico de uma torre típica de linha de transmissão com dois circuitos. A proteção contra raios é efetivada com o uso do modelo EGM que implica o desenho de círculos de raio igual a distancia de salto tendo com centro o ponto a ser protegido. Como alternativa ao desenho pode-se desenvolver formas analíticas de avaliação, facilitando o uso embutido em rotinas computacionais.

Fig. 30 – EGM Analítico



Fonte: Autor/ArcView, 2014

Considerando o gráfico da Figura 30 temos

$$d_{s1}^2 = (x - o_f)^2 + (y - h_f)^2 \quad (68)$$

$$d_{s2}^2 = x^2 + y^2 \quad (69)$$

Igualando (68) e (69) temos

$$(x - o_f)^2 + (y - h_f)^2 = x^2 + y^2 \quad (70)$$

Considerando que

$$d_f^2 = o_f^2 + h_f^2 \quad (71)$$

Combinando (70) e (71) temos

$$d_f^2 = 2o_f x + 2h_f y \quad (72)$$

Que é a equação da mediatriz do segmento d_f , que substituindo da

$$y = \frac{d_f^2 - 2o_f x}{2h_f} \quad (73)$$

Para a resolução da coordenada x substituir (72) em (69) obtendo

$$x^2 + \left(\frac{d_f^2 - 2o_f x}{2h_f}\right)^2 = d_s^2 \quad (74)$$

Que depois de varias simplificações dá

$$x = \frac{o_f d_f + \sqrt{o_f^2 d_f^2 - 4d_f^4 + 16h_f^2 d_s^2}}{4d_f} \quad (75)$$

Com a equivalência do método de ângulo de proteção temos

$$tg\theta = \frac{h_f}{o_f} \quad (76)$$

O ângulo θ é equivalente ao angulo de proteção que pode servir para complementar avaliação cruzada do nível de proteção, como fornecido pelo Método do Ângulo de Proteção.

Apêndice D – Dados ModSalto

% Modelagem da trajetória do líder descendente até o attachment com pulso
 % final com campo do gap de 450 - 605 kV/m. Os campos são obtidos por
 % integração de distribuição de corrente. Campo em condutor energizado
 % obtido por fórmula derivada através CSM.

% Data: Janeiro/2014

clear

clc

ev = 8.854e-12; %constante dieletrica
 canal=3000; %altura da base da nuvem em metro
 la = 1000; %lambda (constante arbitraria)
 lp=45; %corrente em kiloAmpere
 ro0 = 2.22e-4*lp; %20C distrb. linear de carga

lp (kA) = 45.00
 ds (m) = 144.30
 ds2 (m) = 165.02
 dscigre (m) = 120.00
 Ra (m) = 96.15
 dsg (m) = 129.87
 h (m) = 95.00
 hs (m) = 20.72
 deltah (m) = 138.92
 Z (m) = 239.30
 v (m/s) = 2387267.90

ans =

Er (kV/m) = 500.02
 Ec (kV/m) = 431.47
 Eli (kV/m) = 465.47
 Ee (kV/m) = 34.54
 Ef (kV/m) = 3.79
 E0 (kV/m) = 34.00

ans =

Er - Campo composto do líder + o do streamer para-raios
 Ec - Campo composto do líder + o do condutor energizado
 Eli - Campo do líder por integração de distribuição de cargas
 Ee - Campo do streamer no para-raios
 Ef - Campo do condutor
 E0 - Campo para iniciar streamer

Apêndice E – A origem dos termos técnicos usados no estudo dos raios

<p>lightning <i>noun</i> \ 'līt-nīŋ \ : the flashes of light that are produced in the sky during a storm : the flashing of light produced by a discharge of atmospheric electricity; <i>also</i>: the discharge itself : a sudden stroke of fortune</p>	<p>raio substantivo masculino 1. Fluido .elétrico que se desprende da nuvem .eletrizada. 2. Faísca, corisco, centelha. 3. .Jato de luz. 4. Linha .reta que parte do centro e termina na periferia. 5. Tudo o que parte de um centro comum. 6. Meio diâmetro de uma circunferência. 7. Sinal, mostra, indício. 8. Desgraça; sinal; vislumbre; clarão; aparência; lembrança. 9. Pessoa muito viva ou travessa.</p>
<p>flash <i>verb</i> \ 'flaʃ \ : to shine or give off bright light suddenly or in repeated bursts : to appear quickly or suddenly : to move or pass very quickly <i>intransitive verb</i> : RUSH, DASH —used of flowing water : to break forth in or like a sudden flame or flare : to appear suddenly <an idea <i>flashes</i> into her mind> : to move with great speed <the days <i>flash</i> by></p>	<p>relâmpago substantivo masculino 1. Clarão súbito e rápido proveniente de descarga .elétrica entre duas nuvens ou entre uma nuvem e a Terra. 2. Resplendor, luz intensa que deslumbra. 3. O que brilha repentinamente e logo se desvanece.</p>
<p>stroke <i>noun</i> <i>medical</i> : a serious illness caused when a blood vessel in your brain suddenly breaks or is blocked : the act of striking; <i>especially</i>: a blow with a weapon or implement : a single unbroken movement; <i>especially</i>: one of a series of repeated or to-and-fro movements : a sudden action or process producing an impact <a <i>stroke</i> of lightning></p>	<p>descarga substantivo feminino 1. Ato ou efeito de descarregar. = DESCARREGAMENTO 2. Ato ou trabalho de tirar a carga a bestas, carros, navios, etc. 3. Ato ou efeito de disparar muitas armas de fogo ao mesmo tempo. 4. Cancelamento de item ou de um .registro. = BAIXA 5. Desobrigação, alívio de cargo ou de encargo. = DESCARGO, DESENCARGO 6. [Direito] [Direito] Solução ou libertação de obrigação ou de encargo. = QUITAÇÃO 7. Caudal, débito. 8. Válvula .acionada mecanicamente para libertar um .jato de água em .vasos sanitários, urinóis, etc., por meio de .jato de água. = AUTOCLISMO 9. Evacuação ou libertação de uma substância.</p>

<p>thunder <i>noun</i> \ 'thən-dər\ : the very loud sound that comes from the sky during a storm : the sound that follows a flash of lightning : a loud noise that sounds like thunder</p>	<p>trovão <i>substantivo masculino</i> 1. Ruído estrondoso que acompanha a descarga de .eletricidade atmosférica. 2. [Por extensão] [Por extensão] Grande ruído comparável ao do trovão.</p>
<p>leader <i>noun</i> \ 'lē-dər\ : something that leads: as <i>e</i> (1): something for guiding fish into a trap : a person who leads: as <i>b</i> (1): a person who directs a military force or unit (2): a person who has commanding authority or influence <i>d</i> (1): CONDUCTOR <i>c</i> (2): a first or principal performer of a group : a horse placed in advance of the other horses of a team</p>	<p>líder <i>substantivo de dois gêneros</i> 1. Pessoa que exerce influência sobre o comportamento, pensamento ou opinião dos outros. 2. Pessoa ou entidade que lidera ou dirige. 3. Chefe de um partido ou movimento político. <i>adjectivo de dois gêneros e substantivo de</i> 4. Que ou o que lidera determinado .setor de .atividade ou uma competição.</p>
<p>attachment <i>noun</i> \ə-'tach-mənt\ : a seizure by legal process; <i>also</i>: the writ or precept commanding such seizure <i>a</i>: the state of being personally attached : FIDELITY <<i>attachment</i> to a cause> <i>b</i>: affectionate regard <a deep <i>attachment</i> to nature> : a device attached to a machine or implement : the physical connection by which one thing is attached to another : the process of physically attaching</p>	<p>conexão cs <i>substantivo feminino</i> 1. Estado de coisas ligadas. = LIGAÇÃO 2. Enlace ou vínculo entre pessoas ou entidades. 3. Relação ou ligação lógica. = COERÊNCIA, NEXO 4. Analogia.</p>
<p>streamer <i>noun</i> \ 'strē-mər\ : a long, narrow piece of colored paper or plastic that is used as a decoration : a long, narrow flag <i>a</i>: a flag that streams in the wind; <i>especially</i>: PENNANT <i>b</i>: any long narrow wavy strip resembling or suggesting a banner floating in the wind <i>c</i>: BANNER 2 <i>a</i>: a long extension of the solar corona visible only during a total solar eclipse stream <i>noun</i> \ 'strēm\ : a natural flow of water that is smaller than a river : any flow of liquid or gas : a continuous flow of people or things</p>	<p>filamento <i>substantivo masculino</i> 1. Fibras .tênuas dos músculos, dos nervos, das plantas. 2. Fibra. 3. Fios que alguns minerais apresentam em sua textura. 4. Nas lâmpadas elétricas, fio condutor muito fino que se torna incandescente, à passagem da corrente. 5. Linhas sinuosas de correntes em descargas de um elemento eletrificado para o ar circundante.</p>
<p>The keraunic number is a system to describe lightning activity in an area based upon the audible detection of thunder. It is defined as the average number of days per year when thunder can be heard in a given area, and the likelihood thereby of a thunderstorm.</p>	<p>ceraunia ráu [latim <i>ceraunia</i>, 'Montes Ceraunios, muitas vezes atingidos pelos raios'.] s.f. 1. Raio: 2. Pedra preciosa que se julgava ter caído com o raio.</p>

Apêndice F: Torre Instrumentada RBA

Instalação da instrumentação da torre de TV RBA (altura do para-raios=134m) com instalação de sala de medição, sensores de corrente de descarga, contador de raios, medidor de campo eletrostático e estação meteorológica.

Justificativa

Ainda há incerteza na quantificação dos valores dos parâmetros de amplitude e forma de onda de descargas na atmosfera, determinantes para a correta avaliação do nível de perigo a que estão expostos sistemas de comunicação, de transmissão de energia elétrica, de equipamentos eletrônicos e a vida das pessoas, pois esses parâmetros são a base para o projeto de sistemas de proteção e métodos de ensaios de dispositivos de proteção contra descargas atmosféricas.

Os sistemas de detecção ditos indiretos conhecidos como LLS (Lightning Location System) detectam e estimam parâmetros por meio de pulsos de energia eletromagnética emitidas pelas descargas, que ocorrem em uma extensa gama de frequência, mas que são normalmente medidos em bandas estreitas de frequência, principalmente em banda de frequências que se estende da faixa de VLF (Very Low Frequency) até a LF (Low Frequency).

Os sistemas de detecção diretos pretendem medir diretamente as amplitudes e forma de onda dessas correntes em descargas atmosféricas. Compreendem sistemas que através da indução de descargas em um ponto de medição específico, utilizando um pequeno foguete para iniciar o raio e as chamadas torres instrumentadas em que a instrumentação para a detecção são instaladas em torres altas, principalmente em torres de transmissão de televisão.

Esses sistemas embora não tenham a amplitude geográfica dos sistemas LLS, pois medem a ocorrência da descarga em um único ponto são considerados sistemas por excelência e usados como verdade de campo para a calibração de sistemas LLS como também, e principalmente, servir de base para sistemas de proteção e ensaios para proteção contra descargas, contra os raios.

A eficiência de captação de descargas pela torre pode ser avaliada com auxílio da equação [83]:

$$N=24 \times 10^{-6} \times H_s^{2,6} \times D_a \quad (76)$$

Onde N=nº de descargas capturados, H_s= altura efetiva da torre,
D_a=densidade de raios (raios/km²/ano).

Considerando o valor de 8,74 para a densidade de raios na região de Belém (Pereira,C.S.,2008) [49] temos que as expectativas de raios:

Torre de 40m	3,07 ocorrências por ano
Torre de 120m	53,4 ocorrências por ano

Anteprojeto da Instalação

O Sistema de instrumentalização da Torre RBA é composto da sala de instrumentos em ambiente climatizado, que conterà os instrumentos (osciloscópios, computadores, interfaces, etc.) e da área do sensor (bobinas, etc.) que ficarão em uma gaiola de Faraday para proteção física e blindagem elétrica contra sinais espúrios.

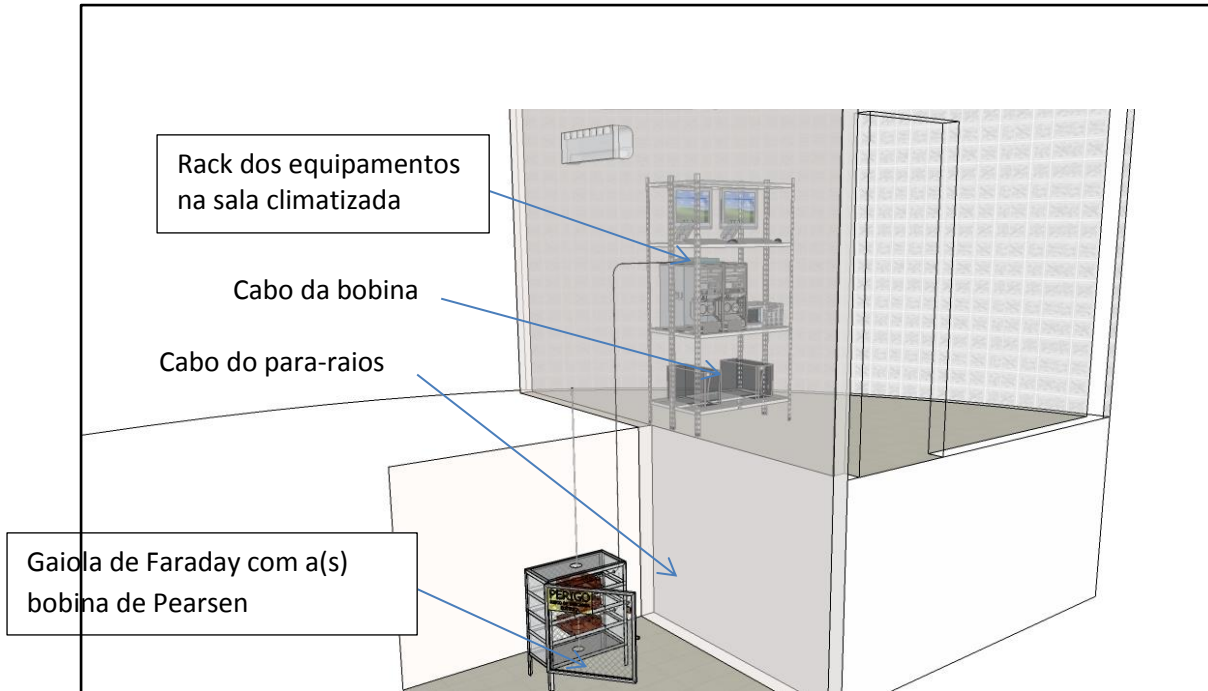
Outros equipamentos que compõe a instrumentalização completa são:

Um *fieldmill* para medição do campo eletrostático, podendo Fornecer o momento (gatilho) para acionamento dos *datallogers*, Câmeras de alta velocidade, etc. no momento da aproximação De sistemas de tempestades.

Mini estação meteorológica coletando velocidade e direção dos Ventos, temperatura, pressão, irradiação solar, etc.

Na Figura 31 vê-se uma representação geral dos principais equipamentos na torre da RBA.

Fig. 31 - Vista geral do Sistema



Fonte: Diogo/SketchUp, 2014

Rack dos equipamentos e gaiola de Faraday

O rack será construído com duas estantes de bandejas ajustáveis de aço, com régua de conectores elétricos para os equipamentos como mostrado na Figura 32.

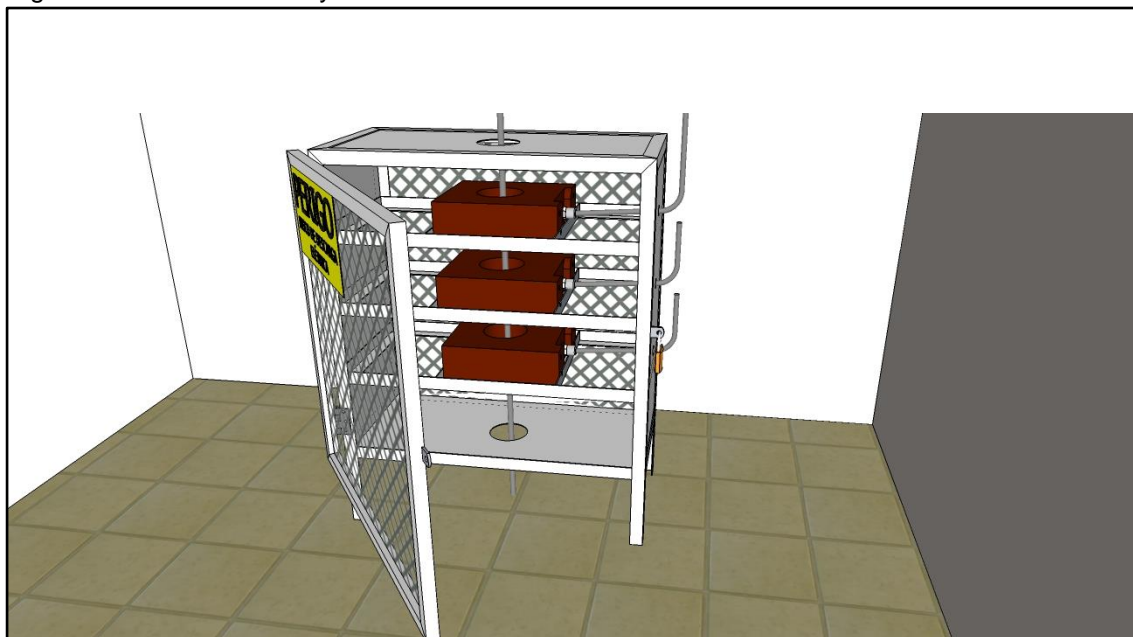
Fig. 32 - Rack dos equipamentos



.Fonte: Diogo/SketchUp, 2014

A gaiola de Faraday será utilizada como meio de proteção física dos sensores (tendo capacidade para até 3 sensores) e como blindagem contra sinais espúrios que podem contaminar a medição, se incidíveis na bobina e principalmente na área do conector. Será confeccionada em ferro galvanizado e terá porta de acesso e proteção, e bandejas para fixação dos sensores, como mostrado na Figura 33.

Fig. 33 - Gaiola de Faraday



Fonte: Diogo/SketchUp, 2014

A Tabela 9 é uma lista dos equipamentos em aquisição para atender o projeto de instrumentalização da torre de TV TBA.

Tab. 9 - Lista de equipamentos

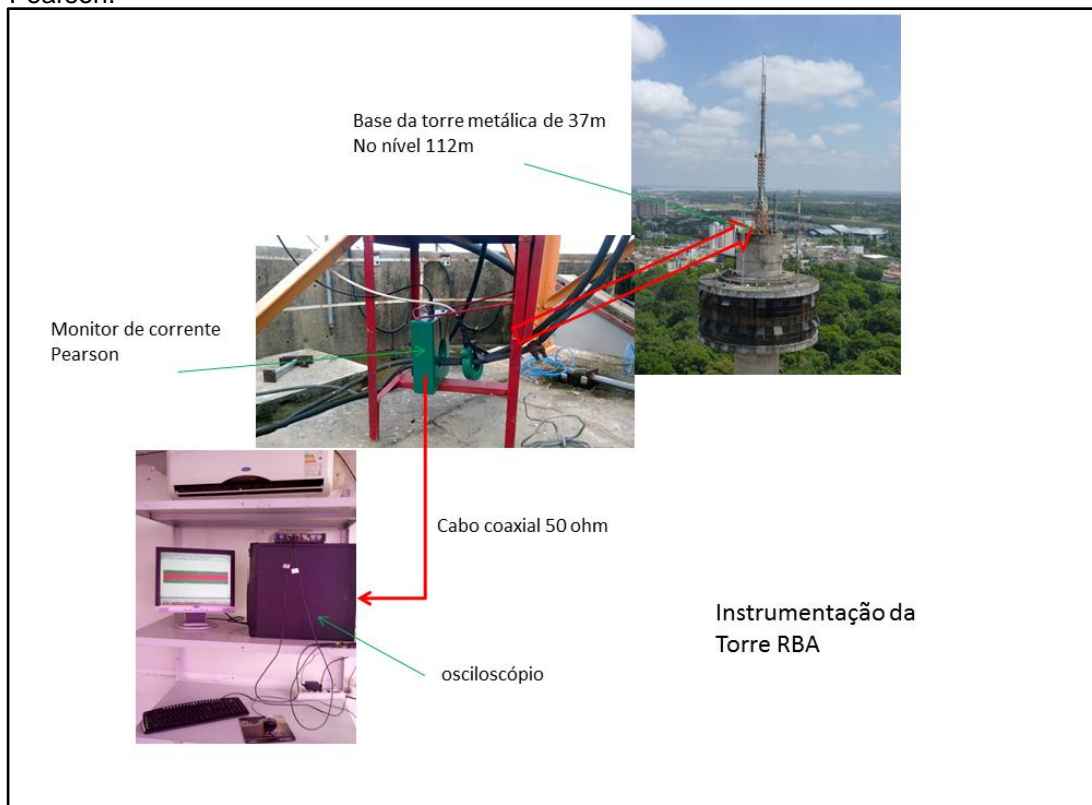
1	Field Mill	Boltek EFM-100 kit invertido
2	Computador desktop	Lenovo i7, 8GB, 1T 3.1 Ghz
3	Nobreak	APC Smart UPS SUA3000
4	Bobina Pearson	mod 1423 200kA (2)
5	Osciloscópio	iTest Minipa MO-2204
6	Posicionamento	maretron GIS2000
		Trimble juno
7	Câmera rápida	Casio exilim ex-fh200 1000fps
8	Picoscope	5444A/B (4 canais)
9	Fonte DC	Mult comercial HK-3003D

10	Notebook	Sansung i7, 4GB, 500GB
	Notebook	Sony Vaio 15", i7, 8GB, 1T
11	Contador de descarga	flash counter P8014 +P8015+ kits
12	Conversor Rs232/tcpip	Moxa Nport5110A+fonte+cabo p/ligar em db25
13	Antena ativa 5v	Marine use
	Antena whip	1,5m HF
14	Detector de radiação	mercado livre
14	Estação meteoro	mercado livre ws500

Fonte: Autor/Excel, 2014

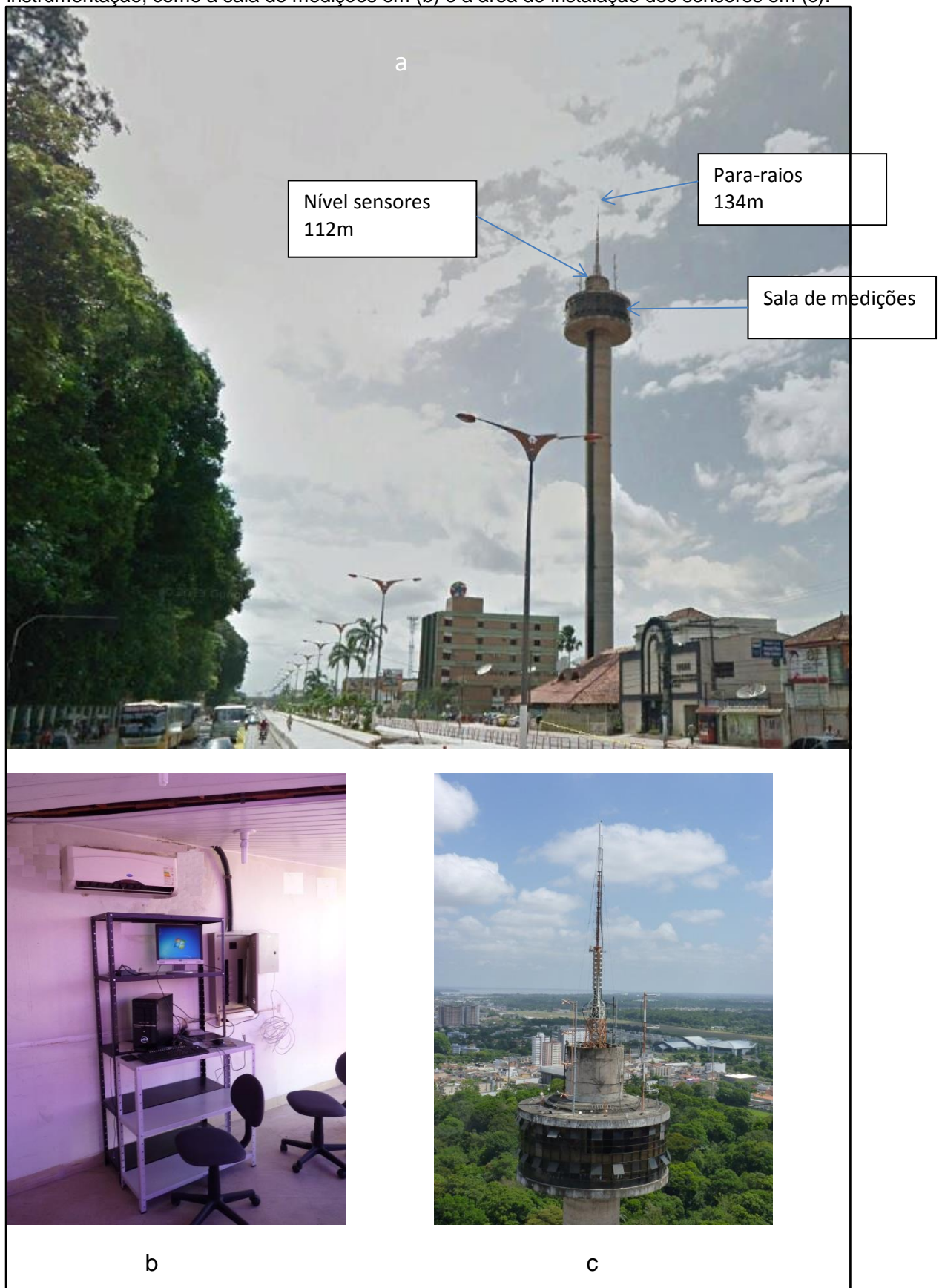
A Figura 34 mostra um diagrama da medição usando monitores de corrente do tipo Pearson, e na figura 35 em a) está mostrado a torre de TV RBA, localizada em frente ao Bosque Rodrigues Alves; em b) mostramos a cabine de medições e em c) esta mostrado o topo da torre de concreto, onde estão instalados os diversos sensores utilizados.

Fig. 34 - Torre de radio e televisão RBA; esquema de medição com monitores de corrente Pearson.



Fonte: Autor, 2014

Fig. 35 - Torre de radio e televisão RBA (a) com a localização dos elementos da instrumentação, como a sala de medições em (b) e a área de instalação dos sensores em (c).



Fonte: Autor/Photoshop, 2014

