

CLAUDENIR JANDERLINO SOUZA

**DETERMINAÇÃO DA LARGURA DE FAIXA DE SEGURANÇA DE  
LINHAS DE TRANSMISSÃO: UM ESTUDO PARAMÉTRICO**

Dissertação de mestrado apresentada à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Ivan José da Silva Lopes

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Minas Gerais

Dezembro de 2012

## Agradecimentos

Agradeço a Deus pela luz cedida durante esse caminho extenso percorrido, desde o início do mestrado até a sua conclusão.

Ao professor Dr. Ivan José da Silva Lopes pela orientação, paciência e muitas horas reservadas para as nossas reuniões técnicas.

À minha mãe, Jardelina (dona Ju), que sempre acreditou no meu potencial e que me ensinou a nunca desistir dos meus sonhos.

Aos meus irmãos Fábio, Claudionor, Clauder, Edimárcio, Cláudia e Claudemir que me mostraram o caminho do conhecimento e que me geraram momentos de discussões, que proporcionaram o meu crescimento.

À minha esposa, Daniele, por ter sido amiga, companheira e psicóloga, pela sua extrema compreensão nas minhas noites de estudo.

Aos meus tios, sobrinhos, afilhadas, primos, cunhado (as), amigos e padrinho, que diretamente ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Aos colegas da DALBEN Consultoria e RS Engenharia que me proporcionaram todo conhecimento técnico adquirido para gerar esta dissertação.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivos analisar o perfil lateral do campo elétrico, do campo magnético, do ruído audível e da rádio interferência gerados por linhas de transmissão de 138, 230 e 345 kV e avaliar a influência de parâmetros (altura de estrutura, tipo de cabo condutor, relação de vão de peso e vão de vento, comprimento de mísula, disposição de cabos condutores, tipo de LT ‘convencional’ e ‘compacta’, número de circuitos, número de condutores por fase e flecha) na sua largura de faixa de segurança. São considerados o balanço dos cabos condutores devido à ação do vento e a emissão dos efeitos eletromagnéticos, utilizando dados e informações em fase de projeto. Avalia-se a largura mínima necessária de faixa de segurança para linhas de transmissão de 138, 230 e 345 kV. A determinação da largura da faixa de segurança baseia-se em equações da teoria eletromagnética e nas ações do vento que proporcionam o balanço dos cabos condutores. São apresentados o perfil lateral dos efeitos eletromagnéticos proporcionados por uma LT e a largura de faixa de segurança para diferentes parâmetros das linhas. A partir da análise dos resultados obtidos, discute-se as larguras de faixa de segurança comumente utilizadas por concessionárias de energia elétrica, e a verificação dos limites dos efeitos eletromagnéticos estabelecidos pelas normas e regulamentações vigentes.

## **ABSTRACT**

This work investigates the lateral profile of the electric field, the magnetic field, the audible noise and the radio interference generated by 138, 230 and 345 kV transmission lines in order to evaluate the influence of parameters (tower height, conductor type, relationship between weight's span and wind's span, distance between phases, arrangement, line type 'conventional' and 'compact', number of circuits, number of conductors per phase and sag) in their right of way. The cables swing due the wind and the electromagnetic effects (using line design information) are considered. The minimum right of way necessary for the transmission lines is evaluated. The right of way calculation is based on equations of the electromagnetic theory and on the action of the wind causing the swing of the cables. The lateral profile electromagnetic effects and the right of way for different parameters of lines are presented. The results are compared with the right of way generally used by power utilities on the light of the present regulations.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	INTRODUÇÃO .....	1
1.2	OBJETIVOS E IMPORTÂNCIA DO TRABALHO .....	3
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	16
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA DE CÁLCULO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SISTEMAS EM ESTUDO.....</b>	<b>17</b>
2.1	CÁLCULO DO BALANÇO DE CABOS CONDUTORES.....	17
2.2	CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO .....	25
2.3	CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO .....	28
2.4	CÁLCULO DO RUÍDO AUDÍVEL .....	29
2.5	CÁLCULO DA RÁDIO INTERFERÊNCIA.....	31
2.6	CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SISTEMAS EM ESTUDO .....	33
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>39</b>
3.1	PERFIL LATERAL DOS EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS - CASO BASE .....	39
3.2	GRADIENTE NA SUPERFÍCIE DOS CONDUTORES .....	43
3.3	LARGURA DE FAIXA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DA LT .....	44
3.3.1	Variação da altura da estrutura.....	44
3.3.2	Variação do tipo do cabo condutor .....	47
3.3.3	Variação da relação vão de peso e vão de vento .....	50
3.3.4	Variação do comprimento da mísula.....	51
3.3.5	Variação da disposição dos cabos condutores.....	54
3.3.6	Variação do tipo de LT: Convencional x Compacta.....	57
3.3.7	Variação do número de circuitos.....	60
3.3.8	Variação do número de condutores por fase .....	62
3.3.9	Variação da flecha do cabo condutor .....	65
3.4	ANÁLISE DO PERFIL LATERAL DOS EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS - CASOS ESPECÍFICOS .....	69
3.4.1	Análise da altura mínima e média dos condutores e número de condutores por fase no perfil lateral da LT 345 kV .....	69
3.4.2	Análise do perfil lateral da rádio interferência em função da variação da altura da estrutura .....	74
3.4.3	Análise do perfil lateral da rádio interferência em função da variação da disposição dos cabos.....	76
3.4.4	Análise do perfil lateral da rádio interferência em função da variação do tipo de LT.....	78
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
4.1	CONCLUSÕES .....	81
4.2	PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	83
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>85</b>

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Largura de faixa de segurança de uma linha de transmissão .....	2
Figura 2.1 - Modelo de estrutura. ....	17
Figura 2.2 – Parâmetro “K” para determinação do ângulo de balanço [1]. ....	19
Figura 2.3 - Croqui de um perfil de linha, que demonstra o vão de peso e o vão de vento. ....	20
Figura 2.4 – Relação ( $K_d$ ) entre as velocidades médias a 10 metros de altura [1] .....	21
Figura 2.5 – Estimador ( $\alpha$ ) do fator de escala da distribuição de Gumbel [1] .....	22
Figura 2.6 – Estimador ( $\beta$ ) do fator de posição da distribuição de Gumbel [1] .....	23
Figura 2.7 – Representação da largura de faixa de segurança. ....	24
Figura 2.8 – Tela de entrada dos cálculos de balanço dos cabos condutores. ....	24
Figura 2.9 – Ilustração da metodologia de cálculo do campo elétrico .....	26
Figura 2.10 – Disposições dos cabos condutores nas estruturas do caso base .....	35
Figura 2.11 – Fluxograma da determinação da largura de faixa de segurança .....	38
Figura 3.1 - Perfil lateral do campo elétrico das LTs de 138, 230 e 345 kV, do caso base, para o cabo com altura mínima .....	40
Figura 3.2 - Perfil lateral do campo magnético das LTs de 138, 230 e 345 kV, do caso base, para o cabo com altura mínima .....	41
Figura 3.3 - Perfil lateral do ruído audível das LTs de 138, 230 e 345 kV, do caso base, para o cabo com altura mínima .....	42
Figura 3.4 - Perfil lateral da rádio interferência das LTs de 138, 230 e 345 kV, do caso base, para o cabo com altura mínima .....	43
Figura 3.5 - Largura da faixa para diferentes alturas das estruturas, de uma LT 138 kV. ....	45
Figura 3.6 - Largura da faixa para diferentes alturas das estruturas, de uma LT 230 kV. ....	46
Figura 3.7 - Largura da faixa para diferentes alturas das estruturas, de uma LT 345 kV. ....	47
Figura 3.8 - Largura da faixa para diferentes cabos condutores, de uma LT 138 kV. ....	48
Figura 3.9 - Largura da faixa para diferentes cabos condutores, de uma LT 230 kV. ....	49
Figura 3.10 - Largura da faixa para diferentes cabos condutores, de uma LT 345 kV .....	50
Figura 3.11 - Largura da faixa para diferentes relações de vão de peso e vão de vento. ....	51
Figura 3.12 - Largura da faixa para diferentes comprimentos de mísulas, de LT 138 kV. ....	52
Figura 3.13 - Largura da faixa para diferentes comprimentos de mísulas , de LT 230 kV. ....	53
Figura 3.14 - Largura da faixa para diferentes comprimentos de mísulas , de LT 345 kV. ....	54
Figura 3.15 - Largura da faixa para diferentes disposições dos cabos condutores, de uma LT 138 kV ...	55
Figura 3.16 - Largura da faixa para diferentes disposições dos cabos condutores, de uma LT 230 kV ...	56
Figura 3.17 - Largura da faixa para diferentes disposições dos cabos condutores, de uma LT 345 kV... ..	57
Figura 3.18 - Tipos de configuração triangular dos cabos condutores .....	57
Figura 3.19 - Largura da faixa para diferentes tipos de LT 138 kV .....	58
Figura 3.20 - Largura da faixa para diferentes tipos de LT 230 kV .....	59
Figura 3.21 - Largura da faixa para diferentes tipos de LT 345 kV. ....	60

Figura 3.22 - Largura da faixa para diferentes números de circuitos de LT 138 kV .....	61
Figura 3.23 - Largura da faixa para diferentes números de circuitos de LT 230 kV .....	62
Figura 3.24 - Largura da faixa para diferentes números de circuitos de LT 345 kV .....	62
Figura 3.25 - Largura da faixa para diferentes números de condutores por fase, de uma LT 138 kV ....	63
Figura 3.26 - Largura da faixa para diferentes números de condutores por fase, de uma LT 230 kV ....	64
Figura 3.27 - Largura da faixa para diferentes números de condutores por fase, de uma LT 345 kV ....	65
Figura 3.28 - Largura da faixa para diferentes flecha dos cabos condutores, de uma LT 138 kV.....	66
Figura 3.29 - Largura da faixa para diferentes flecha dos cabos condutores, de uma LT 230 kV .....	67
Figura 3.30 - Largura da faixa para diferentes flecha dos cabos condutores, de uma LT 345 kV.....	68
Figura 3.31 - Perfil lateral do campo elétrico da LT 345 kV, casos específicos, para o cabo com altura mínima e média do solo .....	70
Figura 3.32 - Perfil lateral do ruído audível da LT 345 kV, casos específicos, para o cabo com altura mínima e média do solo, sob chuva forte e molhado. ....	71
Figura 3.33 - Perfil lateral da rádio interferência da LT 345 kV, casos específicos, para o cabo com altura mínima e média do solo .....	72
Figura 3.34 - Perfil lateral do ruído audível da LT 345 kV, para o cabo com altura mínima do solo e diferentes condutores por fase .....	73
Figura 3.35 - Perfil lateral da rádio interferência da LT 345 kV, para o cabo com altura mínima do solo e diferentes condutores por fase .....	73
Figura 3.36 – Perfil lateral da rádio interferência da LT 138 kV, com as alturas 15, 20 e 25m .....	75
Figura 3.37 – Perfil lateral da rádio interferência da LT 345 kV, com as alturas 25, 30 e 35m .....	75
Figura 3.38 – Perfil lateral da rádio interferência da LT 138 kV, para as diferentes disposições dos cabos .....	77
Figura 3.39 – Perfil lateral da rádio interferência da LT 230 kV, para as diferentes disposições dos cabos .....	77
Figura 3.40 – Perfil lateral da rádio interferência da LT 345 kV, para as diferentes disposições dos cabos .....	78
Figura 3.41 – Perfil lateral da rádio interferência da LT 138 kV, para os diferentes tipos de LT .....	79
Figura 3.42 – Perfil lateral da rádio interferência da LT 345 kV, para os diferentes tipos de LT .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Largura de faixa de segurança aplicada pela CEMIG, CELG, CTEEP e EPTE. ....	7
Tabela 1.2 - Classes de recepção da rádio interferência . . . . .	9
Tabela 1.3 - Valores típicos de relação de eficiência de largura de faixa de segurança [16]. . . . .	10
Tabela 1.4 – Níveis de referência dos campos elétrico e magnético, para a exposição ocupacional, para frequência até 10 MHz. . . . .	12
Tabela 1.5 – Níveis de referência dos campos elétrico e magnético, paa a exposição ao público em geral, para frequência até 10 MHz . . . . .	12
Tabela 1.6 – Níveis de referência dos campos elétrico e magnético, para a exposição ocupacional e ao público em geral, para a frequência de 60 Hz. . . . .	13
Tabela 2.1 – Coeficientes (Kr) de rugosidade do terreno [1]. . . . .	20
Tabela 2.2 – Valores n para correção da velocidade de vento em função da altura [1] . . . . .	21
Tabela 2.3 – Condições de simulação. . . . .	34
Tabela 2.4 - Valores de flechas e vãos típicos de LTs convencionais . . . . .	35
Tabela 2.5 - Valores de flechas e vãos típicos de LTs compactas . . . . .	36
Tabela 3.1 – Gradiente máximo na superfície dos condutores . . . . .	44

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 INTRODUÇÃO

Os cabos condutores que constituem as linhas de transmissão (LT) de energia elétrica quando energizados provocam, no meio em que se encontram, efeitos eletromagnéticos, os quais são destacados os campos elétrico e magnético, rádio interferência, ruído audível, entre outros. Sendo assim, a fim de se evitar riscos à segurança da linha, aos eventuais obstáculos existentes ao longo do seu caminhamento ou até mesmo a exposição humana a esses efeitos, é necessário que essas linhas sejam instaladas dentro de uma área de terra, com uma largura definida, denominada faixa de segurança.

A faixa de segurança pode ser chamada também de faixa de passagem e pode ser de domínio ou de servidão. A faixa de domínio caracteriza-se pela aquisição, por parte do proprietário da linha, da área de terra atravessada pela LT e a faixa de servidão caracteriza-se pela não aquisição da área de terra (o proprietário continua dono da área da terra, mas o mesmo tem restrições de uso). A aquisição ou não da largura de faixa (enquadrando na faixa de domínio ou de servidão) está condicionada ao nível de tensão da linha de transmissão e ao sistema de conexão, por exemplo, as linhas de transmissão maiores ou iguais a 230 kV, com conexão no Sistema Interligado Nacional, SIN, possuem faixa de servidão. Já as linhas de transmissão com tensões menores ou iguais a 138 kV, com conexão nas concessionárias de energia elétrica, tem faixa de domínio. A Figura 1.1 apresenta ilustrativamente a largura de faixa de segurança de linhas de transmissão.



**Figura 1.1 – Largura de faixa de segurança de uma linha de transmissão.**

O traçado da linha de transmissão de energia elétrica, juntamente com sua largura de faixa de segurança, são informações necessárias para iniciar o processo de licenciamento ambiental para implantação da referida linha e propiciam o começo dos trâmites de negociação com os proprietários dos terrenos atravessados pela LT. Essa etapa acontece no início do projeto, o que se justifica o uso de dados e informações de projeto para se determinar a largura da faixa de segurança, em vez de se utilizar dados reais da linha quando a mesma já se encontra construída.

Nos projetos das primeiras linhas de transmissão, não se tinha muita variedade de estruturas, de isoladores, de cabos condutores e de cabos para-raios. Por isso, era utilizada uma única largura de faixa de segurança. Essa prática é adotada pelas concessionárias de energia elétrica, que usualmente adotam a largura da faixa de segurança de uma LT em função do seu nível de tensão. O projeto de novos cabos, sejam condutores ou para-raios, o surgimento de regulamentações e de normas e o aumento da quantidade de linhas de transmissão, com conseqüente redução de espaço para implantação das LTs, proporcionaram a necessidade de se determinar a largura de faixa de segurança necessária à implantação da linha, a partir de alguns critérios pré-estabelecidos.

A norma ABNT NBR 5422 – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia [1] – datada de março de 1985, atualmente em processo de revisão, estabelece as diretrizes para se calcular a largura de faixa de segurança de uma LT, mas estabelece limites apenas para o campo elétrico. O Operador Nacional do Sistema elétrico, ONS, através dos Procedimentos de Rede do ONS, Sub-módulo 2.4 [2], define os limites máximos admissíveis para os efeitos eletromagnéticos (campo elétrico, campo magnético, ruído audível e rádio interferência) gerados pelas linhas de transmissão de energia elétrica com tensão igual ou maior que 230 kV. Surgiu recentemente no Brasil, em março de 2010, uma resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, de número 398 [3], que regulamenta os limites dos campos elétrico e magnético, na frequência de 60 Hz, recomendados pela Organização Mundial de Saúde, provocados por linhas de transmissão, independentemente do seu nível de tensão. Essa regulamentação inicia a corrida pela conscientização das empresas projetistas de LT em se determinar a largura de faixa de segurança das linhas de transmissão.

Tomando-se por base o exposto, este trabalho tem como objetivos analisar o perfil lateral dos efeitos eletromagnéticos (campo elétrico, campo magnético, ruído audível e rádio interferência) gerados pelas linhas de transmissão e avaliar a influência dos parâmetros das LTs na sua largura da faixa de segurança, considerando o balanço dos cabos condutores e a emissão dos efeitos eletromagnéticos.

## **1.2 OBJETIVOS E IMPORTÂNCIA DO TRABALHO**

Este trabalho tem como objetivos analisar o perfil lateral do campo elétrico, do campo magnético, do ruído audível e da rádio interferência gerados por linhas de transmissão de 138, 230 e 345 kV e avaliar a influência de parâmetros (altura de estrutura, tipo de cabo condutor, relação de vão de peso e vão de vento, comprimento de mísula, disposição de cabos condutores, tipo de LT ‘convencional’ e ‘compacta’, número de circuitos, número de

condutores por fase e flecha) na sua largura de faixa de segurança. São considerados: o balanço dos cabos condutores devido à ação do vento e a emissão dos efeitos eletromagnéticos, utilizando dados e informações em fase de projeto. Avalia-se a largura mínima necessária de faixa de segurança para linhas de transmissão de 138, 230 e 345 kV. A determinação da largura da faixa de segurança baseia-se em equações da teoria eletromagnética e nas ações do vento que proporcionam o balanço dos cabos condutores. São apresentados: o perfil lateral dos efeitos eletromagnéticos proporcionados por uma LT e a largura de faixa de segurança para diferentes parâmetros das linhas. A partir da análise dos resultados obtidos, discutem-se as larguras de faixa de segurança comumente utilizadas por concessionárias de energia elétrica, e a verificação dos limites dos efeitos eletromagnéticos estabelecidos pelas normas e regulamentações vigentes.

É de suma importância analisar quais parâmetros de uma linha de transmissão podem proporcionar a redução de sua largura da faixa de segurança, pois essa redução gera uma série de vantagens durante a etapa de projeto e construção da LT, onde se pode listar: redução da área de terreno a ser adquirida ou negociada, redução do investimento da linha de transmissão face à menor quantidade de terra adquirida ou negociada, redução de impactos ambientais, face à redução da supressão vegetal e redução dos trâmites ambientais e negociação com os proprietários das terras.

Este trabalho aguça o interesse das empresas projetistas de linhas de transmissão em considerar, em seus projetos, os cálculos de efeitos eletromagnéticos e balanço dos cabos condutores para se determinar a largura de faixa de segurança de uma LT, face aos resultados e discussões apresentados, os quais mostram os meios de se reduzir a largura de faixa de segurança de LTs de 138, 230 e 345 kV.

Os perfis laterais dos efeitos eletromagnéticos apresentados nesta dissertação proporcionam a análise dos limites estabelecidos pela Norma NBR 5422, pela resolução 398 da ANEEL e pelos procedimentos de rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro. Uma vez que a Norma NBR 5422 encontra-se em processo de revisão, este trabalho pode ser utilizado como uma referência para se efetuar tal revisão.

Os resultados das análises apresentadas mostram que o ruído audível, a rádio interferência e o balanço dos cabos condutores são critérios mais restritivos que os campos elétrico e magnético, estabelecidos pela ANEEL, na determinação da largura de faixa de segurança. Sendo assim, este trabalho tem importante papel na análise da resolução 398 da ANEEL, que é verificar os limites estabelecidos por essa resolução, bem como mostrar o grau de importância dos efeitos do ruído audível, da rádio interferência e do balanço dos cabos condutores, adicionalmente aos campos elétrico e magnético, na determinação da largura de faixa de segurança de uma LT.

Com esta dissertação é possível mostrar às empresas do setor elétrico que não é viável a prática de se utilizar a largura de faixa em função do nível de tensão da LT. Conforme resultados aqui apresentados, as larguras de faixa de segurança, estipuladas pelas concessionárias, podem estar subdimensionadas ou superdimensionadas, sendo assim, a largura de faixa de segurança deverá ser determinada em função da particularidade de cada linha.

A dissertação analisa conjuntamente os quatro efeitos eletromagnéticos (campo elétrico, campo magnético, ruído audível e rádio interferência) e o balanço dos cabos condutores, para se determinar a largura de faixa de segurança de uma linha de transmissão. Na grande maioria das referências bibliográficas, esses efeitos são analisados separadamente.

### **1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

S. R. Matzenbacher publicou em 1999, um trabalho sobre identificação e análise de problemas no cálculo estabelecido pela Norma ABNT NBR 5422 para se determinar a faixa de segurança de linhas de transmissão [4]. Este trabalho questiona os métodos diferentes, utilizados pela Norma NBR 5422, para se determinar a largura de faixa de segurança e a distância de segurança (que é o afastamento mínimo necessário entre o cabo condutor, e partes energizadas, a quaisquer partes). É proposta uma análise de uniformização da utilização das seguintes informações necessárias para se determinar a largura de faixa de segurança e a distância de segurança: cálculo da ação do vento, escolha do período de retorno do vento, ângulo de balanço da cadeia de isoladores, vão da linha e natureza do obstáculo atravessado pela LT.

A Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG – possui um roteiro que descreve a metodologia para se determinar a velocidade de vento de projeto e o ângulo de balanço de cadeias de isoladores e de cabos condutores [5], em conformidade com os cálculos utilizados pela Norma ABNT NBR 5422. Este roteiro tem como objetivo auxiliar os profissionais do setor elétrico a compreender melhor os critérios e fatores para se determinar a velocidade de vento e os ângulos de balanço de cabos condutores e de cadeias de isoladores, que são fundamentais na obtenção da largura de faixa de segurança de uma linha de transmissão. Este trabalho, além de descrever essa metodologia, apresenta as larguras de faixa de segurança padronizadas pela CEMIG para as linhas de transmissão de 69 a 500 kV, as quais estão transcritas na Tabela 1.1.

A Companhia Energética de Goiás – CELG – através da Especificação Técnica para Limitação do Uso de Faixa de Linhas de 69, 138 e 230 kV [6], estabelece as diretrizes da limitação do uso da faixa por parte do usuário ou do proprietário da terra, das benfeitorias

permitidas na faixa e das distâncias mínimas necessárias entre os cabos condutores inferiores das linhas de transmissão ao solo (em locais acessíveis a pedestres, ruas, avenidas, estradas rurais, rodovias, ferrovias e onde circulam máquinas agrícolas). Esta Especificação Técnica apresenta também as larguras de faixa necessárias às LTs em função do seu nível de tensão, conforme valores transcritos na Tabela 1.1, onde observa-se uma grande diferença nas larguras de faixa assumidas pela CELG e CEMIG para as linhas de transmissão de 69 e 138 kV.

A Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista – CTEEP – padroniza as larguras de faixa de segurança das linhas de transmissão do estado de São Paulo [7], para os níveis de tensão de 69, 138 e 500 kV, conforme apresentados na Tabela 1.1. Já para as linhas de 230 e 345 kV, essa empresa salienta que há grandes variedades de largura de faixa, sendo necessário se conhecer o projeto da linha para se verificar a real largura de faixa. A Engenharia e Planejamento em Transmissão de Energia – EPTE - [8], empresa constituída por engenheiros oriundos de concessionárias de energia elétrica, com vasta experiência na área de linhas de transmissão, constatou as larguras médias de faixa de segurança das LTs do Município de São Paulo, mostradas na Tabela 1.1. Através dessa tabela, observa-se que as larguras de faixa padronizadas pela CTEEP, para a LT de 138 kV, diferem das larguras médias constatadas pela EPTE.

**Tabela 1.1 - Largura de faixa de segurança aplicada pela CEMIG, CELG, CTEEP e EPTE**

Tensão (kV)	69	138	230	345	500
Largura da faixa (m) [5]	23	23	38	50	60
Largura da faixa (m) [6]	12	16	35	-	-
Largura da faixa (m) [7]	20	30	-	-	50
Largura da faixa (m) [8]	-	10, 13 ou 16	29	50	-

Os autores Y. Liao, L. Hou, L. Wang, Z. Guan, Y. Zhang e P. Zhu publicaram em janeiro de 2011 um artigo que analisa numericamente, utilizando o Método de Elementos

Finitos, e também experimentalmente, o ângulo de balanço de uma cadeia de isolador em V, de uma linha de transmissão de 750 kV [9]. Este trabalho discute a relação entre deformação (deslocamento e força) e a carga na cadeia em V, além de apresentar um experimento composto de uma carga aplicada na cadeia de isolador em V, a fim de verificar os resultados dos cálculos. Já os autores B. Yan, X. Lin, W. Luo, Z. Chen e Z. Liu analisaram, através de estudo numérico, o balanço dinâmico de cadeias de isoladores de suspensão sob ação do vento [10]. É analisada neste artigo a modelagem numérica e computacional, utilizando-se o software ABAQUS, para cálculo de ângulo de balanço devido à ação do vento. Verifica-se que os resultados numéricos para o cálculo de ângulo de balanço são maiores que os obtidos computacionalmente, sendo assim um fator de carga dinâmica de vento é sugerido para ser introduzido na fórmula proposta de cálculos. Essas referências nos mostram que os cálculos de balanço dos cabos condutores não podem ser tratados de uma forma trivial.

Uma referência largamente utilizada pelos engenheiros nos projetos de linhas de transmissão é o livro “Transmission Line Reference Book” [11]. Nele, encontram-se os cálculos para se determinar os níveis de emissão dos campos elétrico e magnético, do ruído audível e da rádio interferência gerados pelas linhas. No presente trabalho, foi desenvolvida uma rotina de cálculo, utilizando-se o programa computacional Matlab, versão 2007, e as expressões dessa referência, para se determinar os efeitos eletromagnéticos gerados pela linha, para se obter a largura de faixa de segurança.

O CIGRE, juntamente com o IEEE, através da referência [12], analisa as diferenças entre 10 métodos de cálculos, sendo 2 analíticos e 8 comparativos, para se determinar a rádio interferência proporcionada por linhas de transmissão. São apresentados fatores para correções dos métodos, bem como vantagens e desvantagens entre os mesmos. No presente trabalho, foi utilizado o método de cálculo da *Westinghouse Electric Corporation*, dos

Estados Unidos, apresentado nesta referência, para se determinar a rádio interferência gerada pelas linhas de transmissão, uma vez que esse método utiliza-se de relações empíricas que foram desenvolvidas ao longo de vários anos de experiência em projetos, teste em laboratórios e em linhas existentes.

A influência dos cabos para-raios no campo elétrico gerado pelas linhas de transmissão é analisada por Cristina S., em 1984 [13] e por Adel Z. El Dein em 2010 [14]. Nestes trabalhos, são analisadas as variações da largura de faixa de segurança quando se tem alteração dos parâmetros dos cabos para-raios. Conforme os resultados apresentados, há pequena alteração dos níveis de emissão de campo elétrico, na extremidade da faixa de segurança, quando se tem alteração de parâmetros dos cabos para-raios.

A referência [15] apresenta a qualidade de recepção do sinal de rádio interferência, conforme valores transcritos na Tabela 1.2. A rádio interferência emitida pela linha de transmissão, juntamente com as classes apresentadas na Tabela 1.2, não deverão exceder os limites estabelecidos pelas regulamentações. Por exemplo, se o limite de rádio interferência for de 66 dB e tivermos uma classe de recepção C, o ruído emitido pela LT deverá ser no máximo 44 dB ( $NP_i = 66 - 22 = 44$ ).

**Tabela 1.2 - Classes de recepção da rádio interferência**

Classe de recepção	Sinal de rádio interferência (dB)	Qualidade de recepção
A	32	Excelente; Ruído não detectável
B	27 a 32	Muito boa; Ruído detectável
C	22 a 27	Bastante satisfatório; Ruído evidente
D	16 a 22	Inteligível; Ruído muito evidente
E	6 a 16	Compreensivo somente; com concentração severa
F	7	Ininteligível

A Tabela 1.3 apresenta a relação entre a potência transmitida e a largura de faixa de segurança (Relação de eficiência = Potência transmitida / Largura de faixa), apresentada na

referência [16]. Conforme valores apresentados, observa-se uma elevação da largura de faixa, e conseqüentemente da relação de eficiência, quando se tem aumento da potência transmitida pela linha de transmissão. Esta dissertação mostra que a largura de faixa de segurança é diferente para linhas com um mesmo nível, dependendo do parâmetro utilizado na LT. Logo, essa relação de eficiência não é aplicável, devido às particularidades de cada linha de transmissão.

**Tabela 1.3 - Valores típicos de relação de eficiência de largura de faixa de segurança [16]**

Tensão (kV)	Potência (MVA)	Largura de faixa (m)	Relação de eficiência (MVA/m)
230	165	45	3,7
500	1000	65	15,4
765	2500	95	26,3

O CIGRE e o IEEE realizaram um trabalho de verificação da emissão de rádio interferência para LTs de 220 a 765 kV, para diferentes condições climáticas [17]. Neste trabalho, é sugerido um fator de correção para os cálculos de rádio interferência, para se ter uma equiparação entre as fórmulas aplicadas pelos diversos autores, a partir de então, confrontar os métodos de cálculos com os valores obtidos durante as medições. De uma forma geral, após a equiparação entre os métodos de cálculos, dos diversos autores, os valores calculados de rádio interferência se aproximam das medições realizadas.

Foram realizados cálculos e medições de campo elétrico e campo magnético em uma linha de transmissão de 500 kV, de conexão entre as subestações Neves 1 e Vespasiano 2 [18]. Nesta referência, são confrontados os valores medidos com os calculados, ressaltando possíveis motivos quando se têm divergências entre esses dois valores. Nos cálculos, foram utilizados dados reais, por exemplo, para determinação do campo elétrico e da densidade de fluxo magnético, foram coletados os valores de tensão e corrente registrados no sistema de controle da subestação Vespasiano 2. Esses dados não são possíveis de serem coletados no

estágio em que se precisa determinar a largura de faixa de segurança, que é a fase de projeto da linha de transmissão, onde a mesma não se encontra implantada.

O objetivo principal da referência [19] é desenvolver um modelo para estimar a exposição populacional ao campo magnético provocado por uma linha de transmissão e validar o modelo experimental. São realizados cálculos e medições do campo magnético para alguns tipos diferentes de configuração de LT, onde observa-se o valor máximo encontrado no centro da estrutura, para todas as configurações analisadas. O maior valor de campo magnético observado é de 34  $\mu\text{T}$ , para uma LT de 735 kV, com corrente nominal de 2000A. Esse maior valor de campo magnético é bem inferior ao limite de 83  $\mu\text{T}$ , explicitado pelo submódulo 2.4 do ONS e pela Resolução 398 da ANEEL.

Em 1998, foi publicada pela Comissão Internacional de Proteção Contra Radiações Não Ionizantes – ICNIRP – as primeiras diretrizes para os limites de exposição pública e ocupacional dos campos eletromagnéticos, variáveis no tempo, para frequências de até 300 GHz. Recentemente, em março de 2010, o ICNIRP publicou as diretrizes para os efeitos de campo elétrico e magnético, para a baixa frequência, compreendida entre 1 Hz e 10 MHz [20]. Nestas diretrizes, são discutidos os resultados dos efeitos biológicos e epidemiológicos, dos estudos em laboratórios, dos estudos celulares e animais; em síntese, são verificados os efeitos eletromagnéticos sobre as células do corpo humano. Apresentam-se resumidamente, através das Tabelas 1.4 e 1.5, os limites vigentes de campo elétrico e campo magnético, para a exposição ocupacional ao público geral, respectivamente, estabelecidos pela ICNIRP, para a faixa de frequência até 10 MHz.

**Tabela 1.4 – Níveis de referência dos campos elétrico e magnético, para a exposição ocupacional, para frequência até 10 MHz [20]**

Faixa de frequência	Campo elétrico (kV/m)	Intensidade de campo magnético (A/m)	Densidade de fluxo magnético (T)
1 – 8 Hz	20	$1,63 \times 10^5/f^2$	$0,2/f^2$
8 – 25 Hz	20	$2 \times 10^4/f$	$2,5 \times 10^{-2}/f$
25 – 300 Hz	500/f	800	$1 \times 10^{-3}$
0,3 – 3 kHz	500/f	$2,4 \times 10^5/f$	$0,3/f$
0,003 - 10 MHz	0,7	80	$1 \times 10^{-4}$

**Tabela 1.5 – Níveis de referência dos campos elétrico e magnético, para a exposição ao público em geral, para frequência até 10 MHz [20]**

Faixa de frequência	Campo elétrico (kV/m)	Intensidade de campo magnético (A/m)	Densidade de fluxo magnético (T)
1 – 8 Hz	5	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^{-2}/f^2$
8 – 25 Hz	5	$4 \times 10^3/f$	$5 \times 10^{-3}/f$
25 – 50 Hz	5	160	$2 \times 10^{-4}$
50 – 400 Hz	250/f	160	$2 \times 10^{-4}$
0,4 – 3 kHz	250/f	$6,4 \times 10^4/f$	$8 \times 10^{-2}/f$
0,003 – 10 MHz	$8,3 \times 10^{-2}$	21	$2,7 \times 10^{-5}$

A Tabela 1.6 apresenta uma síntese dos limites vigentes estabelecidos pela ANEEL, ABNT (através da NBR 5422), ONS (através do Submódulo 2.4) e ICNIRP, de exposição à população ocupacional (compreendida por pessoas adultas, geralmente expostas aos campos eletromagnéticos, em função da sua atividade de ocupação) e do público em geral (constituído pela população não ocupacional), para os efeitos eletromagnéticos considerados nesta dissertação, para a frequência de 60 Hz. Observa-se uma discrepância entre os limites estabelecidos pelo Sub-módulo 2.4 e o ICNIRP, para a densidade de fluxo e intensidade de campo magnético, tanto para a exposição ocupacional quanto para o público em geral.

**Tabela 1.6 – Níveis de referência dos campos elétrico e magnético, para a exposição ocupacional e ao público em geral, para a frequência de 60 Hz**

Referência	Exposição ocupacional			Público em geral		
	Campo Elétrico (kV/m)	Intensidade de campo magnético (A/m)	Densidade de fluxo magnético ( $\mu$ T)	Campo Elétrico (kV/m)	Intensidade de campo magnético (A/m)	Densidade de fluxo magnético ( $\mu$ T)
ANEEL [3]	8,33	-	416,67	4,17	-	83,33
NBR 5422 [4]	-	-	-	5,0	-	-
SM 2.4 [5]	-	-	-	4,2	67,0	83,0
ICNIRP [19]	8,33	800	1000	4,17	160	200

A norma NBR 5422 e o procedimento de rede do ONS, submódulo 2.4, não especifica se seus limites são para a exposição ocupacional ou para o público em geral. Foram considerados na Tabela 1.6 esses limites para o público em geral tendo em vista que a NBR5422 e o ONS apresentam critérios para todo o público.

O presente trabalho calcula as larguras de faixa de segurança das LTs considerando-se os limites estabelecidos pelos procedimentos de rede do ONS (Submódulo 2.4), tendo em vista os seus menores limites, mostrados na Tabela 1.6, e este órgão definir também os limites para os efeitos de ruído audível e da rádio interferência, descritos no item 2, os quais não são estabelecidos pela ANEEL, NBR 5422 e ICNIRP.

Após a instalação da linha de transmissão, é de suma importância a manutenção da faixa de segurança, proporcionada pela poda seletiva da vegetação, a fim de se evitar desligamento das LTs devido ao contato direto dos cabos condutores com as árvores. A referência [21] avalia a distância vertical entre os cabos condutores e a altura atingida pelas árvores, do circuito 4 da linha de transmissão de 230 kV de Chavantes a Botucatu C4, no município de São Paulo.

No Iran, o comprimento de mísula não é considerado nos cálculos para se determinar a largura de faixa de segurança de linha de transmissão [22], sendo utilizada apenas a distância horizontal ( $d$ ), varrida pelo ângulo de balanço dos cabos condutores e a distância de segurança ( $D$ ), equacionados em (2.1). Este país também tem a preocupação de se reduzir a largura de faixa, conforme referência [23], onde se tem a aplicação de amarrações e configurações diferentes de isoladores poliméricos a fim de proporcionar tal redução.

M. R. Moreau e C. H. Gary, publicaram um trabalho, dividido em duas partes, que trata da predeterminação do nível de rádio interferência de linhas de transmissão: a Parte I aborda a predeterminação da função de excitação, utilizada para os níveis de emissão da rádio interferência quando os cabos condutores se encontram sob chuva [24] e a Parte II abrange o método de cálculo do campo [25]. A Parte I mostra a influência da intensidade da chuva no nível de rádio interferência, onde são observados maiores níveis de emissão desse efeito para intensidade de chuva de até 1 mm/h. Já a Parte II apresenta o método de cálculo da rádio interferência, baseado no uso da função de excitação, que proporcionará melhorias e simplificações comparadas com o método analítico de cálculo da rádio interferência, onde se pode listar: a introdução da profundidade de penetração, o uso de coeficientes de atenuação sistematizado e respostas exatas dos instrumentos de medição.

O método de cálculo da rádio interferência ainda é um grande desafio dos pesquisadores de linha de transmissão. Têm surgido novos métodos de cálculos, como a análise do uso de autovalores e autovetores, complexos, no termo de correção de Carson, o tratamento entre a correlação entre a fase e o ruído de campo modal, e modelos de tempo mais precisos para gerar a qualidade de recepção de rádio esperada em termos estatísticos [26]. Outros pesquisadores têm analisado o valor médio e o desvio padrão no nível de rádio interferência em tempo bom e o nível médio de rádio interferência quando o condutor está molhado [27].

Há também a análise de aproximação do efeito do fator variável do nível de rádio interferência devido ao efeito corona do cabo condutor [28]. Já J. Reichman e J. R. Leslie, publicaram um resumo dos estudos de rádio interferência, onde é analisada a relação entre o diâmetro do condutor e o campo elétrico da linha, a análise experimental do nível de rádio interferência usando fonte artificial e uma análise comparativa entre os níveis emitidos por uma linha de 230 e 500 kV. Em síntese, a rádio interferência não pode ser tratada como um problema já resolvido, tendo novos caminhos do conhecimento a serem percorridos.

Uma força tarefa foi realizada em 1982 para tratar dos métodos de cálculos de ruído audível de linhas de transmissão de alta tensão, para LTs com tensão alternada e contínua [30]. O método de cálculo para as linhas AC é dividido em dois tipos, sendo o Tipo 1 utilizado em circuito simples e disposição horizontal dos cabos condutores, o qual é composto por apenas duas equações distintas, uma da AEP e a outra da ONTARIO HYDRO. Já o Tipo 2 é aplicável a todas as geometrias e configurações de linha, constituído por sete fórmulas para se determinar o ruído audível, sugeridas por BPA, CRIEPI, EDF, ENEL, FGH, PROJECT UHV e IREC. É realizada neste estudo, uma análise comparativa entre os métodos de cálculos e estes são confrontados com medições realizadas de ruído audível. Apesar de algumas equações serem bem diferentes uma das outras, são observadas poucas divergências nessa análise comparativa de resultados.

Em 1983, H. Kirkham e W. J. Gajda publicaram um trabalho, dividido em duas partes, baseado em modelo matemático para determinação do ruído audível de linha de transmissão, o qual difere dos modelos apresentados na força tarefa de 1982. A Parte 1 trata-se da modelagem matemática para se calcular o ruído audível [31], que descreve a soma de cada ruído gerado por cada condutor energizado. A Parte 2 aborda uma análise comparativa do

modelo apresentado na parte 1 com medições realizadas [32]. Novamente, observa-se uma aproximação dos valores calculados com os obtidos experimentalmente.

## **1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

A presente dissertação é dividida em quatro capítulos, conforme descritos a seguir.

O Capítulo 2 apresenta a *Metodologia de Cálculo e as Características Gerais dos Sistemas em Estudo*. Discutem-se os limites eletromagnéticos estabelecidos pelas normas e resoluções vigentes, no limite da faixa de segurança, além de se apresentar os métodos de cálculos para se obter os níveis de emissão dos efeitos eletromagnéticos e o balanço de cabos condutores devido à ação de vento. Apresentam-se as informações sobre os parâmetros analisados nesta dissertação, as condições simuladas e as premissas utilizadas para se obter os resultados das larguras de faixa de segurança.

São apresentados *os Resultados e Discussões*, no Capítulo 3: os perfis laterais dos campos elétrico e magnético, do ruído audível e da rádio interferência, proporcionados pela LT, e as larguras de faixa de segurança exigidas por esses efeitos eletromagnéticos e pelo balanço do cabo condutor, para diferentes parâmetros das linhas de transmissão de 138, 230 e 345 kV.

O Capítulo 4, *Conclusões*, apresenta as conclusões obtidas ao término deste trabalho e as propostas de continuidade.

## 2 METODOLOGIA DE CÁLCULO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SISTEMAS EM ESTUDO

A metodologia utilizada na determinação da largura de faixa de segurança considera o balanço dos cabos condutores, devido à ação do vento, conforme apresentado no item 2.1, e a emissão dos efeitos eletromagnéticos (campo elétrico, campo magnético, ruído audível e rádio interferência), conforme mostrada nos itens 2.2 a 2.5.

### 2.1 CÁLCULO DO BALANÇO DE CABOS CONDUTORES

A Figura 2.1 apresenta as distâncias envolvidas nos cálculos para se determinar o balanço dos cabos condutores, devido à ação do vento, para um caso de uma linha de transmissão.

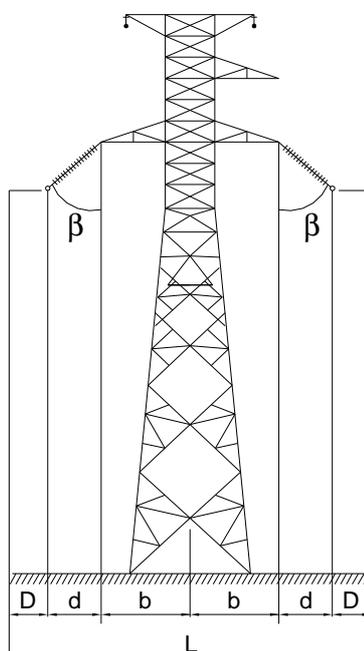


Figura 2.1 - Croqui de uma estrutura.

A largura da faixa de segurança ( $L$ ), devido ao balanço dos cabos condutores, é determinada por [1]:

$$L = 2 \times (b + d + D), \quad (2.1)$$

onde:  $b$  é o comprimento da mísula (m);  $d$  é a distância horizontal (m), varrida pelo ângulo de balanço  $\beta$ , o qual depende do tipo do cabo condutor utilizado na LT, de fatores ambientais, como vento, pressão dinâmica, etc;  $D$  é uma distância de segurança (m), a qual depende do nível de tensão considerado na LT.

A distância de segurança  $D$  é determinada por:

$$D = (V_{\text{nominal}} \times 1,15) / 150, \text{ no mínimo igual a } 0,5 \text{ m.} \quad (2.2)$$

A distância horizontal ( $d$ ), de projeção do ângulo de balanço para a flecha do vão adotado, é determinada por:

$$d = F \cdot \text{sen } \beta \quad (2.3)$$

onde:  $F$  é a flecha (m) do cabo condutor a  $20^\circ \text{ C}$  para o vento máximo para o vão adotado.

O ângulo de balanço  $\beta$  é determinado por:

$$\beta = \text{tg}^{-1} \left( K \times \frac{q_0 \times d}{p \times \frac{VP}{VV}} \right) \quad (2.4)$$

onde:  $K$  é um coeficiente, que depende da velocidade de vento, apresentado na Figura 2.2;  $q_0$  é a pressão dinâmica de referência ( $\text{N/m}^2$ );  $d$  é o diâmetro do condutor (m);  $p$  é o peso unitário do condutor ( $\text{N/m}$ );  $VP$  é o vão de peso (m) e  $VV$  é o vão de vento (m). A relação vão de peso e vão de vento é obtida pela divisão dessas duas grandezas.

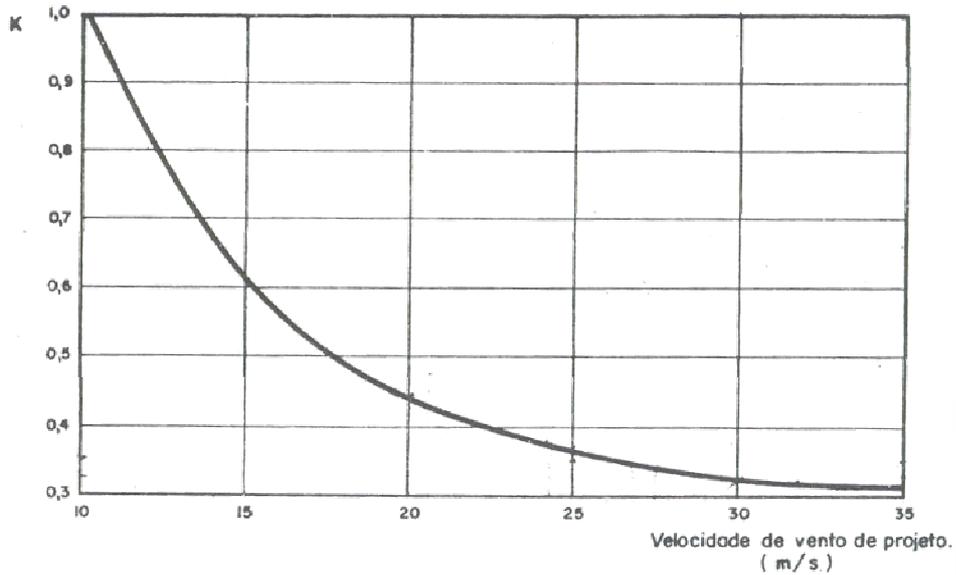


Figura 2.2 – Parâmetro “K” para determinação do ângulo de balanço [1].

A pressão dinâmica de referência ( $q_0$ ) pode ser obtida através da expressão:

$$q_0 = \frac{1}{2} V_p^2 \left[ \frac{1,293}{1 + 0,00367.t} \left( \frac{16000 + 64.t - ALT}{16000 + 64.t + ALT} \right) \right] \quad (2.5)$$

onde:  $V_p$  é a velocidade do vento de projeto (m/s);  $t$  é a temperatura coincidente ( $^{\circ}\text{C}$ ), que é a média das temperaturas mínimas diárias e que coincide com a ocorrência de  $V_p$ ; ALT é a altitude média da região onde se encontra a linha (m).

O vão de vento, também denominado vão médio, é a média aritmética dos vãos adjacentes à estrutura, e o vão de peso é a distância dos pontos mais baixos dos cabos dos vãos adjacentes à estrutura. A Figura 2.3 apresenta, a título de ilustração, um perfil de uma linha hipotética, onde se pode observar o vão de peso (VP2) da estrutura 2 e os vãos entre as torres 1 e 2 (V12) e entre as torres 2 e 3 (V23), que constituem o vão de vento da torre 2.

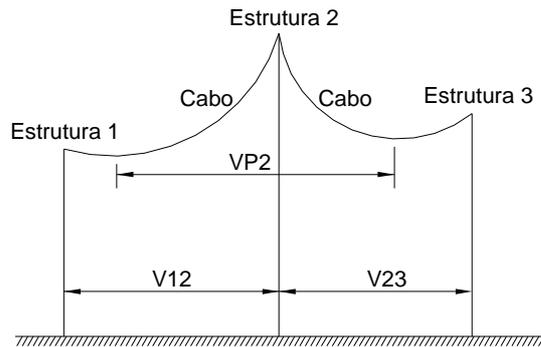


Figura 2.3 – Croqui de um perfil de linha, que demonstra o vão de peso e o vão de vento.

A velocidade de vento de projeto ( $V_p$ ) pode ser determinada por:

$$V_p = K_r \cdot K_d \cdot \left( \frac{H}{10} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left\{ \beta'' - \frac{\ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right]}{\alpha'} \right\} \quad (2.6)$$

Onde:  $K_r$  é o coeficiente de rugosidade do terreno, apresentado na Tabela 2.1;  $K_d$  é a relação entre os valores médios de vento a 10 metros de altura do solo, relacionada na Figura 2.4;  $H$  é a altura do cabo sobre o solo (m);  $n$  é um coeficiente, que depende de  $K_r$  e do período de integração (que é o tempo correspondente à média das velocidades de vento), relacionado na Tabela 2.2;  $\alpha'$  é o estimador do fator de escala da distribuição de Gumbel  $(m/s)^{-1}$ , mostrado na Figura 2.5;  $\beta''$  é o estimador do fator de posição da distribuição de Gumbel, obtido da Figura 2.6;  $T$  é o período de retorno (anos), que é um intervalo aproximado entre ocorrências sucessivas de um mesmo evento durante um período de tempo muito longo.

Tabela 2.1 – Coeficientes ( $K_r$ ) de rugosidade do terreno [1]

Categoria do Terreno	Características do terreno atravessado pela LT	Coefficiente de rugosidade ( $K_r$ )
A	Vastas extensões de água; áreas planas costeiras; desertos planos	1,08
B	Terreno aberto com poucos obstáculos	1,00
C	Terreno com obstáculos numerosos e pequenos	0,85
D	Áreas urbanizadas; terrenos com muitas árvores altas	0,67

A Figura 2.4 apresenta a relação ( $K_d$ ) entre as velocidades médias do vento a 10 metros de altura, para diferentes categorias do terreno atravessado pela LT (apresentados na Tabela 2.1) e períodos de integração.

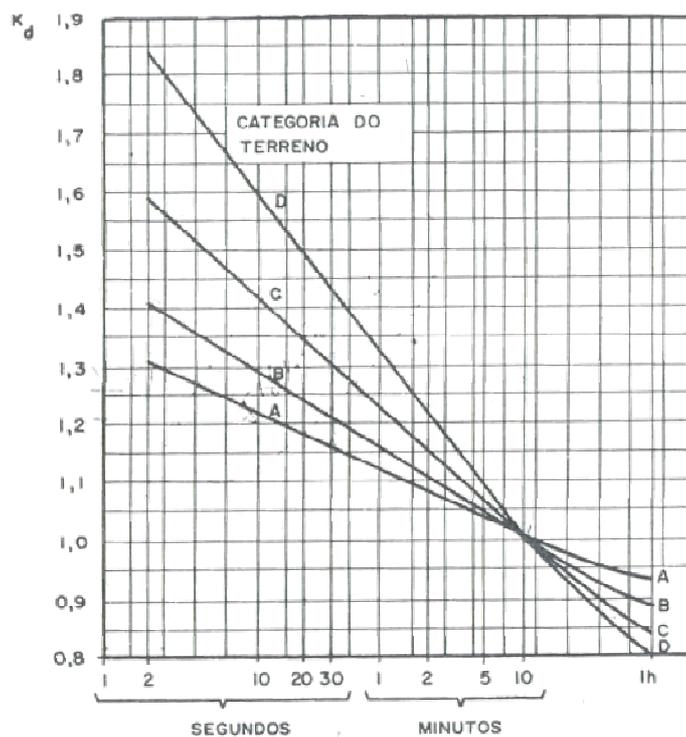


Figura 2.4 – Relação ( $K_d$ ) entre as velocidades médias a 10 metros de altura [1].

Os valores de “n”, do expoente da equação (2.6), são apresentados na Tabela 2.2, os quais dependem da categoria do terreno atravessado pela linha de transmissão e do período de integração.

Tabela 2.2 – Valores n para correção da velocidade de vento em função da altura [1]

Categoria do Terreno	n	
	Período de integração = 2 segundos	Período de integração = 30 segundos
A	13	12
B	12	11
C	10	9,5
D	8,5	8

As Figuras 2.5 e 2.6 apresentam os estimadores dos fatores de escala e de distribuição  $\alpha'$  e  $\beta''$ , respectivamente, da distribuição de Gumbel, relacionados na expressão (2.6), os quais estão mapeados no sistema geográfico do Brasil.

A distribuição de Gumbel é aplicada em estudos de probabilidade, fornecendo informações sobre a possibilidade de um evento ocorrer novamente em um determinado período de tempo, que no nosso caso se enquadra no Brasil, conforme observado nas Figuras 2.5 e 2.6.

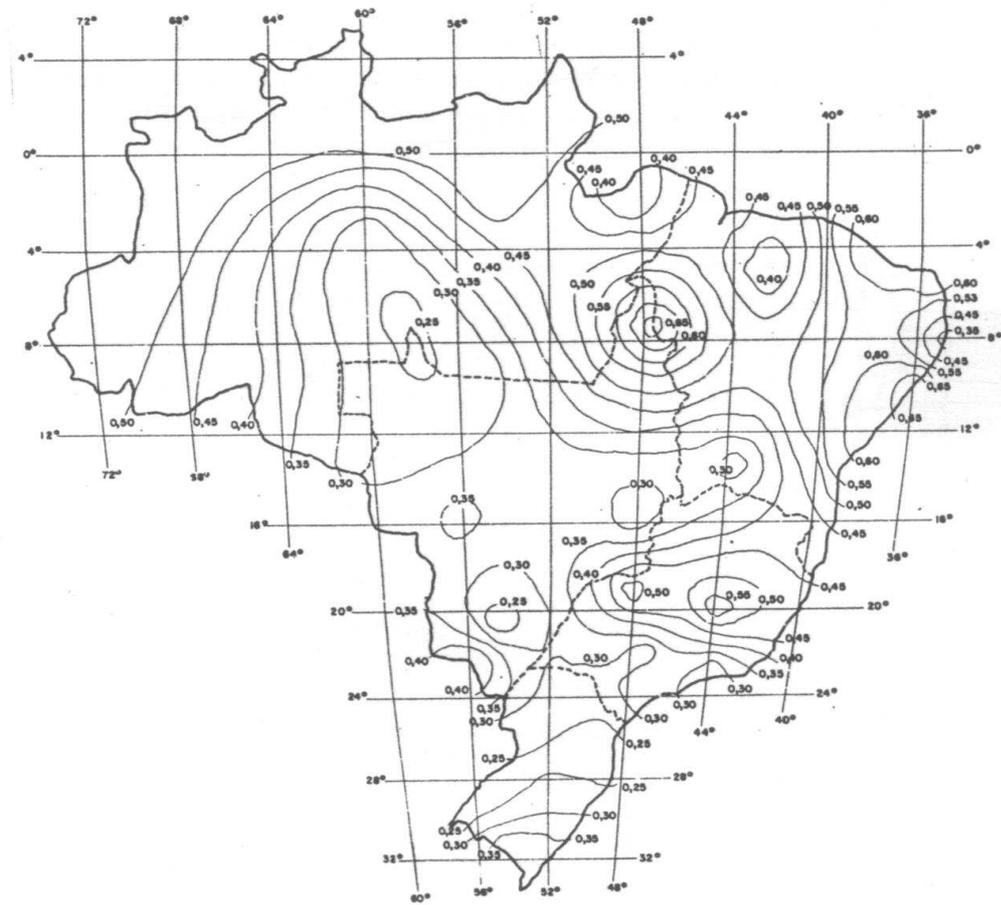


Figura 2.5 – Estimador ( $\alpha$ ) do fator de escala da distribuição de Gumbel [1].

A velocidade de vento pode ser corrigida para qualquer altura, a partir da seguinte expressão:

$$V_H = V_{10} \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.7)$$

Onde :  $V_H$  é a velocidade de vento para a altura  $H$ ;  $V_{10}$  é a velocidade de vento para 10 metros de altura.

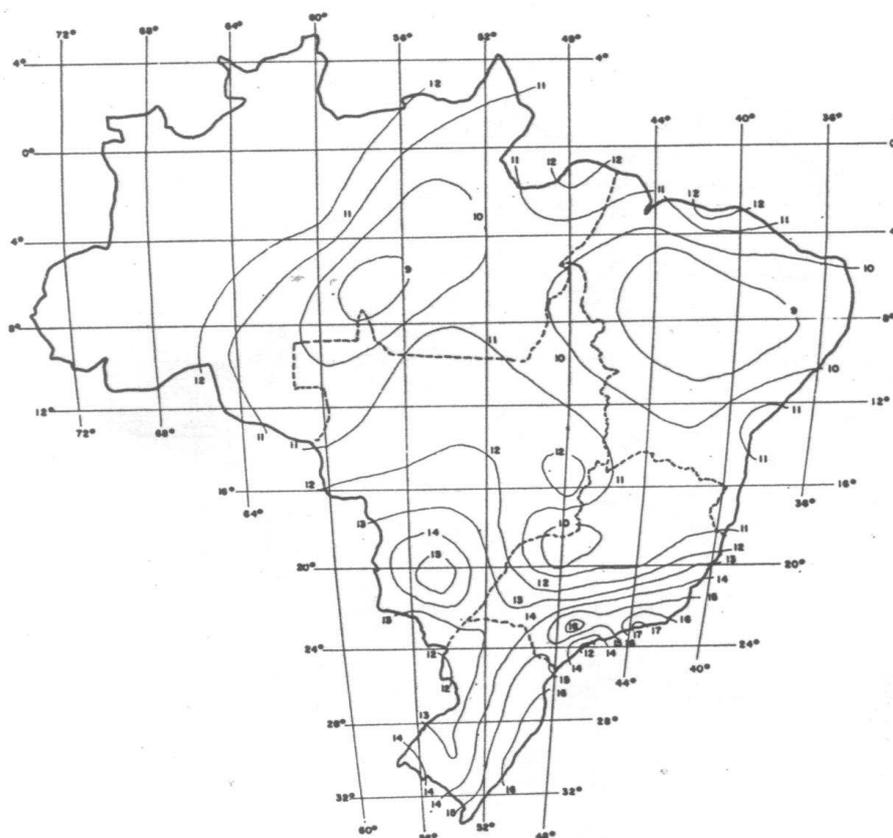
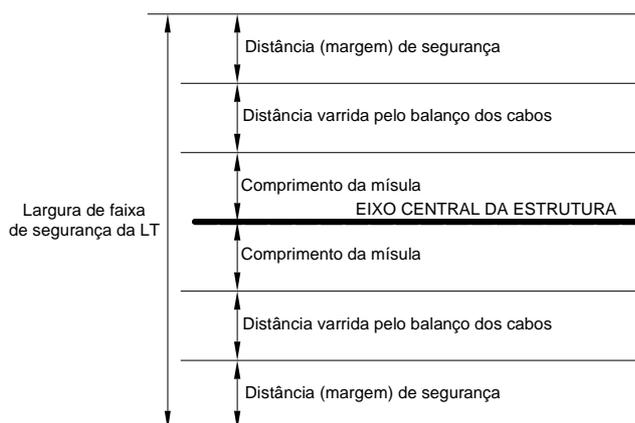


Figura 2.6 – Estimador ( $\beta$ ) do fator de posição da distribuição de Gumbel [1].

A Figura 2.7 mostra a representação da largura de faixa de segurança da linha, com uma perspectiva diferente daquela apresentada na Figura 2.1, onde se nota que o eixo central da estrutura deverá se localizar no centro da largura de faixa de segurança.



**Figura 2.7 – Representação da largura de faixa de segurança.**

A Figura 2.8 apresenta a tela de entrada da rotina de cálculo desenvolvida para se determinar a largura de faixa de segurança da linha de transmissão, exigida pelo balanço dos cabos condutores devido à ação do vento.

FAIXA DE SERVIÇÃO DE UMA LT DEVIDO AO BALANÇO DOS CABOS CONDUTORES					
<b>DADOS DE ENTRADA</b>					
<b>Dados da Linha</b>		<b>Dados do condutor</b>			
Tensão (kV)	Flecha (m)	Diâmetro (m)	Peso (N/m)		
138	13	0,01829	20,31		
<b>Dados da Estrutura</b>					
Comprimento da Cadeia (m)	Comprimento Braço da estrutura (m)	Altura (m)			
1,69	2,5	20			
<b>Dados geográficos/meteorológicos</b>					
Temperatura Coincidente (°C)	Altitude (m)	Período de Retorno (anos)	Relação do vão de peso e o vão de vento		
15	200	30	0,7		
<b>Constantes retiradas das tabelas da NBR 5422</b>					
$\alpha$	$\beta$	$K_r$	$K_d$	$k$	$n$
0,5	11	1	1,22	0,34	11
<b>DADOS DE SAÍDA</b>					
<b>Dados da Linha</b>					
H (m)	D1 (m)				
11,33	0,966				
<b>Meteorológicos/ambientais</b>					
$V_T$ (m/s)	$V_P$ (m/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$q_0$ (N/m <sup>2</sup> )		
17,77	21,93	1,20	287,71		
<b>Balanço dos cabos condutores</b>					
$\beta$ (Graus)	d (m)				
7,17	1,8				
<b>LARGURA DA FAIXA (m)</b>					
10,6					

<b>Legenda</b>
$\alpha$ : Parâmetro alfa da distribuição estatística de Gumbel (m/s) <sup>1</sup> . Figura 29 da NBR 5422
$\beta$ : Parâmetro beta da distribuição estatística de Gumbel (m/s). Figura 30 da NBR 5422
T: Período de retorno (anos)
Kr: Coeficiente de rugosidade do terreno. Tabela 1 da NBR5422
Kd: Coeficiente de integração. Figura 1 da NBR 5422
H: Altura média dos cabos condutores
n: Fator de correção da velocidade do vento em função da altura. Tabela 2 da NBR 5422
t: Temperatura Coincidente (°C)
alt: Altitude média de região (m)
k: Parâmetro para determinação do ângulo de balanço. Figura 7 da NBR 5422
p: peso unitário do condutor
Vp/Vv: Relação do vão de peso e o vão de vento
Lcad: Comprimento da cadeia de isoladores
fc: Flecha dos cabos condutores
b: Comprimento do braço da estrutura
D1: Distância de segurança
V <sub>T</sub> : Velocidade de vento para o período de retorno considerado
V <sub>P</sub> : Velocidade de vento de projeto para o período de retorno considerado
$\rho$ : Massa específica do ar
qo: Pressão dinâmica de referência
$\beta$ : Ângulo de balanço dos cabos condutores
d: Distância projetada pelo ângulo de balanço
L: Largura da faixa de servidão

**Figura 2.8 – Tela de entrada dos cálculos de balanço dos cabos condutores.**

## 2.2 CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO

A Figura 2.9 apresenta ilustrativamente a metodologia de cálculo do campo elétrico e consequentemente da largura de faixa de segurança devido a esse efeito eletromagnético. Nessa figura, têm-se três condutores fase “a”, “b” e “c”, dispostos horizontalmente, de diâmetro “d”, submetidos a uma determinada tensão “V” com ângulo “ $\Theta$ ” (considerado um sistema equilibrado, com as fases defasadas de 120° elétricos). Esses condutores estão no espaço, logo possuem coordenadas “x” e “y” (desconsiderada a coordenada “z”). A título de exemplificação, é mostrado o campo elétrico provocado apenas pelo condutor “a”. O condutor “a” provocará campo elétrico nas direções “x” e “y”,  $E_{1x}$  e  $E_{1y}$ , em um ponto de observação localizado no espaço, com coordenadas “ $x_1$ ” e “ $y_1$ ”, distanciado do condutor “a” em  $R_1$ . Caso esse ponto de observação seja distanciado do eixo da linha de transmissão (com uma distância

$R_n$ ), com uma nova posição no espaço  $x_n$  e  $y_n$ , os novos valores de campo elétrico serão  $E_{nx}$  e  $E_{ny}$ . A largura da faixa de segurança é determinada em um ponto localizado a partir do centro da estrutura onde se tem o nível de emissão do campo elétrico menor ou igual ao limite estabelecido para esse efeito eletromagnético.

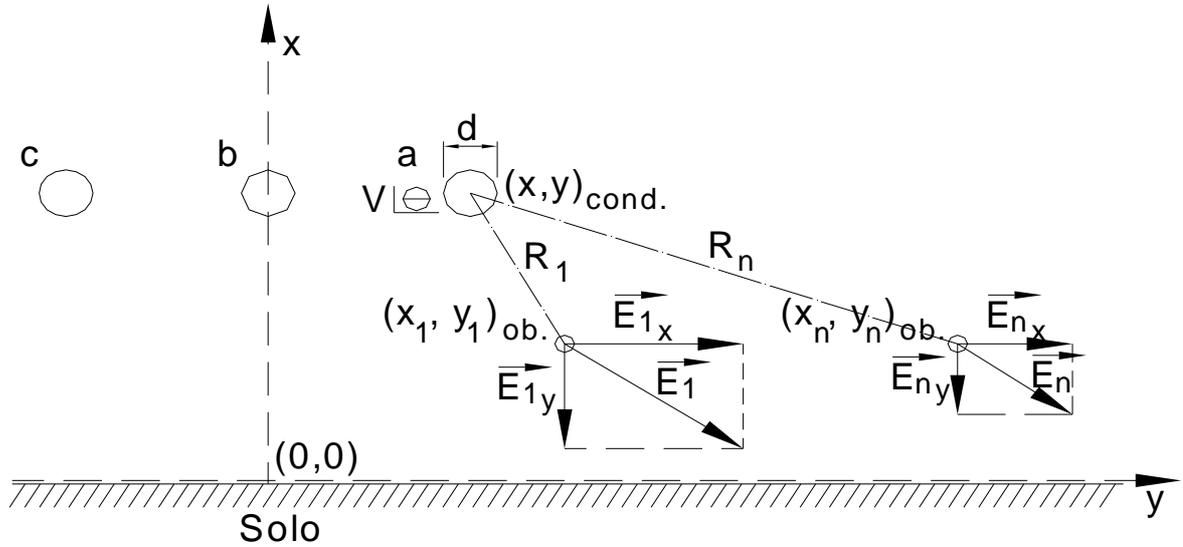


Figura 2.9 – Ilustração da metodologia de cálculo do campo elétrico.

O campo elétrico gerado pelos cabos condutores de uma linha de transmissão pode ser determinado a partir do vetor carga elétrica superficial dos condutores [11]:

$$[Q] = [P]^{-1} [V], \quad (2.8)$$

onde:  $[V]$  é a matriz da tensão de operação da LT;  $[P]^{-1}$  é a matriz de Potencial de Maxwell.

O Potencial de Maxwell pode ser determinado por:

$$P_{aa} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{4y_a}{d_a}\right), \quad (2.9)$$

$$P_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left[\frac{(x_a - x_b)^2 + (y_a + y_b)^2}{(x_a + x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}\right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.10)$$

sendo:  $P_{aa}$  o Potencial de Maxwell do próprio condutor;  $P_{ab}$  o Potencial de Maxwell entre os condutores;  $\varepsilon$  a permissividade elétrica;  $y_a$  e  $y_b$  as alturas dos condutores;  $d_a$  o diâmetro do condutor e  $x_a$  e  $x_b$  as coordenadas horizontais dos condutores no eixo x.

Em caso de utilização de mais de um condutor por fase, deverá ser considerado o diâmetro equivalente do feixe de subcondutores:

$$d_{\text{equivalente}} = d_a = D \sqrt[n]{\frac{n \cdot d}{D}} \quad (2.11)$$

Onde:  $D$  é o diâmetro do feixe de subcondutores;  $n$  é o número de subcondutores (número de condutores por fase) e  $d$  o diâmetro dos subcondutores.

Após determinadas as matrizes, chega-se ao valor do campo elétrico nas direções x e y, que é representado pela soma vetorial dos componentes:

$$\vec{E}_a = E_{x,a} \vec{u}_x + E_{y,a} \vec{u}_y, \quad (2.12)$$

em que  $\vec{u}_x$  e  $\vec{u}_y$  são os vetores unitários e  $E_{x,a}$  e  $E_{y,a}$  são expressos por:

$$E_{x,a} = \frac{(q_{ra} + jq_{ia})(x_N - x_a)}{2\pi\varepsilon[(x_a - x_N)^2 + (y_a - y_N)^2]} - \frac{(q_{ra} + jq_{ia})(x_N - x_a)}{2\pi\varepsilon[(x_a - x_N)^2 + (y_a + y_N)^2]} \quad (2.13)$$

$$E_{y,a} = \frac{(q_{ra} + jq_{ia})(y_N - y_a)}{2\pi\varepsilon[(x_a - x_N)^2 + (y_a - y_N)^2]} - \frac{(q_{ra} + jq_{ia})(y_N + y_a)}{2\pi\varepsilon[(x_a - x_N)^2 + (y_a + y_N)^2]} \quad (2.14)$$

Então, o módulo do campo elétrico é determinado por:

$$|E| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (2.15)$$

A Norma NBR 5422 estabelece limite apenas para o campo elétrico, que deve ser de no máximo 5 kV/m, no limite da faixa, ao nível do solo. O campo elétrico, no limite da faixa de segurança, a 1 metro do nível do solo, deve ser menor ou igual a 4,2 kV/m, quando a LT estiver com uma tensão máxima de operação, conforme estabelecido pelo Submódulo 2.4 do

ONS. A Resolução ANEEL, por sua vez, explicita o limite de 4,17 kV/m a uma altura do nível do solo de 1,5 metro, no limite da faixa de segurança.

### 2.3 CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO

A metodologia de cálculo da intensidade de campo magnético ou densidade de fluxo magnético é semelhante a do campo elétrico, ilustrada na Figura 2.9, com uma diferença que para o cálculo do campo elétrico é necessário que os condutores estejam apenas energizados (submetidos a uma tensão) e para o campo magnético, esses condutores devem estar carregados (com uma determinada corrente circulando pelos cabos). Semelhantemente ao campo elétrico, é calculado o campo magnético em um ponto de observação localizado no espaço. A largura de faixa de segurança de uma linha de transmissão exigida pelo efeito do campo magnético é determinada em um ponto localizado a partir do centro da linha, quando se tem nesse ponto o valor de campo magnético menor ou igual que o limite informado a seguir.

O campo magnético gerado pelas linhas de transmissão é calculado através da equação abaixo [11]:

$$\vec{H}_{j,i} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \vec{\phi}_{i,j}, \quad (2.16)$$

onde:  $I_i$  é a corrente no condutor;  $r_{i,j}$  é a distância do condutor ao ponto de observação e  $\vec{\phi}_{i,j}$  é o vetor unitário na direção do produto do vetor corrente e o vetor segmento  $r_{i,j}$ .

O campo magnético é a soma de todas as contribuições de corrente da LT:

$$H_{x,a} = \frac{I_a}{2\pi} \left( -\frac{y_i - y_j}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \right), \quad (2.17)$$

$$H_{y,a} = \frac{I_a}{2\pi} \left( \frac{x_i - x_j}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \right). \quad (2.18)$$

Então, o módulo da intensidade de campo magnético é determinado por:

$$|H| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \quad (2.19)$$

A densidade de fluxo magnético (B) pode ser obtida por  $\vec{B} = \mu \vec{H}$ , com a utilização da permeabilidade magnética ( $\mu$ ) igual a  $4\pi 10^{-7}$  H/m (Henry/metro).

O campo magnético, a 1 metro do nível do solo, no limite da faixa de segurança, deve ser igual ou menor que 67 A/m, correspondente a uma indução magnética de 83  $\mu$ T, explicitado pelo submódulo 2.4 do ONS. Por sua vez, a Resolução ANEEL explicita o limite de 83,33 $\mu$ T a uma altura do nível do solo de 1,5 metro, no limite da faixa de segurança.

## 2.4 CÁLCULO DO RUÍDO AUDÍVEL

O ruído audível, em uma linha de transmissão, é gerado quando o gradiente crítico disruptivo do ar é excedido pelo gradiente na superfície do condutor (proporcionado pela LT energizada).

A geração do ruído audível é determinada empiricamente, usualmente como uma função do gradiente da superfície do condutor e a propagação pode ser calculada usando os princípios de acústica [11]. A seguir é apresentada a metodologia de cálculo para o ruído audível.

O ruído audível é calculado como a pressão de som em torno do cabo condutor da linha de transmissão, seja quando o cabo estiver sob chuva ou molhado. As equações abaixo apresentam as expressões para o cálculo do ruído audível quando o cabo condutor se encontrar sob chuva forte [11].

Pressão de som no cabo, com uma quantidade de subcondutores menor que 3:

$$P_{\text{chuva}}(\text{dB}) = 20\log(n) + 44\log(d) - \frac{665}{E} + K_n + 75.2 - 10\log(R) - 0.02R \quad (2.20)$$

Pressão de som no cabo, com uma quantidade de subcondutores maior ou igual a 3:

$$P_{\text{chuva}}(\text{dB}) = 20\log(n) + 44\log(d) - \frac{665}{E} + \left[ 22.9(n-1)\frac{d}{D} \right] + 67.9 - 10\log(R) - 0.02R \quad (2.21)$$

onde:  $n$  é o número de subcondutores;  $d$  é o diâmetro do subcondutor (cm);  $E$  é o gradiente na superfície do condutor (kV/cm);  $K_n = 7.5$  para  $n = 1$ ,  $K_n = 2.6$  para  $n = 2$ ,  $K_n = 0$  para  $n \geq 3$ ;  $D$  é o diâmetro do feixe de subcondutores (cm) e  $R$  é a distância (m) da LT ao ponto de observação.

O gradiente na superfície do condutor ( $E$ ) pode ser determinado por:

$$E = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r} \quad (2.22)$$

Onde:  $Q$  é a densidade de carga obtida através do módulo de (2.8);  $\epsilon$  é a permissividade elétrica e  $r$  é o raio do subcondutor.

O nível de ruído audível para o condutor molhado é calculado através da soma de  $P_{\text{chuva}}$ , com a correção do gradiente para 6 dB, apresentado abaixo.

Correção do gradiente, com uma quantidade de subcondutores menor que 3:

$$C_{\text{molhado}} = 8,2 - \frac{340,8}{E \cdot d^{0.24}}, \quad (2.23)$$

Correção do gradiente, com uma quantidade de subcondutores maior ou igual a 3:

$$C_{\text{molhado}} = 10,4 - \frac{340,8}{E \cdot d^{0.24}} + \left[ 8(n-1)\frac{d}{D} \right], \quad (2.24)$$

sendo:  $d$  o diâmetro do subcondutor (cm);  $E$  o gradiente na superfície do condutor (kV/cm);  $n$  o número de subcondutores e  $D$  o diâmetro do feixe de subcondutores (cm).

Em suma, o ruído audível para o condutor molhado é determinado pela adição da pressão de som no cabo ( $P_{\text{chuva}}$ ) com a correção do gradiente ( $C_{\text{molhado}}$ ).

Cada condutor é considerado uma fonte separada, portanto a pressão de som para o sistema constituído de múltiplos condutores é dada pela soma da contribuição individual de cada condutor, conforme expressão (2.25):

$$P_{\text{Total}} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{P_i}{10}} \quad (2.25)$$

O Submódulo 2.4 dos procedimentos de rede do ONS estabelece que o ruído audível gerado por uma LT na sua tensão de operação, em um ponto localizado a 1 metro do nível do solo, no limite da faixa de segurança, não deve exceder 58 dBA, quando a LT estiver energizada sob as condições de: chuva fina (<0,00148 mm/min) ou névoa de 4 horas de duração ou durante 15 minutos após a ocorrência de chuva, onde o condutor se encontra molhado.

## 2.5 CÁLCULO DA RÁDIO INTERFERÊNCIA

A rádio interferência é provocada pelas perturbações de rádio frequência na recepção de um sinal desejado, em suma, os campos eletromagnéticos gerados pelas linhas de transmissão podem afetar a recepção do sinal de algum sistema, dispositivo ou equipamento, sendo este eletroeletrônico.

A literatura hoje existente proporciona uma vasta quantidade de trabalhos publicados sobre a metodologia de cálculo para se determinar a rádio interferência. Uma das referências deste trabalho [12] apresenta 10 métodos de cálculo, de diversos autores, abordando diferenças entre eles, bem como a comparação dos mesmos com medições de rádio interferência realizadas.

Este trabalho utiliza-se da metodologia de cálculo da WEC – *Westinghouse Electric Corporation* [12], dos Estados Unidos. A WEC, ao longo de vários anos, desenvolveu a sua metodologia de cálculo em função de resultados de teste em laboratório, em experiências de projetos e medições realizadas em linhas existentes, logo, baseia-se em relações empíricas, o que proporciona vantagens em comparação às técnicas puramente teóricas, o que se fez escolher essa metodologia para se determinar a rádio interferência.

A seguir é apresentada a expressão de cálculo da rádio interferência, baseada na força tarefa do CIGRE/IEEE de comparação de modelos de determinação de RI [12]:

$$RI = 48 + 3.5(E - 17.5) + 30 \log \frac{d}{3.51} + 20 \log \frac{30.7h}{R^2} + 10(1 - f) \quad (2.26)$$

Onde:  $E$  é o gradiente máximo (kVrms/cm), determinado por (2.22);  $d$  é o diâmetro do condutor (cm);  $R$  é a distância do condutor ao ponto de observação (m);  $h$  é a altura do cabo (m) e  $f$  é a frequência (MHz).

Essa expressão é utilizada para uma distância lateral, a partir do eixo central da linha, de até 60 metros. Essa distância não é alcançada no presente trabalho, pois demandaria uma largura de faixa de segurança de 120 metros (ressalta-se que a maior largura de faixa de segurança, praticada pelas concessionárias, é de 50 metros para uma linha de transmissão de 345 kV). Logo, essa expressão é válida para a finalidade do presente trabalho, que é verificar o perfil lateral dos campos eletromagnéticos gerados pelas linhas de transmissão de 138, 230 e 345 kV e analisar a influência de alguns parâmetros na largura de faixa de segurança.

De acordo com os procedimentos de rede do ONS (Submódulo 2.4), a LT energizada com uma tensão de operação máxima deve apresentar uma relação de sinal/ruído, a 1 metro de altura do solo, no limite da faixa de segurança, de no mínimo 24 dB, em 50% do período de 1 ano. Neste trabalho é considerado um sinal mínimo de 66 dB, correspondendo a um ruído máximo de 42 dB ( $NP_i = 66 - 24 = 42$  dB).

As expressões para se determinar os campos elétrico e magnético, o ruído audível e a rádio interferência, apresentadas neste capítulo, foram implementadas utilizando-se o programa computacional Matlab, versão 2007, com o objetivo de se analisar o perfil lateral dos efeitos eletromagnéticos e a largura de faixa necessária para os dados do sistema em estudo, mostrados a seguir.

## **2.6 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SISTEMAS EM ESTUDO**

Neste trabalho foi realizado um estudo visando a análise de sensibilidade de diferentes parâmetros de linhas de transmissão de 138, 230 e 345 kV, quando se tem variação da altura da estrutura, do tipo do cabo condutor, da relação do vão de peso e vão de vento, do comprimento da mísula, da disposição dos cabos condutores, do tipo de LT (convencional e compacta), do número de circuitos, do número de condutores por fase e da flecha, na determinação da largura de faixa de segurança. A Tabela 2.3 apresenta os valores dos parâmetros analisados.

Os valores apresentados na Tabela 2.3 foram baseados em parâmetros típicos (ou o mais próximo possível) de linhas de transmissão brasileiras. Caso algum dado não seja condizente com a realizada de linhas, como exemplo a utilização de 3 condutores por fase em LTs de 138 kV (o que proporciona elevada quantidade de ferragens para fabricação de estruturas metálicas e autoportantes, elevando o custo da linha), estas informações foram utilizadas a título de análise do comportamento deste parâmetro na determinação da largura de faixa de segurança.

A linha de transmissão de 345 kV não apresenta condição de simulação para 1 condutor por fase, devido aos elevados níveis de emissão dos efeitos eletromagnéticos (em especial o ruído audível e a rádio interferência) exigidos por esse número de condutores por fase e pelo fato de não haver linhas com tensão maior ou igual a 345 kV com essa configuração.

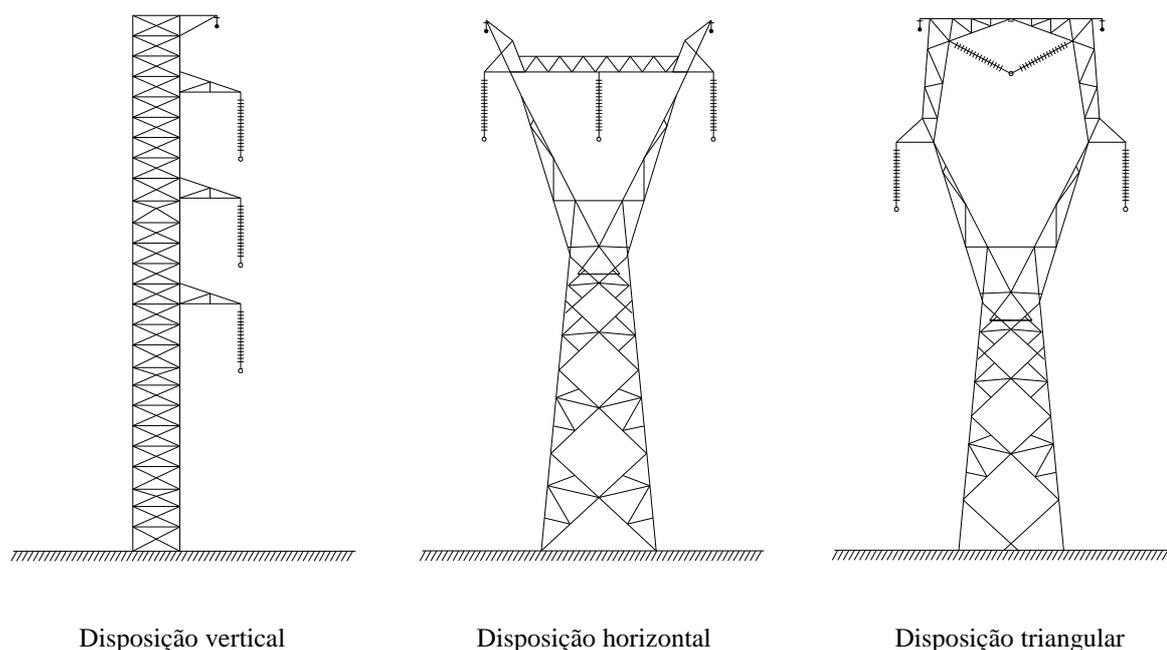
**Tabela 2.3 – Condições de simulação**

Descrição	Valor considerado		
	LT 138 kV	LT 230 kV	LT 345 kV
Altura da estrutura	15m	20m	25m
	<b>20m (*)</b>	<b>25m (*)</b>	<b>30m (*)</b>
	25m	30m	35m
Tipo do cabo condutor	Penguin - 4/0	<b>Grosbeak - 636MCM (*)</b>	<b>Rail - 954MCM (*)</b>
	<b>Linnnet - 336 MCM (*)</b>	Tern - 795MCM	Bluejay – 1113 MCM
	Grosbeak - 636MCM	Rail - 954MCM	Falcon – 1590 MCM
Relação Vão de Peso e Vão de Vento	0,5	0,5	0,5
	<b>0,7 (*)</b>	<b>0,7 (*)</b>	<b>0,7 (*)</b>
	0,9	0,9	0,9
Comprimento da mísula	1,5m	3m	5m
	<b>2,5m (*)</b>	<b>4m (*)</b>	<b>6m (*)</b>
	3,5m	5m	7m
Disposição dos cabos	Vertical	Vertical	Vertical
	<b>Horizontal (*)</b>	<b>Horizontal (*)</b>	<b>Horizontal (*)</b>
	Triangular	Triangular	Triangular
Tipo da LT	<b>Convencional (*)</b>	<b>Convencional (*)</b>	<b>Convencional (*)</b>
	Compacta	Compacta	Compacta
Número de circuitos	<b>1 – Circuito Simples (*)</b>	<b>1 – Circuito Simples (*)</b>	<b>1 – Circuito Simples (*)</b>
	2 – Circuito Duplo	2 – Circuito Duplo	2 – Circuito Duplo
Número de condutores por fase	<b>1 (*)</b>	<b>1 (*)</b>	<b>2 (*)</b>
	2	2	3
	3	3	4
Flecha	10,0m	15,0m	19,0m
	<b>13,0m (*)</b>	<b>18,0 m(*)</b>	<b>22,0m (*)</b>
	16,0m	21,0m	25,0m

(\*) Caso Base (valores em itálico)

Os dados utilizados para o cálculo do balanço dos cabos condutores foram tomados de uma linha de transmissão hipotética e consideram a velocidade de vento de 10 minutos, com um período de retorno de 30 anos e uma altitude média da região de implantação da LT de 200 metros.

A Figura 2.10 mostra as disposições vertical, horizontal e triangular dos cabos condutores, na estrutura, para os casos base apresentados na Tabela 2.3.



**Figura 2.10 – Disposições dos cabos condutores nas estruturas do caso base.**

Observa-se que os valores de flecha de 16, 21 e 25 metros utilizados para as LTs 138, 230 e 345 kV, respectivamente, apresentados na Tabela 2.3, excedem os limites de distância mínima cabo-solo de segurança, para as alturas consideradas das estruturas, mostrados na Tabela 2.4. Esta dissertação analisa esses valores de flecha, uma vez que, em algumas situações, há construção de moradias irregulares nas proximidades da LT.

A Tabela 2.4 apresenta as distâncias de segurança cabo-solo, estabelecidas pela Norma NBR 5422, para uma LT convencional, atravessada por local onde circulam máquinas agrícolas, e as flechas e os vãos típicos, utilizados nas análises deste trabalho.

**Tabela 2.4 - Valores de flechas e vãos típicos de LTs convencionais**

Nível de tensão (kV)	Altura da estrutura (m)	Distância cabo-solo (m)	Flecha (m)	Vão (m)
138	20,0	6,8	13,2	350,0
230	25,0	7,3	17,7	450,0
345	30,0	8,0	22,0	550,0

As LTs compactas, as quais são normalmente instaladas em locais onde se tem restrição de espaço para implantação das mesmas, possuem apenas flechas e vãos reduzidos, conforme prática comum de algumas projetistas de linha, logo este trabalho não considera a aplicação de estruturas e cabos especiais para esse tipo de LT. A Tabela 2.5 apresenta as informações que serão utilizadas nos processamentos de uma LT compacta.

**Tabela 2.5 - Valores de flechas e vãos típicos de LTs compactas**

Nível de tensão (kV)	Altura da estrutura (m)	Distância cabo-solo (m)	Flecha (m)	Vão (m)
138	20,0	14,0	6,0	250,0
230	25,0	17,0	8,0	300,0
345	30,0	18,0	12,0	350,0

As correntes nominais das LTs de 138, 230 e 345 kV são de 227, 370 e 915 amperes, respectivamente, correspondentes às suas potências naturais de 54, 147 e 545 MW. A altura de observação para os efeitos eletromagnéticos é de 1,5 metros acima do nível do solo, conforme diretrizes da resolução da ANEEL, para obtenção dos níveis de emissão desses efeitos.

Os limites dos efeitos eletromagnéticos utilizados neste trabalho, para se determinar as larguras de faixa de segurança das LTs, são os estabelecidos pelo ONS (Submódulo 2.4), descritos no item 2, face aos seus menores valores e este órgão apresentar limites para todos os efeitos (campo elétrico, campo magnético, ruído audível e rádio interferência).

Os cabos condutores das linhas de transmissão implantadas ou projetadas em regiões planas apresentam distância mínima cabo-solo no meio do vão, e a maior distância cabo solo é observada na estrutura, onde são suportados os cabos. Já a altura média dos cabos condutores é determinada pela relação da altura do cabo na estrutura e da flecha do cabo. Apresentam-se, a seguir, as equações para se determinar as alturas mínima e média dos cabos de uma LT.

$$\text{Altura mínima do cabo} = \text{Altura do cabo na estrutura} - \text{Flecha} \quad (2.27)$$

$$\text{Altura média do cabo} = \text{Altura do cabo na estrutura} - \frac{2}{3} \times \text{Flecha} \quad (2.28)$$

Os resultados da largura de faixa de segurança da LT, considerando os efeitos eletromagnéticos e o balanço dos cabos condutores, foram obtidos para a altura mínima do cabo condutor, onde se tem a condição mais crítica, uma vez que o cabo condutor está mais próximo do ponto de observação. Um procedimento também aplicável na determinação da largura de faixa de segurança é a utilização do cabo condutor a uma altura média. O item 3.4.1 desta dissertação apresenta as diferenças dos perfis laterais dos efeitos eletromagnéticos proporcionados por uma linha de transmissão de 345 kV, quando se considera o cabo condutor a uma altura média ou mínima.

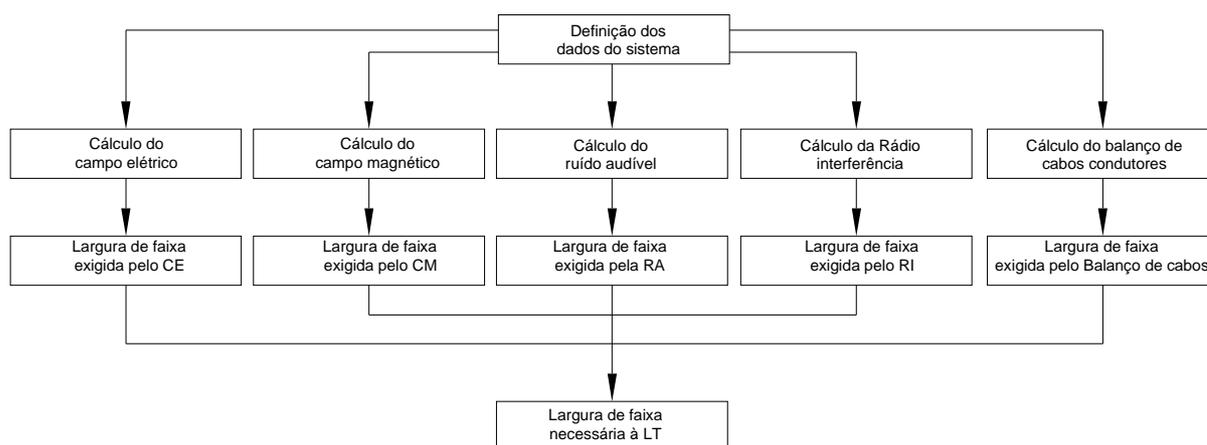
A análise realizada da influência do número de condutores por fase, na determinação da largura de faixa de segurança, considera o espaçamento de 46 centímetros entre o feixe de subcondutores, independente do nível de tensão da linha de transmissão considerado. Para a análise da influência dos tipos de LT (convencional e compacta) foram utilizados cabos comuns, típicos dessas linhas de transmissão.

Os dados e informações, em fase de projeto, utilizados nesta dissertação para se determinar a largura de faixa de segurança de uma linha de transmissão, são próximos dos valores reais, quando se tem a linha construída e energizada. As diferenças dessas informações poderão ser pelos seguintes fatores: 1 - quando a linha se encontra construída é possível se medir os desníveis de cada vão da linha (utilizando o aparelho Teodolito, por exemplo), mas quando a linha se encontra em fase de projeto, são utilizados os desenhos de perfil e planta da LT (processado em grande maioria com a utilização do programa computacional PLSCADD); 2 - nos cálculos, é assumida uma superfície plana em toda a extensão da LT (não é analisada a largura de faixa de segurança da LT, considerando vão por

vão); 3 - os valores de corrente e tensão utilizados nos cálculos são os nominais, uma vez que a LT encontra-se em fase de projeto e não se tem esses valores reais.

De posse das expressões para se calcular o balanço dos cabos condutores e os efeitos eletromagnéticos gerados pela linha de transmissão, e dos parâmetros a serem analisados, apresentados nos dados do sistema em estudo (Tabela 2.3), chegou-se aos resultados mostrados no Capítulo 3.

A Figura 2.11 apresenta o fluxograma do programa desenvolvido para se determinar a largura de faixa de segurança de uma linha de transmissão. O primeiro passo é a definição dos dados do sistema em estudo (tensão, corrente, altura da estrutura, comprimento de mísula, tipo de cabo condutor, flecha dos cabos etc, conforme apresentados no item 2.6). De posse desses dados, calcula-se o campo elétrico, o campo magnético, o ruído audível, a rádio interferência e o balanço dos cabos. Com os cálculos realizados, chegam-se às larguras de faixa de segurança, para cada efeito eletromagnético e pelo balanço do cabo condutor. E por último, define-se a largura de faixa de segurança necessária à LT, através da adoção da maior largura de faixa obtida isoladamente.



**Figura 2.11 – Fluxograma da determinação da largura de faixa de segurança.**

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Este capítulo é destinado à apresentação e análise dos resultados do perfil lateral dos efeitos eletromagnéticos gerados pelas linhas de transmissão e da largura de faixa de segurança, exigida por esses efeitos e pelo balanço dos cabos condutores. Ele está dividido em quatro partes: o item 3.1 apresenta os resultados dos perfis laterais dos efeitos eletromagnéticos das linhas de transmissão (caso base) de 138, 230 e 345 kV; o item 3.2 apresenta o resultado do gradiente máximo na superfície dos condutores, para o caso base das linhas analisadas neste trabalho; o item 3.3 apresenta os resultados das larguras de faixa de segurança para os 3 níveis de tensão considerados e para os parâmetros da Tabela 2.3; por fim, o item 3.4 apresenta um estudo comparativo dos perfis laterais dos efeitos eletromagnéticos, considerando parâmetros diferentes daqueles do caso base, a fim de proporcionar uma melhor análise de alguns resultados da largura de faixa de segurança que se mostraram atípicos.

#### **3.1 PERFIL LATERAL DOS EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS - CASO BASE**

As Figuras 3.1 a 3.4 apresentam o perfil lateral dos campos elétrico e magnético, do ruído audível (condutor sob chuva forte) e da rádio interferência, para as LTs de 138, 230 e 345 kV, do caso base apresentado na Tabela 2.3, considerando o cabo a uma altura mínima do solo. Nota-se nessas figuras que as larguras de faixa de segurança das LTs 138, 230 e 345 kV são de aproximadamente 20, 46 e 44 metros, respectivamente, exigidas pela rádio interferência. A LT de 345 kV apresenta uma menor largura de faixa de segurança em relação à LT de 230 kV, devido aquela LT possuir 2 condutores por fase. Pode-se observar que tais larguras de faixa são diferentes daquelas apresentadas na Tabela 1.1, normalmente utilizadas

pelas concessionárias de energia elétrica: 10 a 30 metros para 138 kV, 29 a 35 metros para 230 kV e 50 metros para 345 kV.

A Figura 3.1 apresenta o perfil lateral do campo elétrico para as LTs de 138, 230 e 345 kV do caso base, considerando os cabos condutores a uma distância mínima do solo. Observa-se que este efeito exige uma largura mínima de faixa de segurança apenas para a LT 345 kV, uma vez que, para as demais LTs, o limite estabelecido pelos procedimentos de rede do ONS não foi excedido.

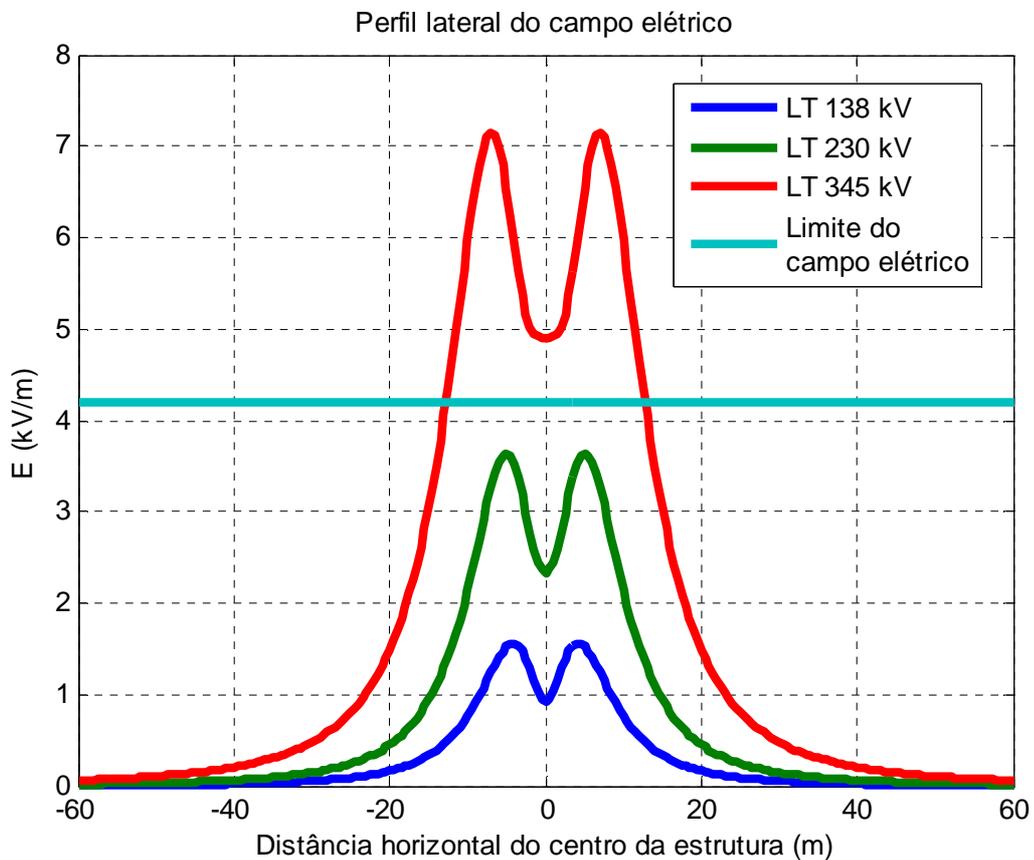
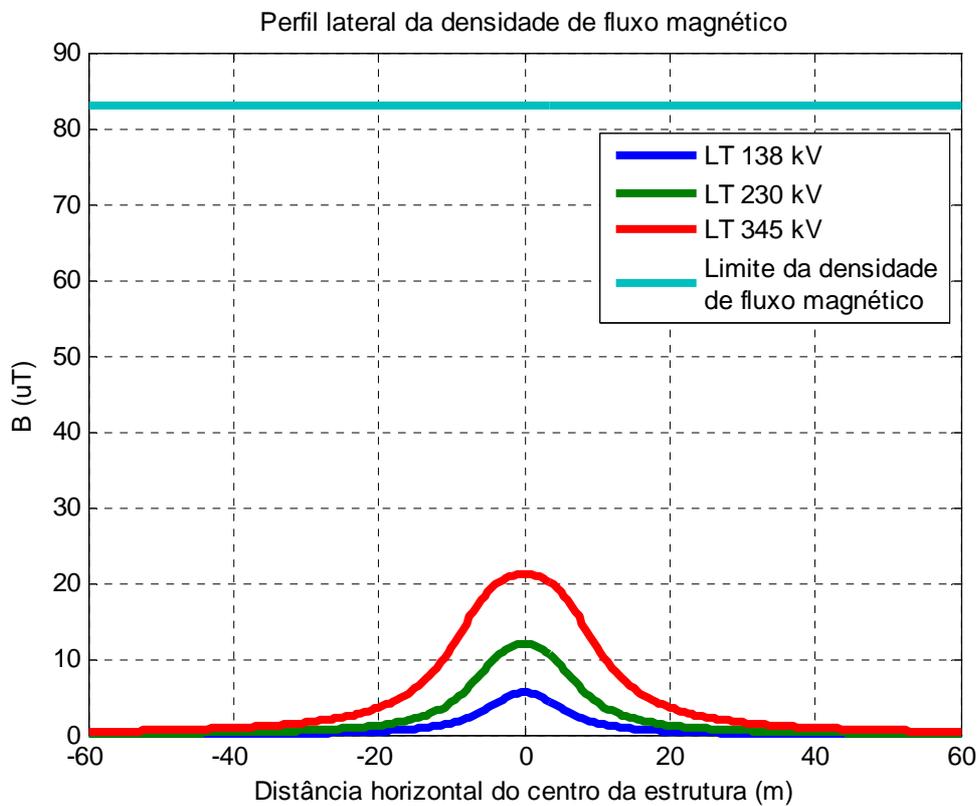


Figura 3.1 - Perfil lateral do campo elétrico das LTs de 138, 230 e 345 kV, do caso base, para o cabo com altura mínima.

A Figura 3.2 apresenta o perfil lateral do campo magnético gerado pelas LTs de 138, 230 e 345 kV, do cabo base, com os cabos condutores a uma altura mínima do solo. Como se

vê, o limite de campo magnético não é excedido para nenhum dos três níveis de tensão. Sendo assim, esse critério não será determinante na largura de faixa de segurança para essas LTs.

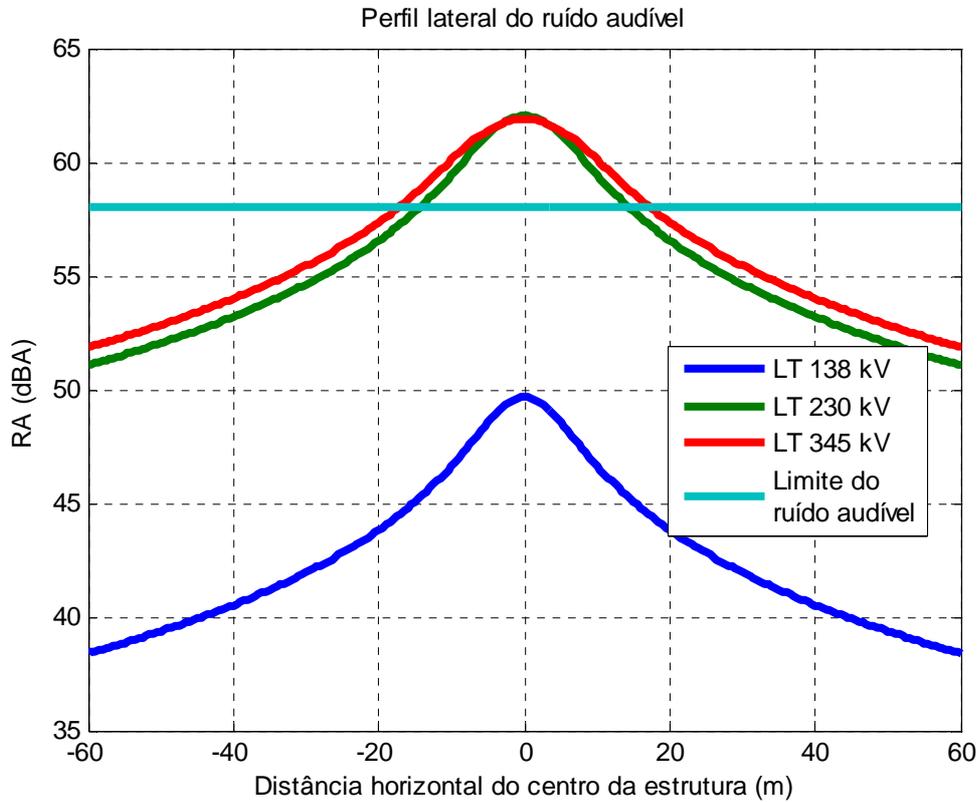
Após uma análise de sensibilidade, verificou-se que, para se atingir o limite da intensidade de campo magnético, a corrente do cabo condutor, para qualquer nível de tensão, deveria ser da ordem de 2800 amperes (valor muito superior àqueles correspondentes às correntes nominais de 227, 370 e 915 amperes considerados para as LTs de 138, 230 e 345 kV, respectivas às suas potências naturais de 54, 147 e 545 MW).



**Figura 3.2 - Perfil lateral do campo magnético das LTs de 138, 230 e 345 kV, do caso base, para o cabo com altura mínima.**

O perfil lateral do ruído audível, para as LTs de 138, 230 e 345 kV, com os cabos condutores a uma distância mínima do solo, do caso base, é apresentado na Figura 3.3. Como pode ser observado, este efeito eletromagnético exige uma largura de faixa de segurança de

aproximadamente 34 e 38 metros, para as LTs de 230 e 345 kV, respectivamente. Já para a LT de 138 kV esse efeito eletromagnético não é excedido.



**Figura 3.3 - Perfil lateral do ruído audível das LTs de 138, 230 e 345 kV, do caso base, para o cabo com altura mínima.**

A Figura 3.4 apresenta o perfil lateral da rádio interferência para o caso base das LTs 138, 230 e 345 kV analisadas neste trabalho, considerando os cabos condutores a uma distância mínima do solo. Como se vê, a LT de 138 kV exige uma largura de faixa de 20 metros, aumentando para aproximadamente 46 e 44 metros, para as LTs de 230 e 345 kV, respectivamente. Ressalta-se que no caso base da LT 345 kV considera-se 2 condutores por fase, motivo pelo qual esse nível de tensão proporciona uma menor largura de faixa de segurança que a LT de 230 kV.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3, observa-se que a LT de 138 kV não apresenta níveis de campo elétrico, de campo magnético, nem de ruído audível,

que excedem os limites estabelecidos. Já a rádio interferência, apresentada na Figura 3.4, excede esses limites e impõe restrições na largura de faixa para os três níveis de tensão.

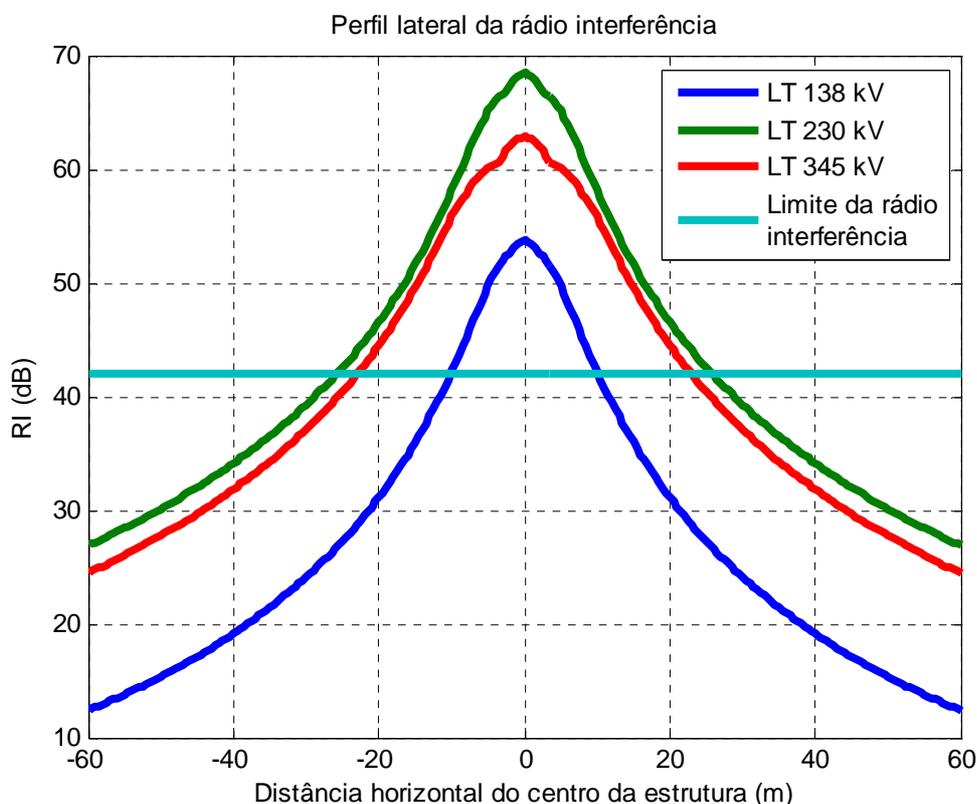


Figura 3.4 - Perfil lateral da rádio interferência das LTs de 138, 230 e 345 kV, do caso base, para o cabo com altura mínima.

### 3.2 GRADIENTE NA SUPERFÍCIE DOS CONDUTORES

A Tabela 3.1 apresenta o resultado do gradiente máximo na superfície dos condutores, para o caso base apresentado na Tabela 2.3, para os três níveis de tensão das linhas de transmissão analisados neste trabalho.

A utilização de 2 condutores por fase na linha de transmissão de 345 kV proporciona um menor gradiente na superfície dos condutores que para uma LT de 230 kV, conforme observado na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Gradiente máximo na superfície dos condutores**

LT	Gradiente máximo na superfície dos condutores (kV/cm)
138 kV	16,71
230 kV	19,72
345 kV	17,96

### **3.3 LARGURA DE FAIXA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DA LT**

Este item apresenta o estudo da largura de faixa de segurança para as LTs 138, 230 e 345 kV, com os cabos condutores a uma altura mínima do solo, considerando variação da altura da estrutura, do tipo do cabo condutor, da relação de vão de peso e vão de vento, do comprimento da mísula, da disposição dos cabos condutores, do tipo de LT (convencional x compacta), do número de circuitos (circuito x duplo), do número de condutores por fase e da flecha do cabo condutor, relacionados na Tabela 2.3. A análise da influência para cada parâmetro da LT, na largura de faixa de segurança, é realizada nos itens 3.3.1 ao 3.3.9, considerando os efeitos do campo elétrico (CE), do campo magnético (CM), do ruído audível (RA), da rádio interferência (RI) e do balanço de cabos condutores.

#### **3.3.1 VARIAÇÃO DA ALTURA DA ESTRUTURA**

A Figura 3.5 apresenta o resultado da largura de faixa de segurança de uma LT 138 kV com estrutura de 15, 20 e 25 metros de altura. Observa-se que apenas a rádio interferência e o balanço de cabo são fatores que restringem a largura de faixa. Os níveis de emissão dos campos elétrico e magnético e do ruído audível não alcançam os limites estabelecidos, fato pelo qual não aparecem no gráfico para nenhuma das alturas consideradas.

Observa-se que o aumento da altura da estrutura proporciona uma redução da largura de faixa de segurança, determinada pela rádio interferência, e um aumento da largura,

considerando o balanço do cabo condutor. Assim, a rádio interferência é o critério determinante da largura de faixa de segurança, para a LT 138 kV com estrutura de 15 ou 20 metros de altura, já para estruturas com 25 metros de altura, o balanço do cabo condutor é o fator mais relevante.

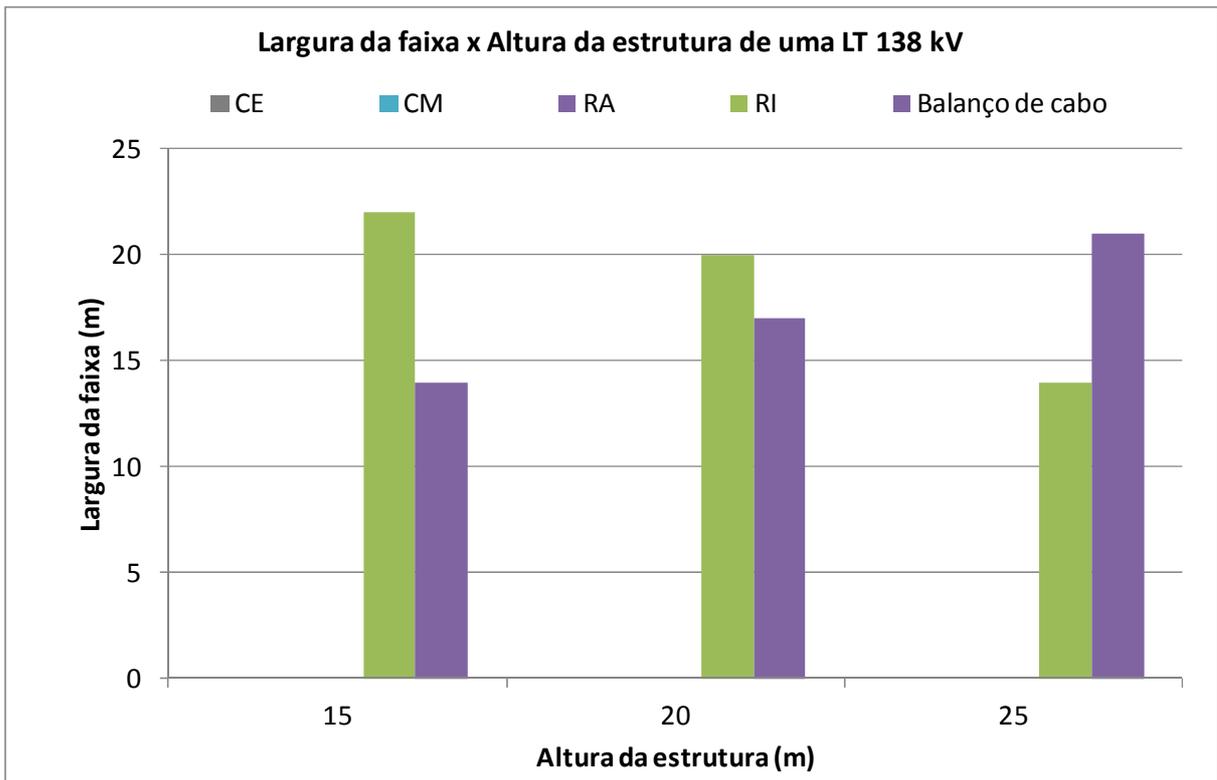


Figura 3.5 - Largura da faixa para diferentes alturas das estruturas, de uma LT 138 kV.

A largura de faixa de segurança para diferentes alturas da estrutura de uma LT de 230 kV é apresentada na Figura 3.6. Novamente, observa-se que a rádio interferência é o efeito determinante na largura de faixa de segurança para uma LT desse nível de tensão, para as três alturas consideradas. Semelhantemente à LT 138 kV, não há restrição devido aos efeitos dos campos elétrico e magnético para a LT de 230 kV.

Nota-se na Figura 3.6 que o aumento da altura da estrutura provoca aumento da largura da faixa de segurança exigida pela rádio interferência. Esse fato é inesperado até certo ponto,

uma vez que se espera a redução da largura de faixa na medida em que se aumenta a altura da estrutura, pois os cabos condutores estão mais distantes do ponto de observação. O item 3.4.2 apresenta a explicação desse fato.

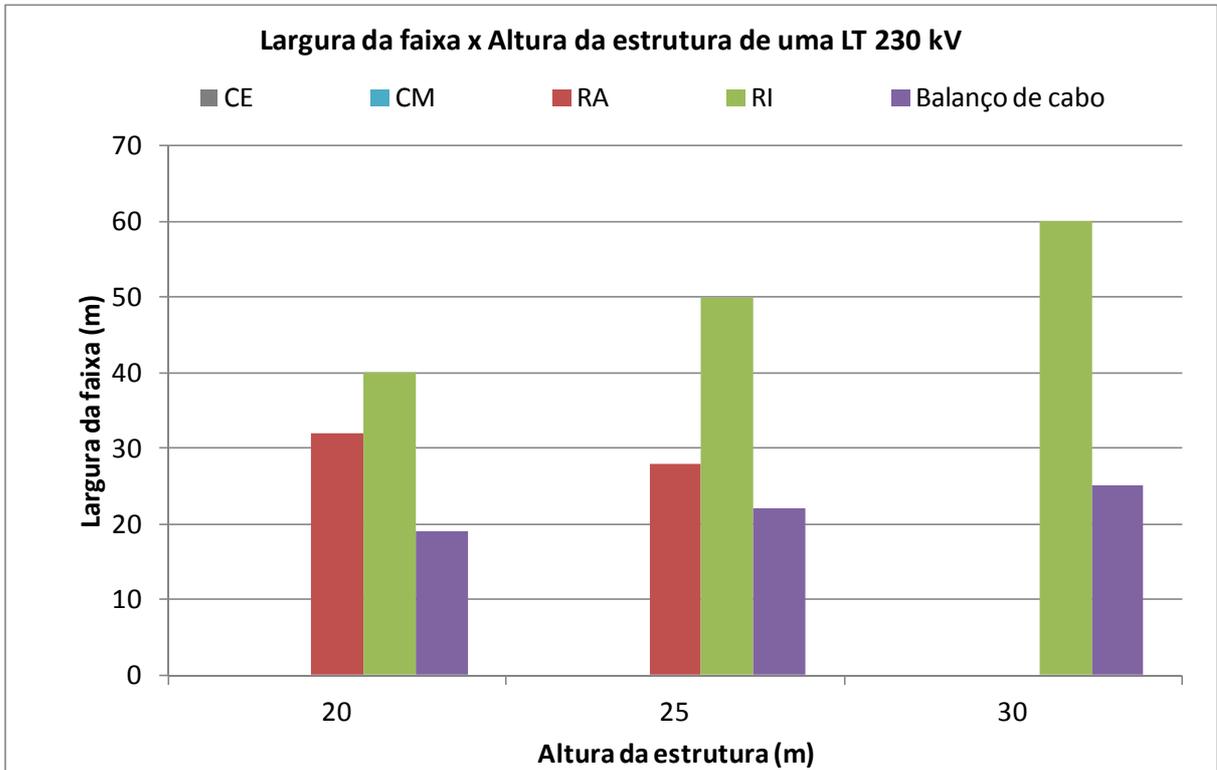
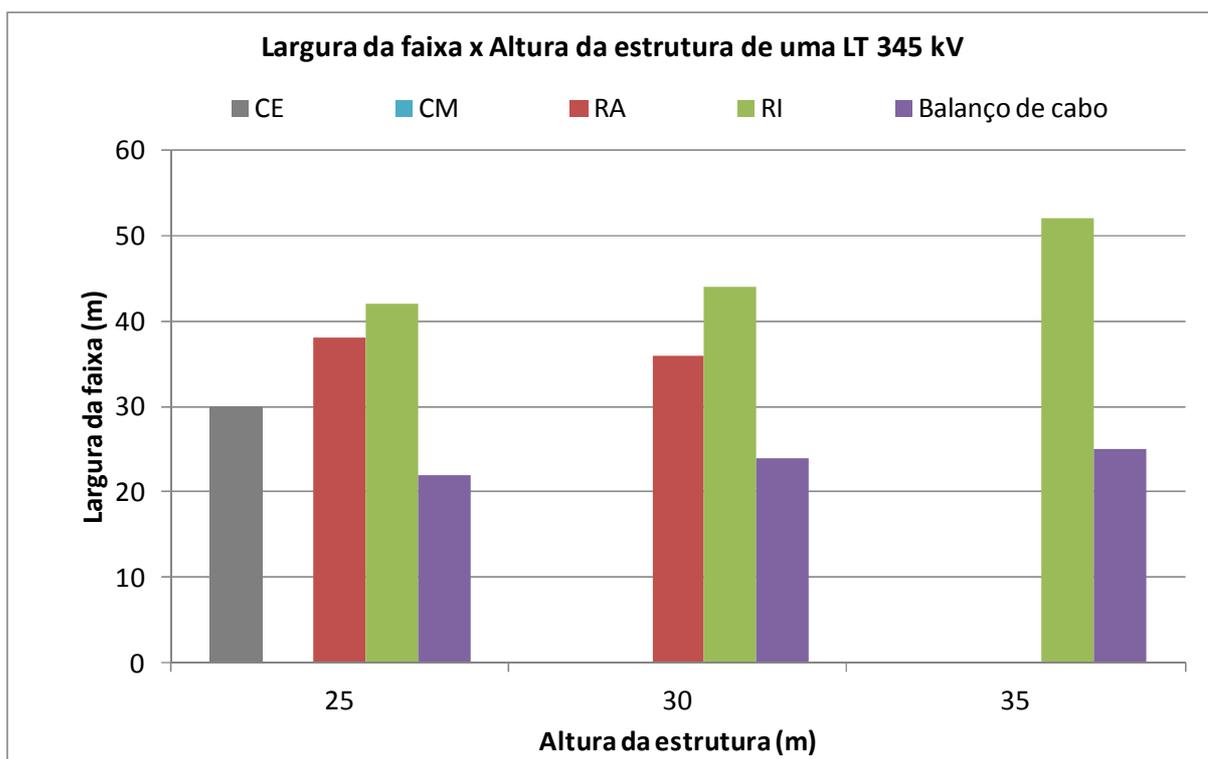


Figura 3.6 - Largura da faixa para diferentes alturas das estruturas, de uma LT 230 kV.

A Figura 3.7 apresenta a largura de faixa de segurança para uma LT 345 kV com estruturas com alturas de 25, 30 e 35 metros. Observa-se que a rádio interferência é o fator determinante da largura de faixa de segurança para as três alturas consideradas. Nota-se, semelhantemente à LT 230 kV (conforme resultados apresentados na Figura 3.6) que há um aumento da largura de faixa de segurança quando se tem o aumento da altura da estrutura, exigida pela rádio interferência. A explicação para esse fato se encontra no item 3.4.2 deste trabalho.



**Figura 3.7 - Largura da faixa para diferentes alturas das estruturas, de uma LT 345 kV.**

Em suma, considerando-se a variação da altura, a LT de 138 kV apresenta níveis elevados apenas para a rádio interferência, que juntamente com o balanço do cabo condutor, definem a largura de faixa de segurança, para as alturas de estrutura de 15, 20 e 25 metros. Já para as alturas das estruturas de 20, 25 e 30 metros da linha de 230 kV, o ruído audível, a rádio interferência e o balanço dos cabos condutores definem a largura de faixa de segurança. Para a linha de transmissão de 345 kV, o campo magnético é o único efeito que não exige largura de faixa, para as alturas de estrutura de 25, 30 e 35 metros.

### **3.3.2 VARIAÇÃO DO TIPO DO CABO CONDUTOR**

A Figura 3.8 apresenta o resultado da largura de faixa de segurança para a LT 138 kV para os cabos condutores Penguin - 4/0, Linnet – 336 MCM e Grosbeak – 636 MCM, típicos de uma LT desse nível de tensão. Independentemente do tipo de cabo, os campos elétrico e

magnético e o ruído audível não exigem largura de faixa de segurança, devido ao reduzido nível de emissão desses efeitos eletromagnéticos.

A largura de faixa de segurança para uma LT 138 kV utilizando o cabo condutor Penguin é de aproximadamente 33 metros, determinada pelo critério de rádio interferência. Quando se utiliza o cabo condutor Grosbeak, a largura de faixa é reduzida para 15 metros, determinada pelo balanço do cabo condutor, conforme observado na Figura 3.8.

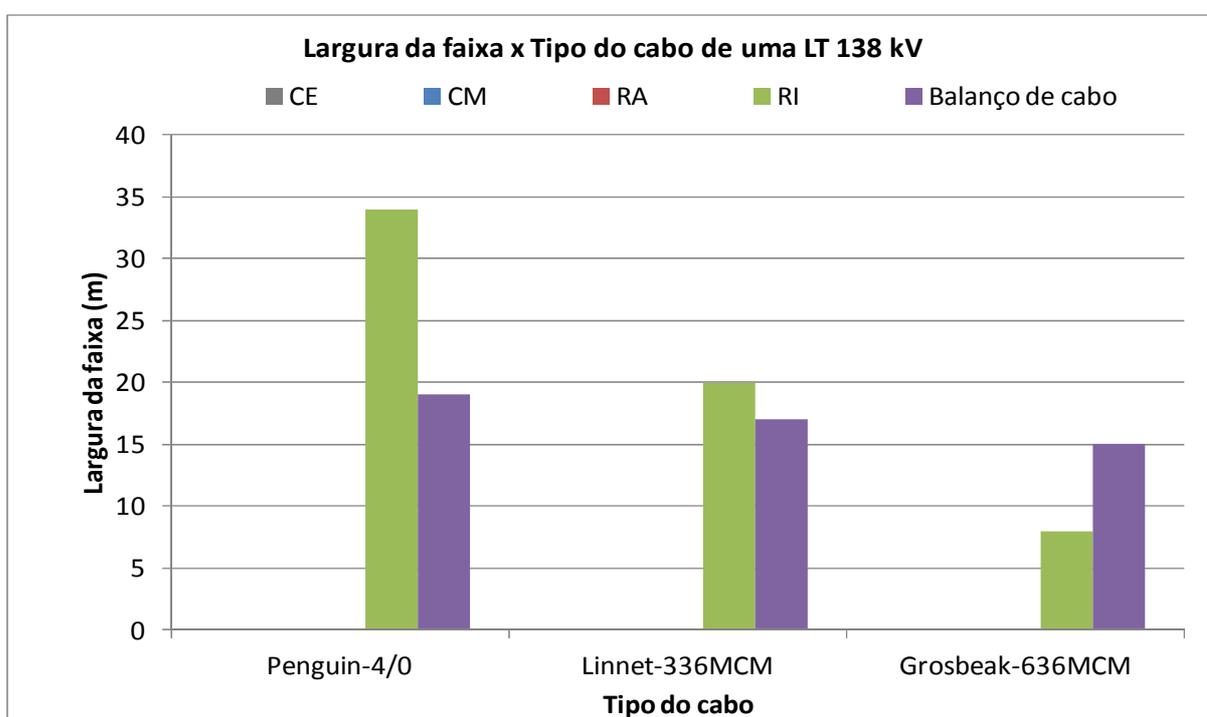


Figura 3.8 - Largura da faixa para diferentes cabos condutores, de uma LT 138 kV.

A largura de faixa de segurança de uma LT 230 kV utilizando os cabos condutores típicos Grosbeak – 636 MCM, Tern – 795 MCM e Rail – 954 MCM é apresentada na Figura 3.9. A LT com cabo Grosbeak exige uma largura de faixa de segurança de aproximadamente 50 metros, determinada pela rádio interferência e com a utilização do cabo Rail na LT, há uma diminuição da largura de faixa para aproximadamente 34 metros.

Conclui-se que há redução dos níveis de emissão dos efeitos eletromagnéticos (do ruído audível e da rádio interferência) e consequentemente da largura de faixa de segurança à

medida que se utiliza na LT cabos condutores com diâmetros maiores (o diâmetro do cabo Rail é maior que o diâmetro do cabo Grosbeak).

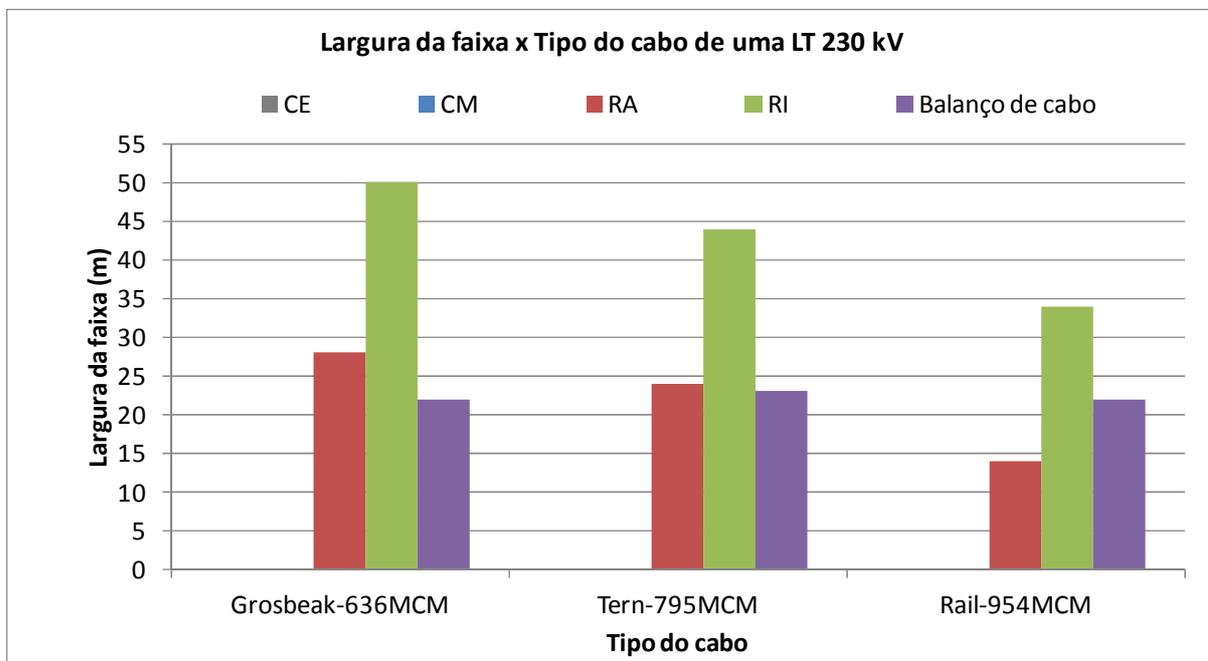


Figura 3.9 - Largura da faixa para diferentes cabos condutores, de uma LT 230 kV.

A Figura 3.10 apresenta o resultado da largura de faixa de segurança quando se utiliza os cabos condutores típicos Rail – 954MCM, Bluejay – 1113 MCM e Falcon – 1590 MCM em uma LT de 345 kV, utilizando-se 2 condutores por fase. Nota-se que o aumento do diâmetro do cabo condutor proporciona significativas reduções na largura de faixa de segurança exigidas pelos efeitos do ruído audível ou da rádio interferência. Já o campo elétrico e o balanço dos cabos condutores não provocam grandes influências na largura de faixa de segurança em função da variação do tipo de cabo condutor.

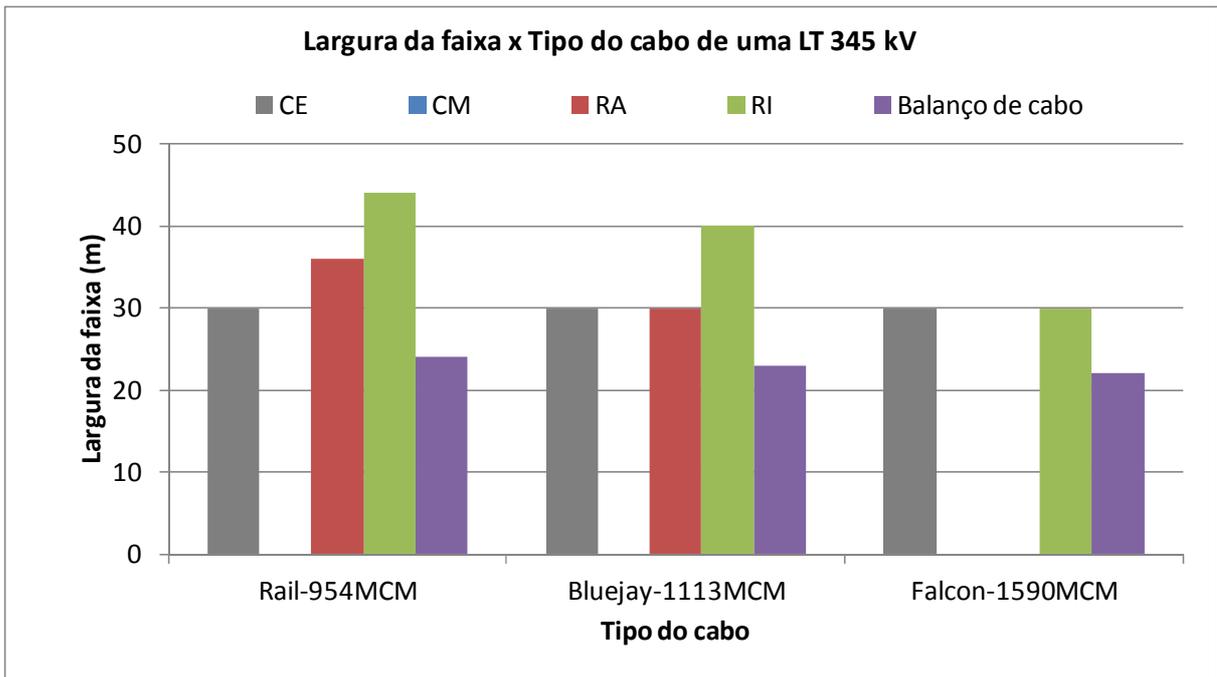


Figura 3.10 - Largura da faixa para diferentes cabos condutores, de uma LT 345 kV.

Alguns cabos condutores proporcionam reduzidos níveis de efeitos eletromagnéticos e consequentemente larguras satisfatórias de faixa de segurança, por exemplo, o cabo Grosbeak para a linha de 138 kV, o cabo Rail para a LT 230 kV e o cabo Falcon para a linha de 345 kV.

### 3.3.3 VARIAÇÃO DA RELAÇÃO VÃO DE PESO E VÃO DE VENTO

A Figura 3.11 apresenta o resultado da largura de faixa quando se tem alteração da relação de vão de peso (VP) e vão de vento (VV), para as LTs 138, 230 e 345 kV, considerando o balanço dos cabos condutores. É considerado apenas o balanço do cabo condutor, uma vez que os efeitos eletromagnéticos não são afetados pela relação do vão de peso e vão de vento. Observa-se que o aumento da relação VP/VV proporciona redução da largura de faixa para o mesmo nível de tensão da LT.

O aumento da largura de faixa é verificado quando se tem aumento do nível de tensão da LT, para uma mesma relação VP/VV. Tal aumento é justificado pelos diferentes cabos

condutores utilizados nas LTs 138, 230 e 345 kV (cabo Linnet, Grosbeak e Rail, respectivamente).

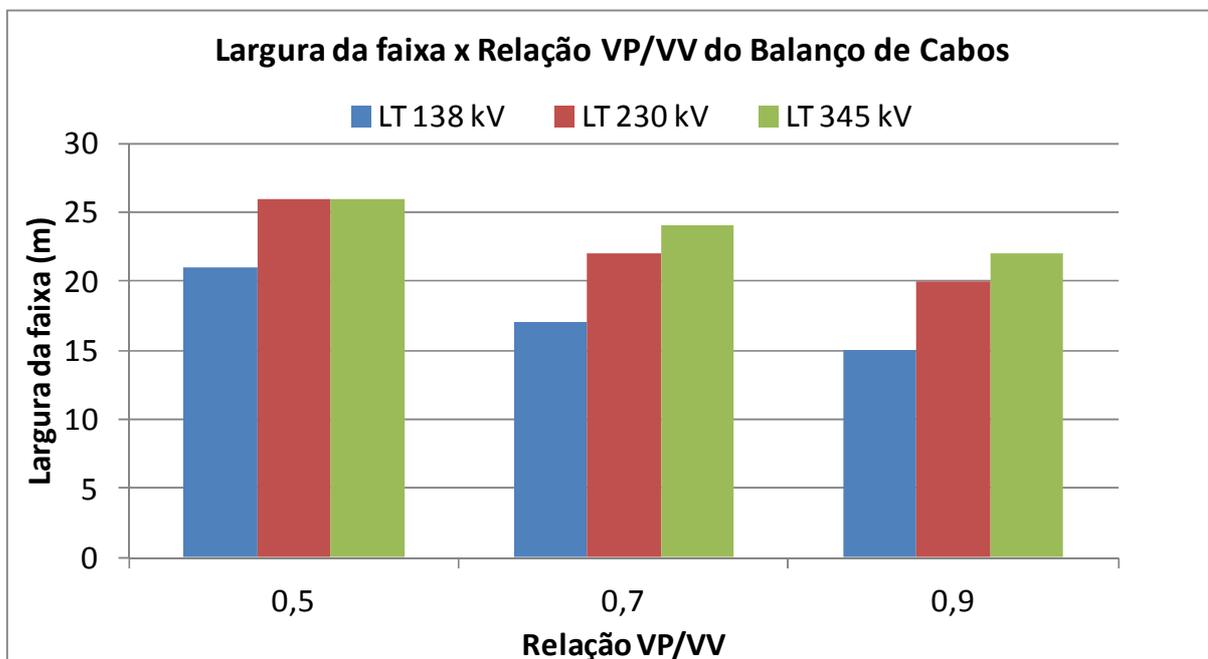
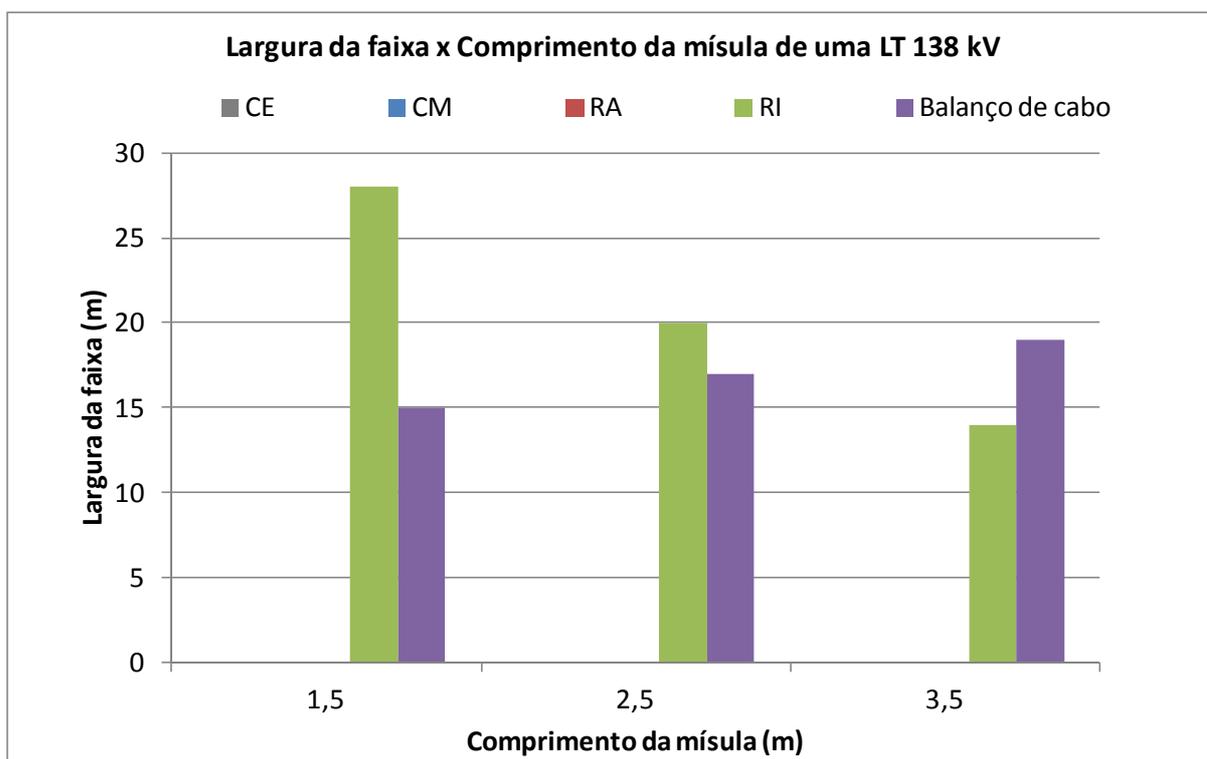


Figura 3.11 - Largura da faixa para diferentes relações de vão de peso e vão de vento.

### 3.3.4 VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DA MÍSULA

As Figuras 3.12, 3.13 e 3.14 apresentam o resultado da largura de faixa de segurança, para as LTs 138, 230 e 345 kV, respectivamente, quando se tem alteração do comprimento da mísula. Os limites do campo elétrico, do campo magnético e do ruído audível, para uma LT de 138 kV, para qualquer um dos comprimentos de mísulas analisados, não foram excedidos, conforme observado na Figura 3.12.

A largura de faixa de segurança, apresentada na Figura 3.12, para uma LT de 138 kV é de aproximadamente 27 metros quando se tem uma LT com 1,5 metros de comprimento de mísula, determinada pela rádio interferência. Essa largura de faixa é reduzida para aproximadamente 19 metros, exigida pelo balanço do cabo condutor, quando se tem um aumento do comprimento de mísula para 3,5 metros.



**Figura 3.12 - Largura da faixa para diferentes comprimentos das mísulas, de uma LT 138 kV.**

A LT de 230 kV também proporciona níveis reduzidos de campo elétrico e campo magnético, os quais não são critérios determinantes da largura de faixa de segurança para esse nível de tensão, para os comprimentos de mísulas de 3, 4 e 5 metros, apresentados na Figura 3.13.  necessária uma largura de faixa de segurança de aproximadamente 60 metros, para uma LT com estrutura com comprimento de mísula de 3 metros. Essa largura  reduzida para aproximadamente 46 metros com aplicao de mísula de comprimento de 5 metros.

Observa-se reduo da largura de faixa de segurança de aproximadamente 10 metros tanto pelo critério de ruído audível quanto pelo critério de rádio interferência, quando se tem aumento do comprimento da mísula de 3 para 4 metros. O aumento do comprimento da mísula para 5 metros proporciona pequena reduo da largura de faixa, conforme observado na Figura 3.13.

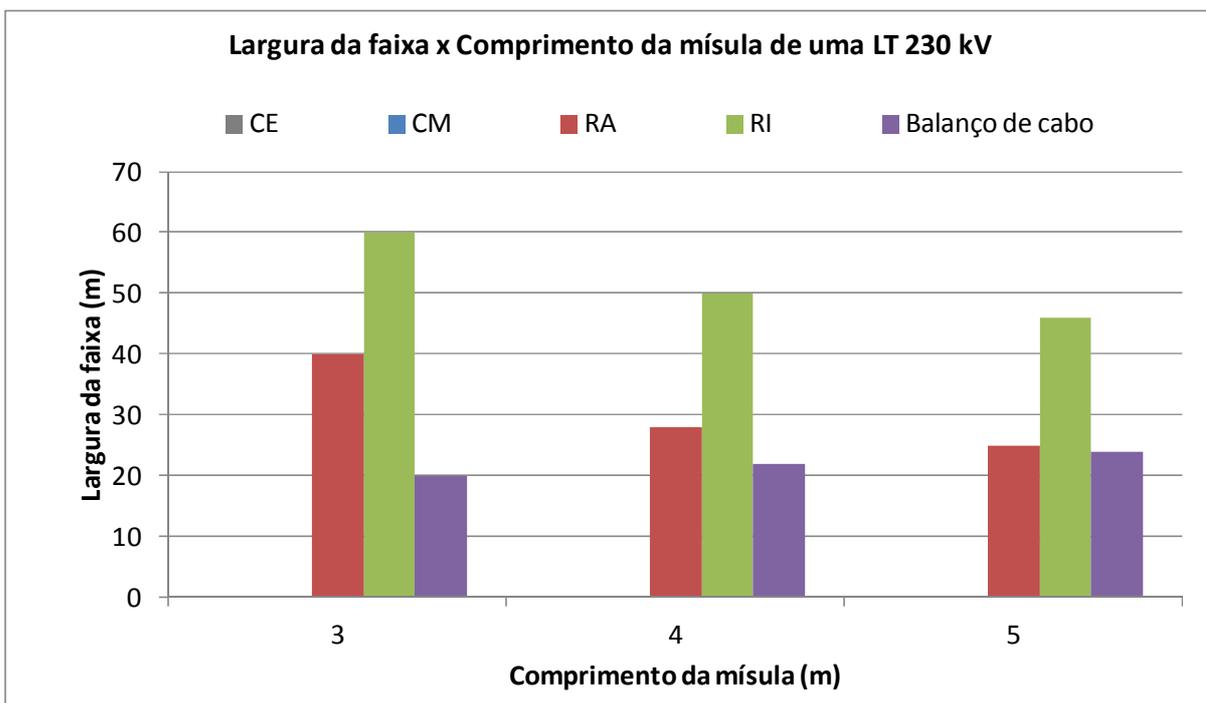


Figura 3.13 - Largura da faixa para diferentes comprimentos das mísulas, de uma LT 230 kV.

O campo magnético é o único efeito eletromagnético que não excede o limite para uma LT de 345 kV, com comprimento de mísulas de 5, 6 e 7 metros, apresentados na Figura 3.14.

A variação da largura de faixa de segurança  pequena quando se tem alteração do comprimento de mísula de uma linha de transmissão de 345 kV, conforme observado nos resultados apresentados na Figura 3.14. Com um comprimento de mísula de 5 metros, tem-se uma largura de faixa de segurança de 50 metros. Essa largura  reduzida para aproximadamente 42 metros quando se tem o aumento do comprimento da mísula para 7 metros, exigida pelo critério da rádio interferência.

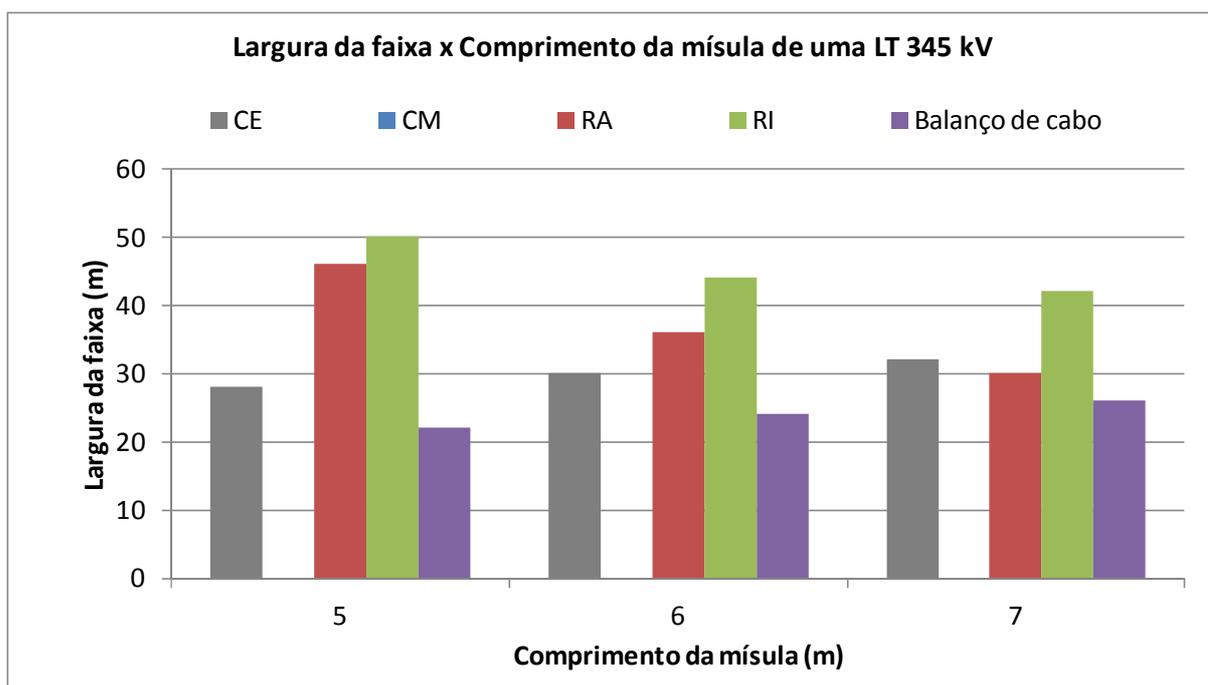


Figura 3.14 - Largura da faixa para diferentes comprimentos das mísulas, de uma LT 345 kV.

### 3.3.5 VARIAÇÃO DA DISPOSIÇÃO DOS CABOS CONDUTORES

As Figuras 3.15, 3.16 e 3.17 apresentam a largura de faixa de segurança, considerando a variação da disposição dos cabos condutores das LTs de 138, 230 e 345 kV. Conforme observado nessas figuras, o campo magnético não excede o seu limite, o que não exigirá largura de faixa de segurança, independente da disposição do cabo condutor e do nível de tensão da LT.

Na Figura 3.15 observa-se que a disposição horizontal dos condutores na LT 138 kV exige uma maior largura de faixa de segurança, determinada pela rádio interferência. Na disposição triangular o balanço de cabo é o critério determinante na largura de faixa.

A disposição vertical dos cabos condutores proporciona uma menor largura de faixa de segurança, para a LT 138 kV. Nessa disposição há pequena diferença na largura de faixa de segurança exigida pelo critério de rádio interferência e pelo balanço dos cabos condutores, conforme observado na Figura 3.15.

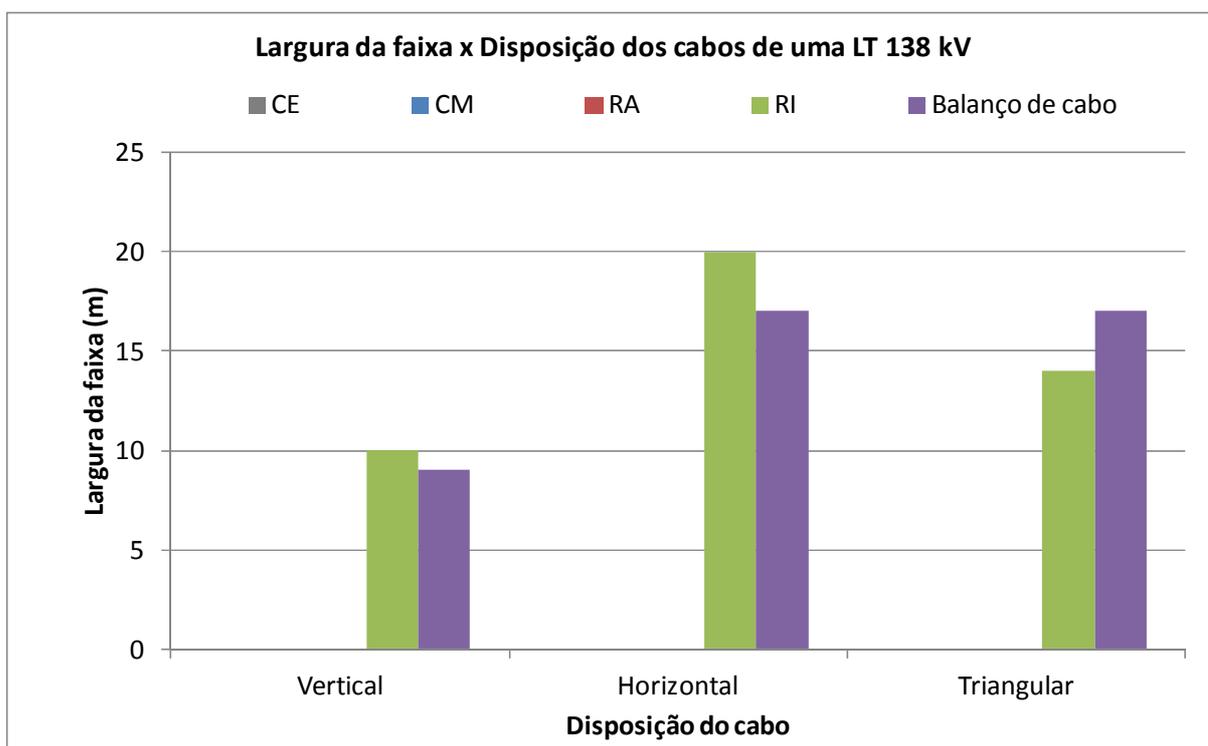
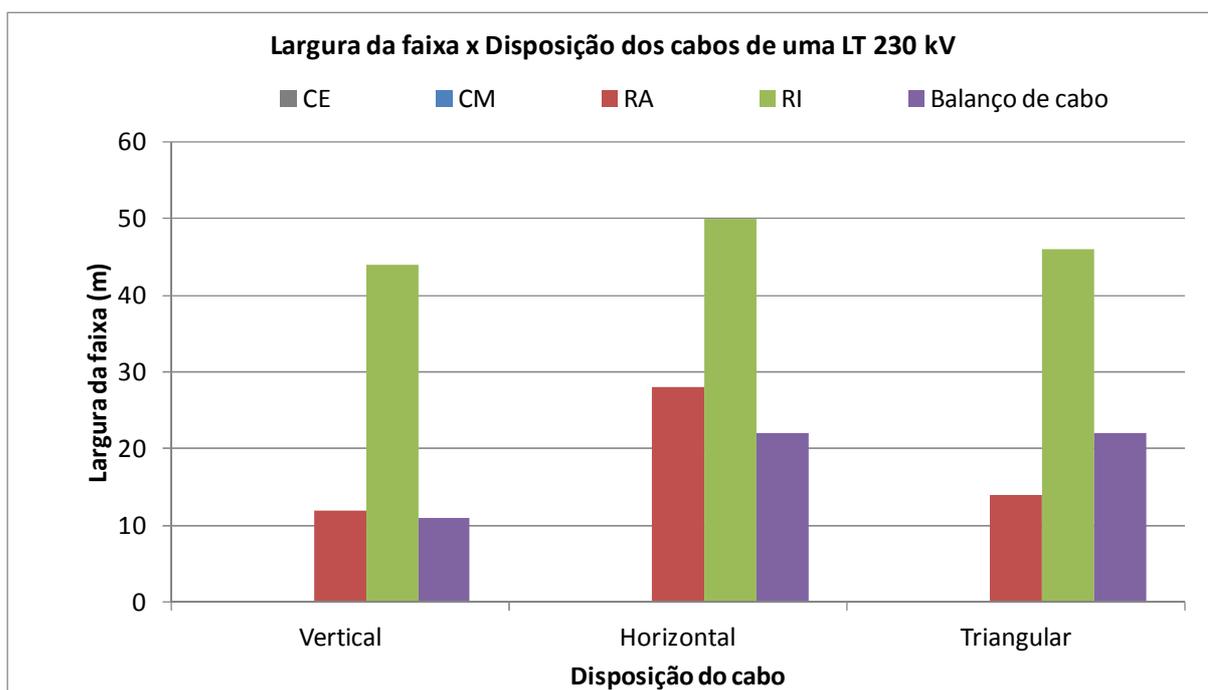


Figura 3.15 - Largura da faixa para diferentes disposições dos cabos condutores, de uma LT 138 kV.

Semelhantemente à LT 138 kV, a disposição horizontal exige uma maior largura de faixa de segurança, quando se comparada às disposições vertical e triangular, para uma LT de 230 kV, conforme pode ser observado na Figura 3.16. Como se vê, para uma disposição vertical, os níveis da rádio interferência são relativamente maiores que os demais efeitos eletromagnéticos. Essa disposição dos cabos condutores proporciona uma menor emissão de rádio interferência, o que acarreta em uma menor largura de faixa de segurança.

Há pequena diferença nos resultados de largura de faixa de segurança para as três disposições de cabos condutores, apresentados na Figura 3.16. Sendo assim, para a LT 230 kV pode-se utilizar qualquer uma das disposições de cabos condutores, na otimização da largura de faixa de segurança.



**Figura 3.16 - Largura da faixa para diferentes disposições dos cabos condutores, de uma LT 230 kV.**

A variação da disposição dos cabos condutores, apresentada na Figura 3.17, proporciona grande redução na largura de faixa de segurança de uma LT 345 kV, determinada pelos critérios de ruído audível e rádio interferência, considerando-se 2 condutores por fase. A disposição vertical dos cabos condutores exige uma maior largura de faixa de segurança, quando se comparada às disposições horizontal e triangular, observado na Figura 3.17, o que se justifica a ausência (ou pouca quantidade) de linhas implantadas de 345 kV com a disposição vertical.

No item 3.4.3, é apresentado o perfil lateral da rádio interferência (porque é o efeito determinante da largura de faixa de segurança para os três níveis de tensão) das LTs 138, 230 e 345 kV, para as disposições de cabos condutores vertical, horizontal e triangular, a fim de proporcionar uma análise detalhada da influência da disposição dos cabos na largura de faixa de segurança.

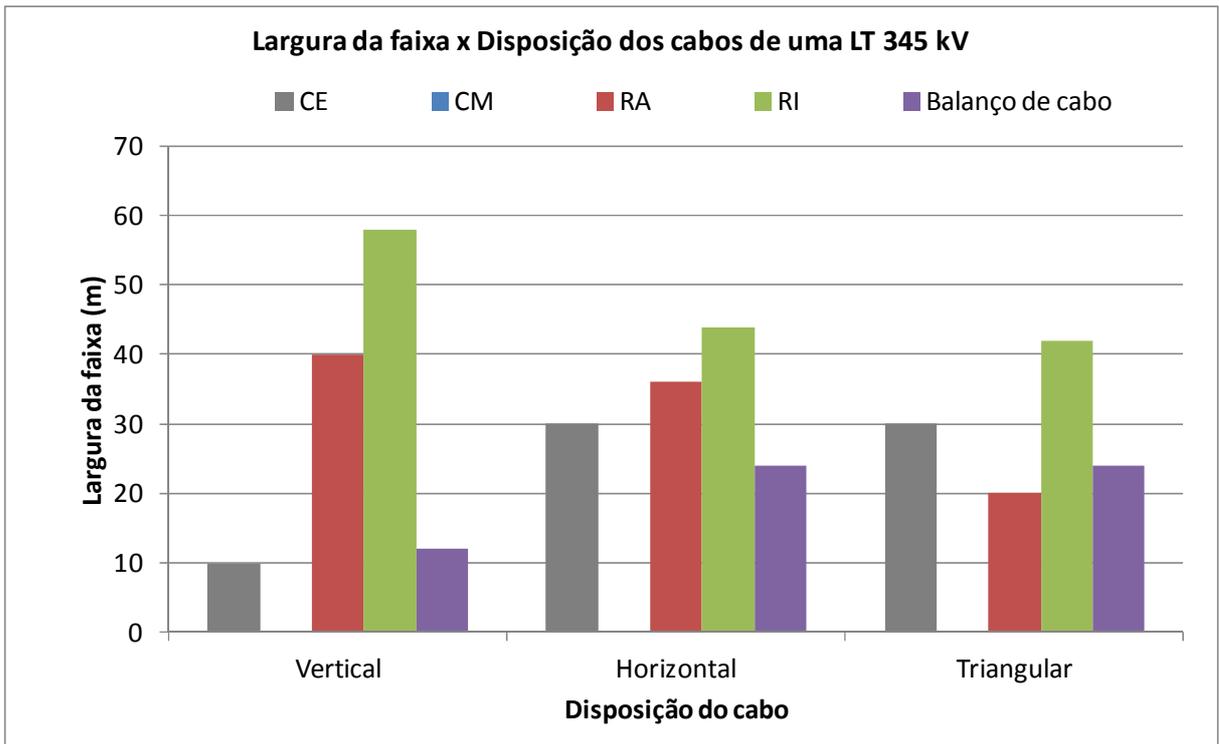


Figura 3.17 - Largura da faixa para diferentes disposições dos cabos condutores, de uma LT 345 kV.

Adicionalmente, foi realizada uma análise de sensibilidade onde verificou-se que diferentes tipos de disposição triangular dos cabos condutores, apresentados na Figura 3.18, não proporcionam alterações significativas na largura de faixa de segurança das linhas de transmissão, independentemente do parâmetro analisado.

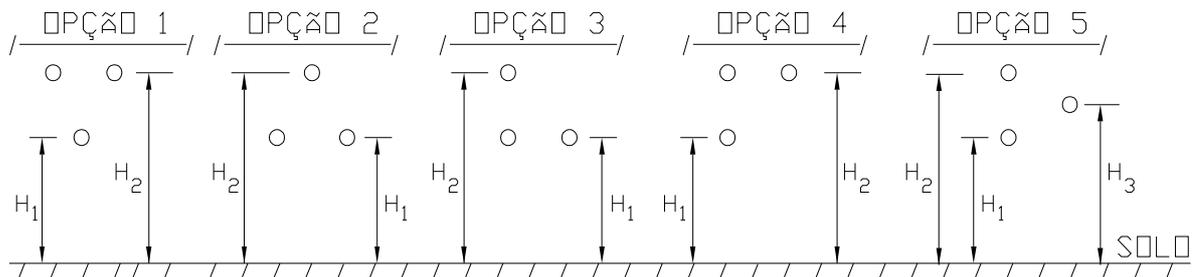


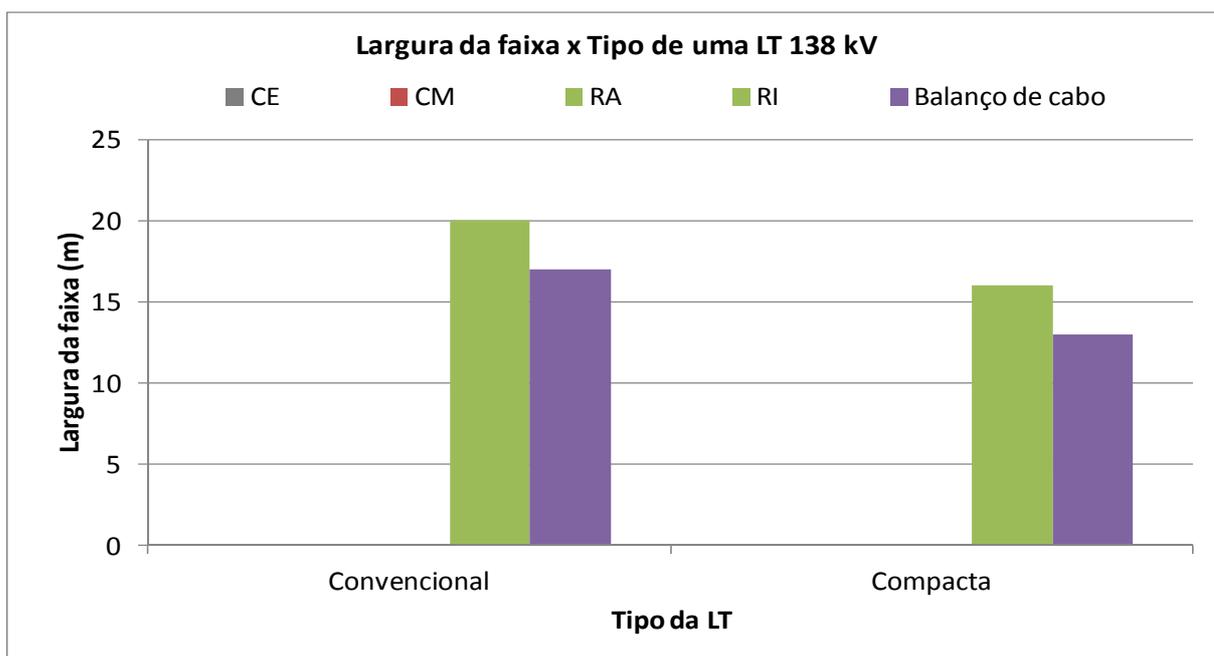
Figura 3.18 - Tipos de configuração triangular dos cabos condutores.

### 3.3.6 VARIAÇÃO DO TIPO DE LT: CONVENCIONAL X COMPACTA

Apresenta-se, na Figura 3.19, a largura de faixa de segurança para uma LT 138 kV dos tipos convencional e compacta. Observa-se que para uma LT 138 kV tanto convencional

quanto compacta exigem largura reduzida de faixa de segurança, sendo determinada pelos critérios de rádio interferência e balanço do cabo condutor.

Não há exigência de largura de faixa para os critérios de campo elétrico, campo magnético e ruído audível, conforme Figura 3.19, uma vez que a emissão desses efeitos está abaixo dos limites estabelecidos.



**Figura 3.19 - Largura da faixa para diferentes tipos de LT 138 kV.**

A largura de faixa de segurança para os tipos convencional e compacta de uma LT 230 kV é apresentada na Figura 3.20. A LT do tipo convencional apresenta uma largura de faixa de 50 metros, determinada pelo critério de rádio interferência. Já para a LT compacta, esse efeito eletromagnético exige uma largura de faixa de 70 metros. O motivo da largura de faixa de segurança ser maior para a linha de 230 kV compacta encontra-se detalhado no item 3.4.4.

Os campos elétrico e magnético não são excedidos, tanto para a linha convencional quanto para a compacta, motivo pelo qual não são apresentadas na Figura 3.20 larguras de faixa de segurança para esses efeitos eletromagnéticos.

Observa-se pela Figura 3.20 que não é eficaz a aplicação de LT compacta para se reduzir a largura de faixa de segurança de uma LT de 230 kV convencional, considerando os casos base (um condutor por fase e cabos condutores típicos) considerados neste trabalho. Um meio de se reduzir a largura de faixa da LT convencional seria a mudança do cabo Grosbeak (utilizado como o cabo base nos processamentos) para o cabo Rail, conforme resultados apresentados na Figura 3.9 ou a mudança da disposição horizontal para triangular, conforme mostrado na Figura 3.16. Realizando tais mudanças, obteve-se aproximadamente 35 metros tanto para o cabo Rail quanto para a disposição triangular.

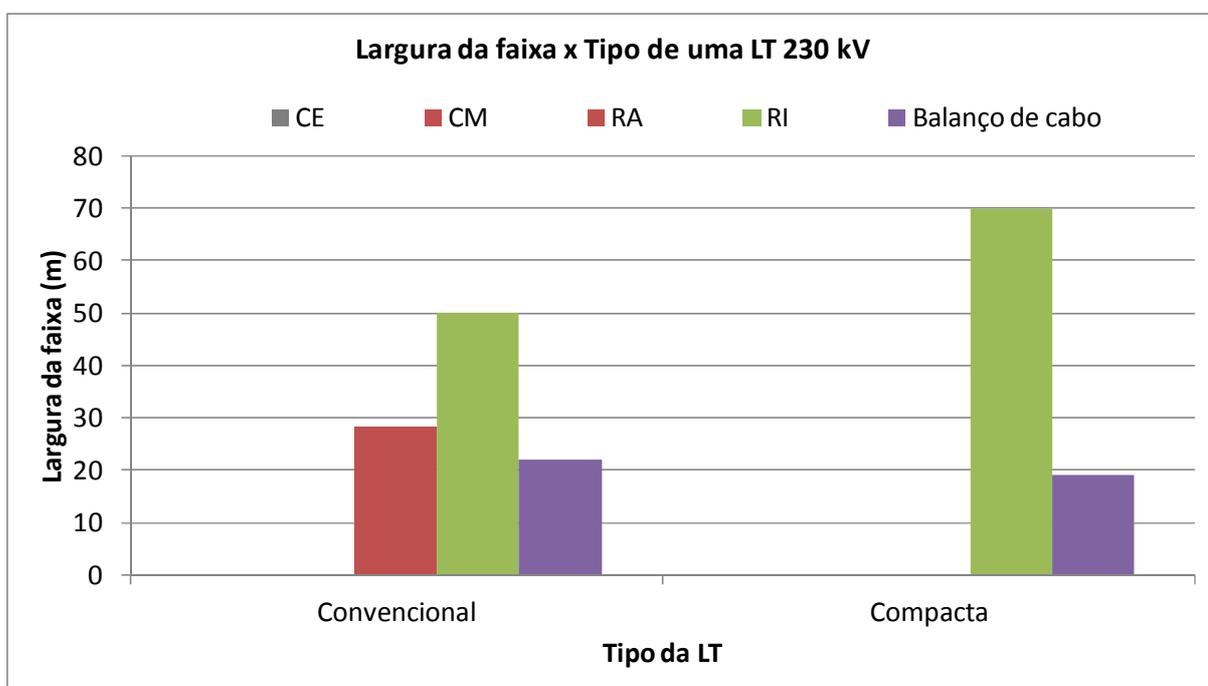


Figura 3.20 - Largura da faixa para diferentes tipos de LT 230 kV.

A largura da faixa de segurança de uma linha de transmissão de 345 kV é apresentada na Figura 3.21, utilizando-se 2 condutores por fase na LT. Semelhantemente à LT 230 kV, o tipo de LT 345 kV compacta exige largura de faixa de segurança maior que para uma linha convencional, exigida pela rádio interferência.

O item 3.4.4 apresenta as análises da maior largura de faixa de segurança de uma linha de transmissão de 345 kV observada para o tipo compacta, exigida pela rádio interferência.

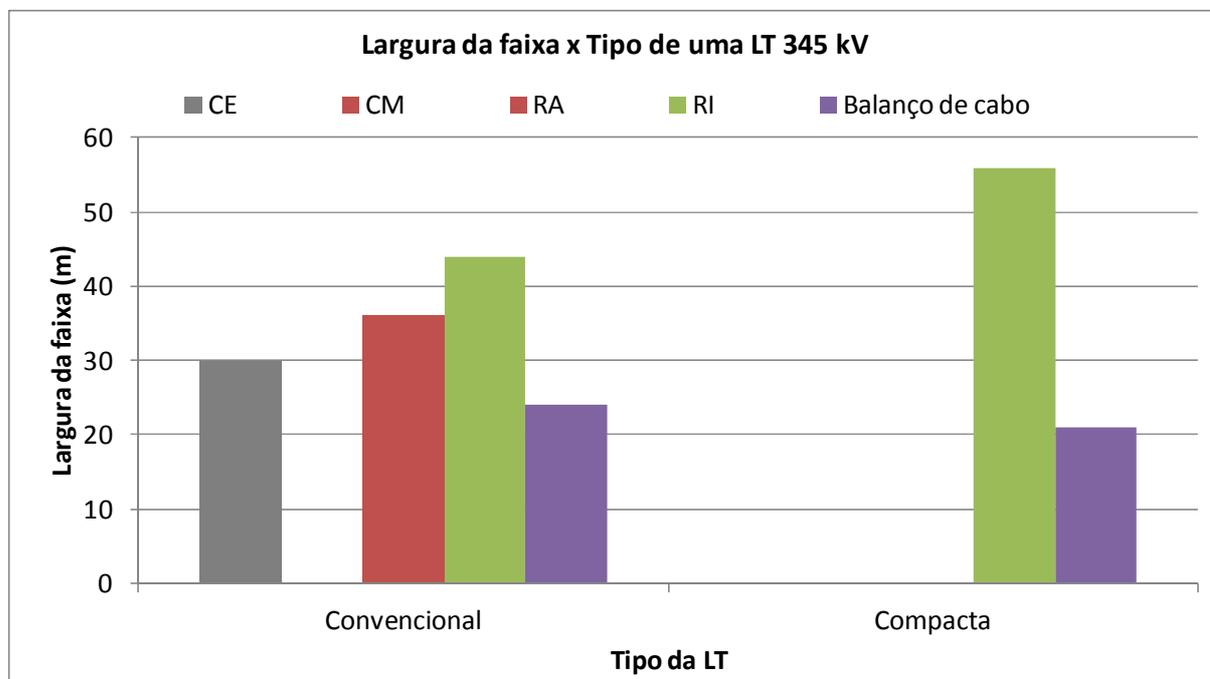


Figura 3.21 - Largura da faixa para diferentes tipos de LT 345 kV.

### 3.3.7 VARIAÇÃO DO NÚMERO DE CIRCUITOS

A largura de faixa da LT 138 kV com circuito simples e duplo é apresentada na Figura 3.22. Os limites de campo magnético e ruído audível não foram excedidos tanto para a LT de circuito simples quanto para a de circuito duplo. O campo elétrico também não é um efeito determinante da largura de faixa de segurança para o circuito simples, sendo a rádio interferência e o balanço do cabo os critérios de determinação da largura de faixa.

Observa-se que a LT 138 kV com circuito duplo necessita de uma largura de faixa menor que uma de circuito simples. Isso se deve ao fato de que no circuito duplo os cabos condutores estão dispostos de forma vertical e no circuito simples os condutores estão na forma horizontal. Na Figura 3.15, onde se tem o resultado da largura de faixa de segurança para diferentes disposições dos cabos condutores, é comprovada tal explicação.

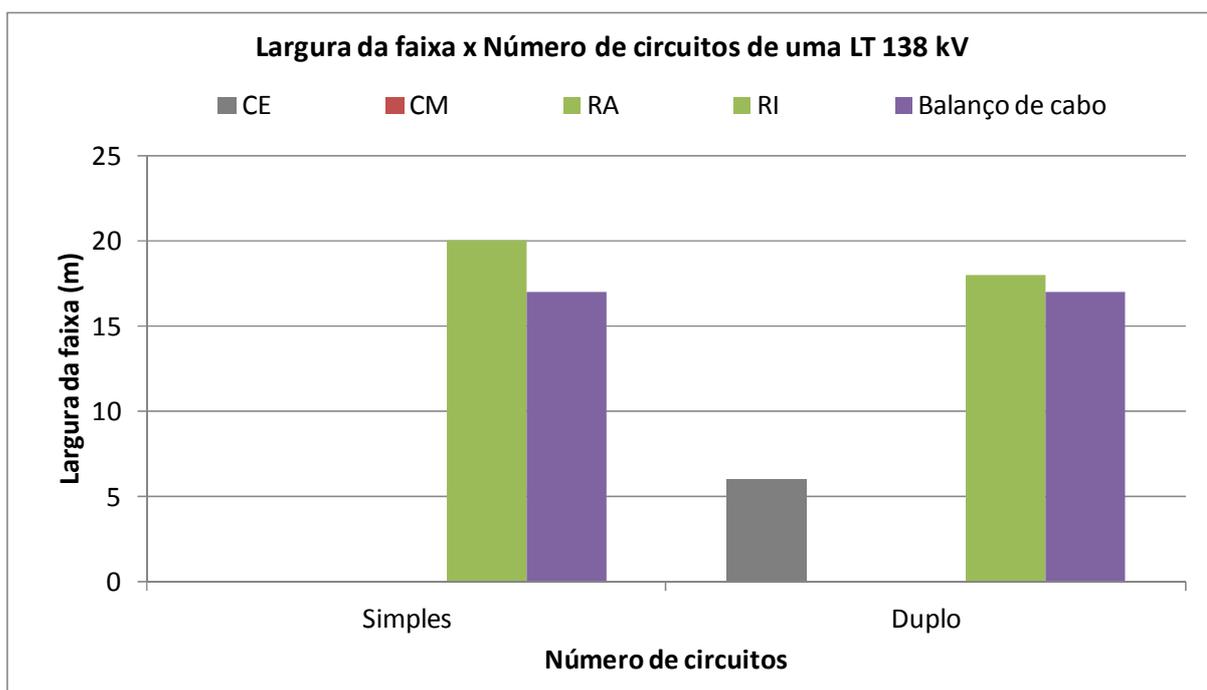


Figura 3.22 - Largura da faixa para diferentes números de circuitos de LT 138 kV.

As Figuras 3.23 e 3.24 são apresentados as larguras de faixa de segurança dos circuitos simples e duplo das LTs 230 e 345 kV, respectivamente. Em ambas as figuras observa-se que o circuito duplo exige uma maior largura de faixa de segurança, quando se comparada a uma LT de circuito simples.

Na figura 3.23, nota-se que a largura de faixa de segurança para uma LT 230 kV de circuito simples é de 50 metros, determinada pelo critério de rádio interferência. Com o aumento do número de circuito, há o incremento da largura da faixa para 75 metros, exigida também por esse efeito eletromagnético.

A linha de transmissão de 345 kV com apenas um circuito (simples) necessita de uma largura de faixa de segurança de aproximadamente 42 metros, exigida pela rádio interferência, conforme resultados apresentados na Figura 3.24. Quando há adição de mais um circuito (duplo) nessa linha, há necessidade do aumento da largura de faixa de segurança para 75 metros, exigida pelo ruído audível.

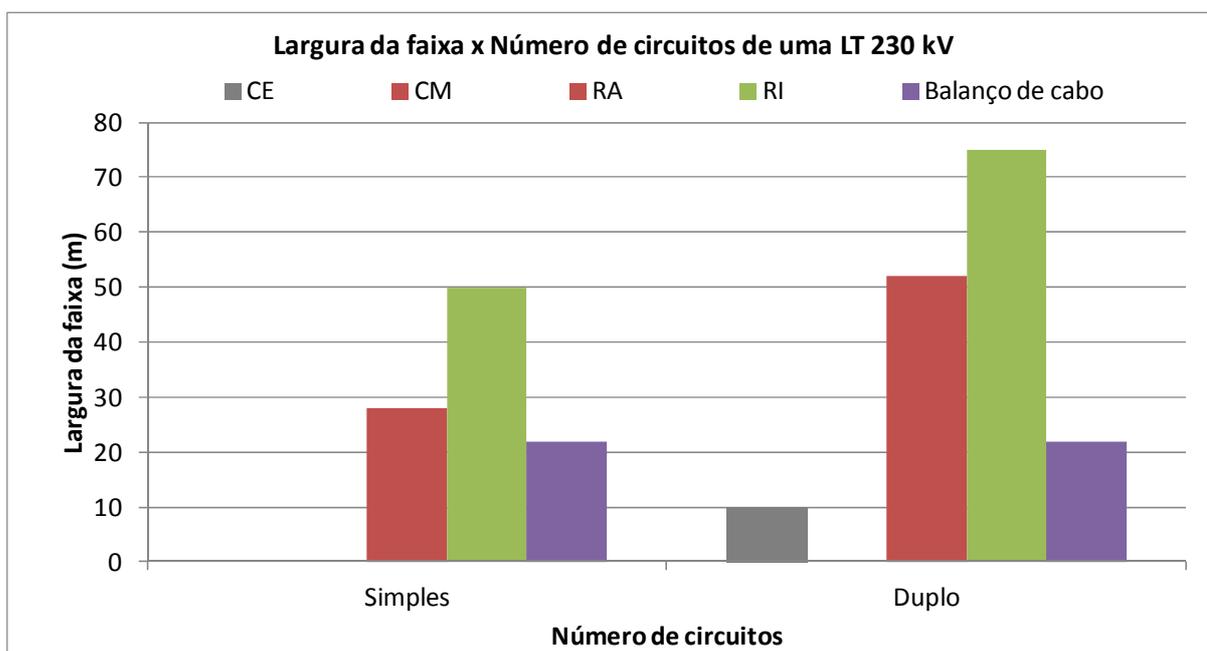


Figura 3.23 - Largura da faixa para diferentes números de circuitos de LT 230 kV.

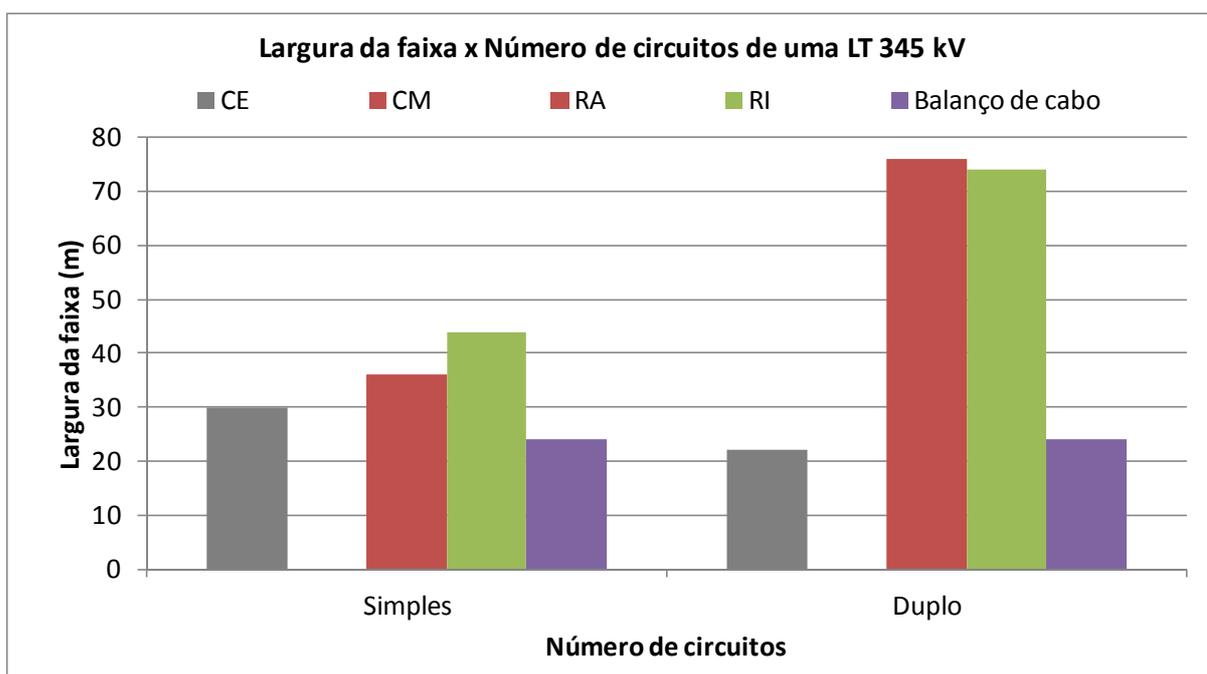


Figura 3.24 - Largura da faixa para diferentes números de circuitos de LT 345 kV.

### 3.3.8 VARIAÇÃO DO NÚMERO DE CONDUTORES POR FASE

A Figura 3.25 mostra o resultado da largura de faixa de segurança de uma LT 138 kV quando se tem 1, 2 ou 3 condutores por fase. A maior largura de faixa de segurança é de 1

condutor por fase, determinado pelo critério de rádio interferência. Já para 2 ou 3 condutores por fase, a largura de faixa é determinada pelo critério de balanço de cabo condutor.

Observam-se na Figura 3.25 que o campo elétrico, o campo magnético e o ruído audível não são efeitos determinantes na largura de faixa de segurança e que há uma redução significativa dos níveis de emissão da rádio interferência (consequentemente redução da largura de faixa) quando se tem o aumento do número de condutores por fase em uma LT de 138 kV.

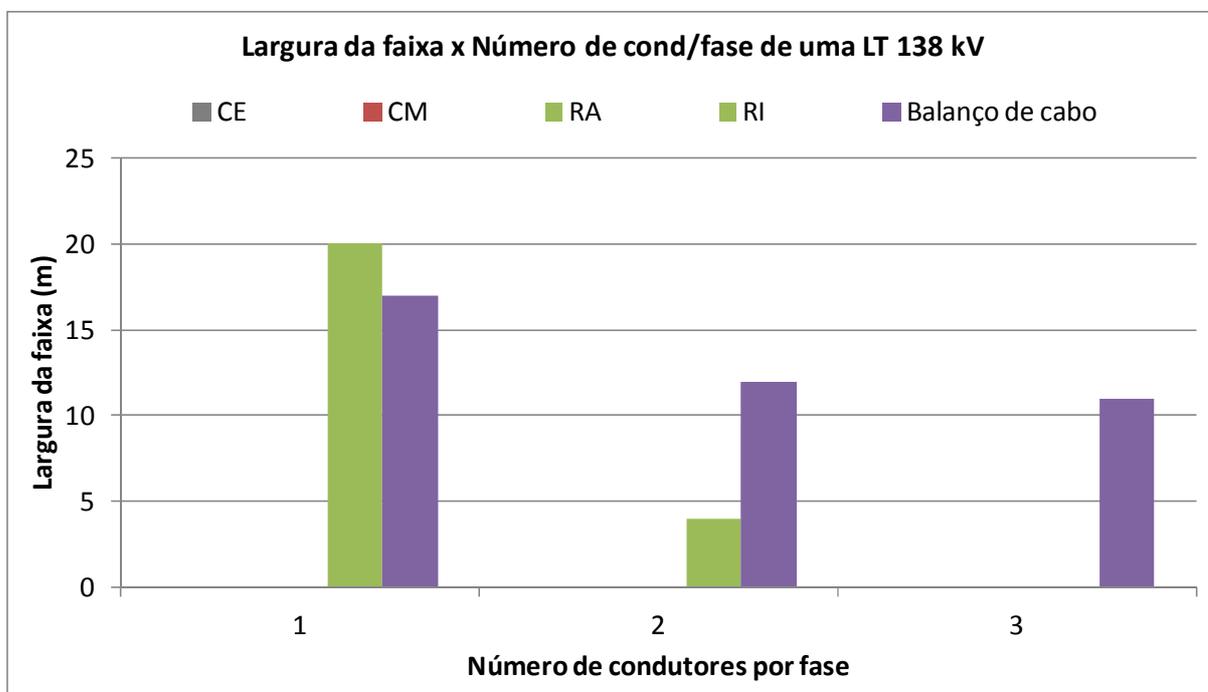


Figura 3.25 - Largura da faixa para diferentes números de condutores por fase, de uma LT 138 kV.

O efeito do número de condutores por fase de uma linha de transmissão de 230 kV é analisado na Figura 3.26. Os resultados mostram a necessidade de uma largura de faixa de segurança de 50 metros, para a LT com 1 condutor por fase. Essa largura é reduzida para 20 e 15 metros quando se tem a aplicação de 2 ou 3 condutores por fase, respectivamente.

A LT 230 kV com 3 condutores por fase apresenta uma largura de faixa de aproximadamente 15 metros, determinada pelos critérios de rádio interferência e do balanço do cabo condutor, conforme observado na Figura 3.26.

O aumento do número de condutores por fase proporciona uma redução nos limites de todos os efeitos eletromagnéticos e do balanço do cabo condutor, observado na Figura 3.26. Essa figura mostra também que, para alguns efeitos eletromagnéticos, os limites estabelecidos não foram ultrapassados.

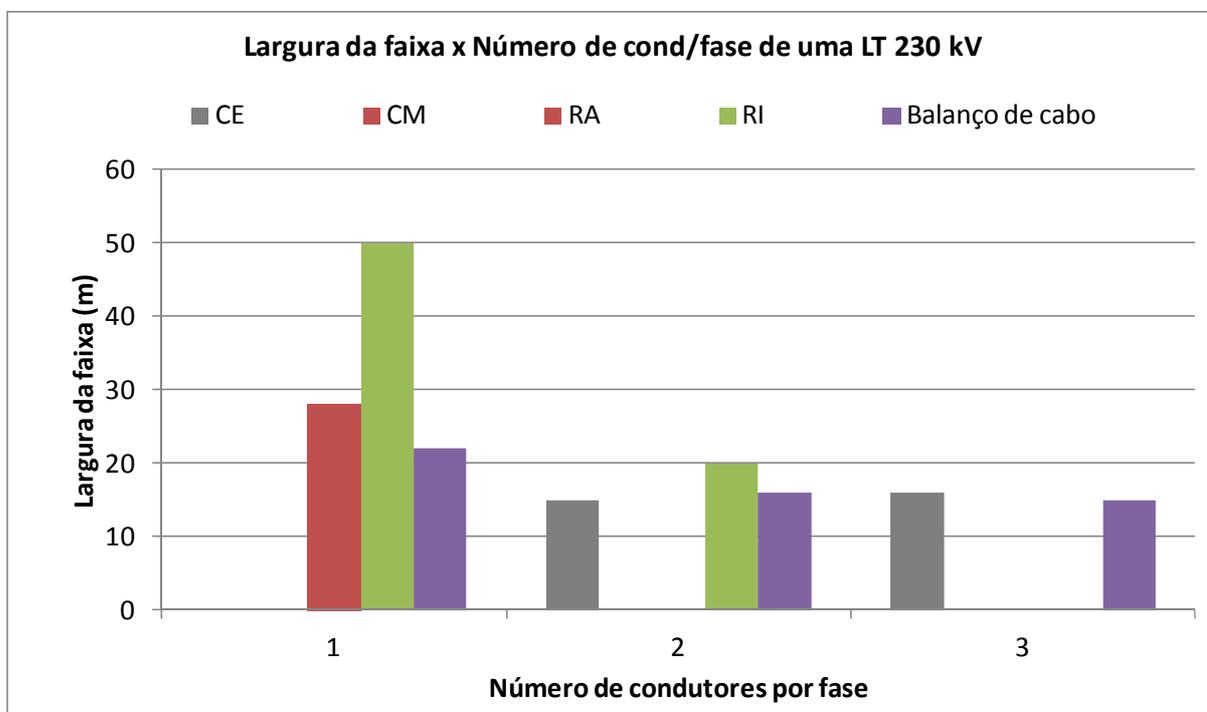


Figura 3.26 - Largura da faixa para diferentes números de condutores por fase, de uma LT 230 kV.

A Figura 3.27 apresenta o resultado da largura de faixa de segurança para 2, 3 e 4 condutores por fase de uma linha de transmissão de 345 kV. Observa-se que apenas 2 condutores por fase já proporciona largura de faixa de segurança satisfatória para uma LT de 345 kV, de aproximadamente 44 metros. Caso seja necessária a redução da largura de faixa, pode-se utilizar um número maior de condutores por fase, por exemplo, 3 ou 4 condutores por fase, proporcionando uma largura de faixa de 30 metros, exigida pelo campo elétrico.

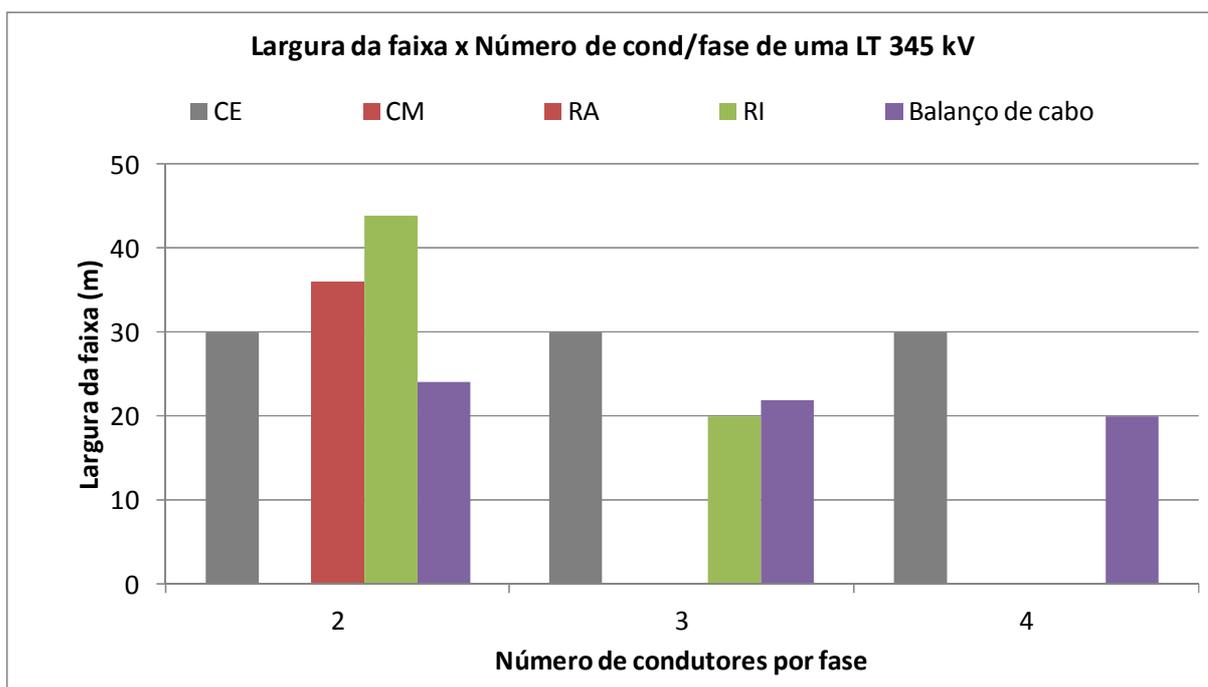


Figura 3.27 - Largura da faixa para diferentes números de condutores por fase, de uma LT 345 kV.

### 3.3.9 VARIAÇÃO DA FLECHA DO CABO CONDUTOR

A Figura 3.28 apresenta a influência das flechas de 10, 13 e 16 metros para os cabos condutores de uma LT de 138 kV. Observa-se que há necessidade de uma largura de faixa de aproximadamente 20 metros, para os cabos condutores com flechas de 10 ou 13 metros, determinada pelo critério de rádio interferência, e para a LT com uma flecha de 16 metros, a largura de faixa é de aproximadamente 18 metros, exigida pelo balanço dos cabos condutores. Em suma, a mudança da flecha dos cabos condutores proporciona pouca alteração na largura de faixa de segurança para um linha de transmissão de 138 kV. Sendo assim, tal parâmetro não é eficaz para se conseguir uma redução de largura de faixa de segurança, de uma linha de transmissão de 138 kV.

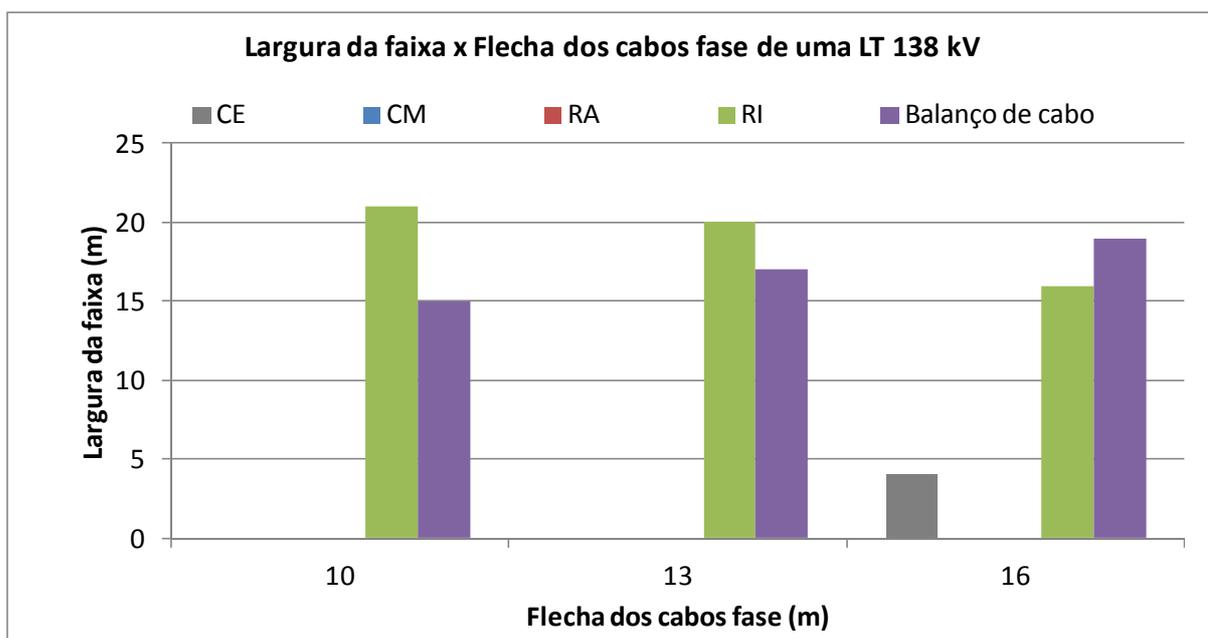


Figura 3.28 - Largura da faixa para diferentes flecha dos cabos condutores, de uma LT 138 kV.

A Figura 3.29 apresenta a largura de faixa de segurança para as flechas de 15, 18 e 21 metros dos cabos condutores de uma linha de transmissão de 230 kV. A rádio interferência é o efeito determinante na largura de faixa de segurança, para os valores de flechas analisados. Tal efeito exige uma largura de faixa de 60 metros para os cabos condutores com uma flecha de 15 metros, e para as flechas de 18 e 21 metros, há a necessidade das larguras de faixa de aproximadamente 50 e 44 metros, respectivamente.

O campo magnético não proporciona elevado nível de campo, para as flechas de 15, 18 ou 21 metros de uma linha de transmissão de 230 kV, pois conforme resultados apresentados na Figura 3.29, não há largura de faixa de segurança exigida por esse efeito eletromagnético. Nota-se que o campo elétrico exige largura de faixa de segurança apenas para uma flecha de 21 metros.

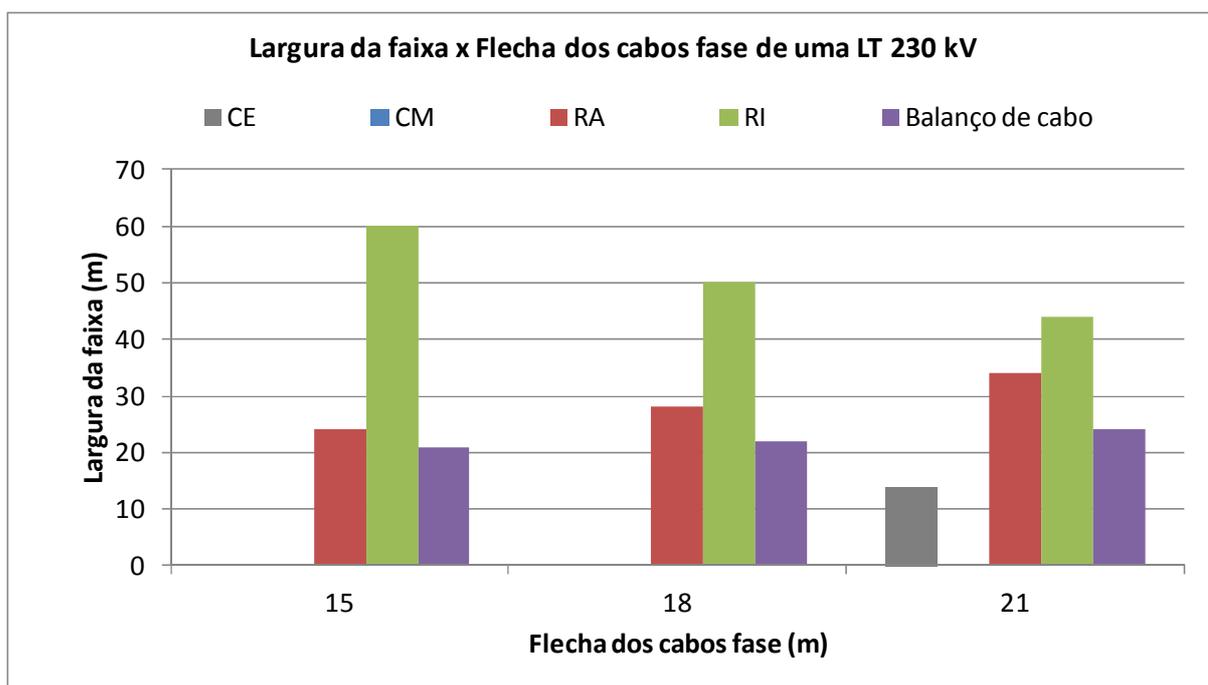


Figura 3.29 - Largura da faixa para diferentes flecha dos cabos condutores, de uma LT 230 kV.

A Figura 3.30 mostra a largura de faixa de segurança para as flechas dos cabos condutores de 19, 22 e 25 metros de uma linha de transmissão de 345 kV, considerando-se 2 condutores por fase. Nota-se que para as flechas de 19 e 22 metros, a largura de faixa de segurança é determinada pela rádio interferência. Já para a flecha de 25 metros, a largura de faixa é determinada pelo ruído audível.

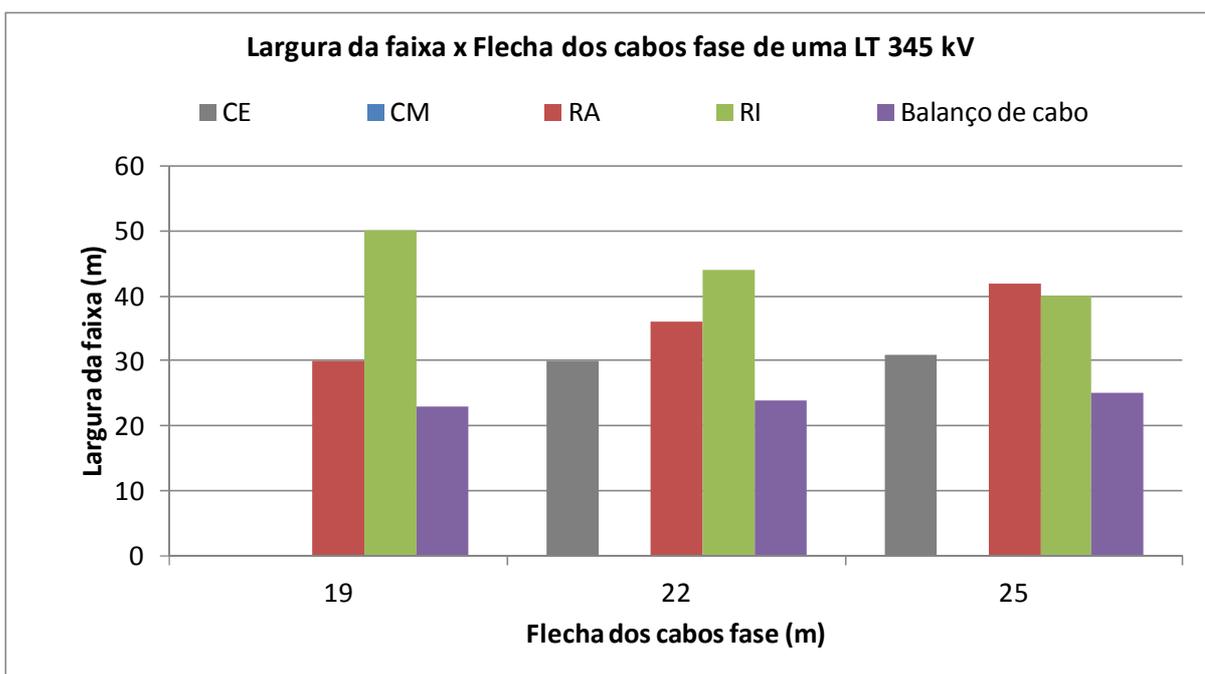


Figura 3.30 - Largura da faixa para diferentes flecha dos cabos condutores, de uma LT 345 kV.

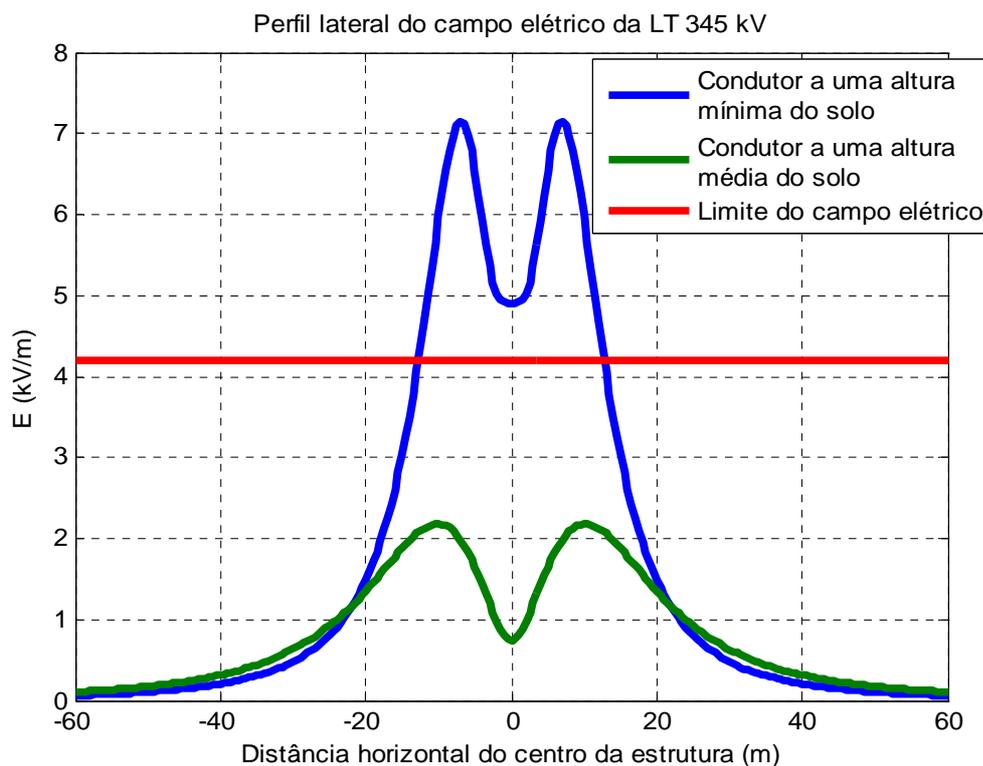
Observa-se, na análise realizada no item 3.3, larguras de faixa de segurança da linha de transmissão de 345 kV próximas do valor de 50 metros, aplicadas pelas concessionárias de energia elétrica, onde foram considerados os efeitos eletromagnéticos gerados pelos cabos condutores a uma altura mínima e o ruído audível com os cabos sob chuva forte. Com o objetivo de se verificar as possibilidades de redução adicional dos efeitos eletromagnéticos gerados pela linha de transmissão de 345 kV e consequente redução da largura de faixa, é apresentada no item 3.4.1 uma análise comparativa desses efeitos para os cabos condutores com alturas mínima e média, com mais de um condutor por fase. São verificados também os níveis de ruído audível gerados pela LT quando os cabos condutores encontram-se sob chuva forte ou molhados.

### **3.4 ANÁLISE DO PERFIL LATERAL DOS EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS - CASOS ESPECÍFICOS**

#### **3.4.1 ANÁLISE DA ALTURA MÍNIMA E MÉDIA DOS CONDUTORES E NÚMERO DE CONDUTORES POR FASE NO PERFIL LATERAL DA LT 345 KV**

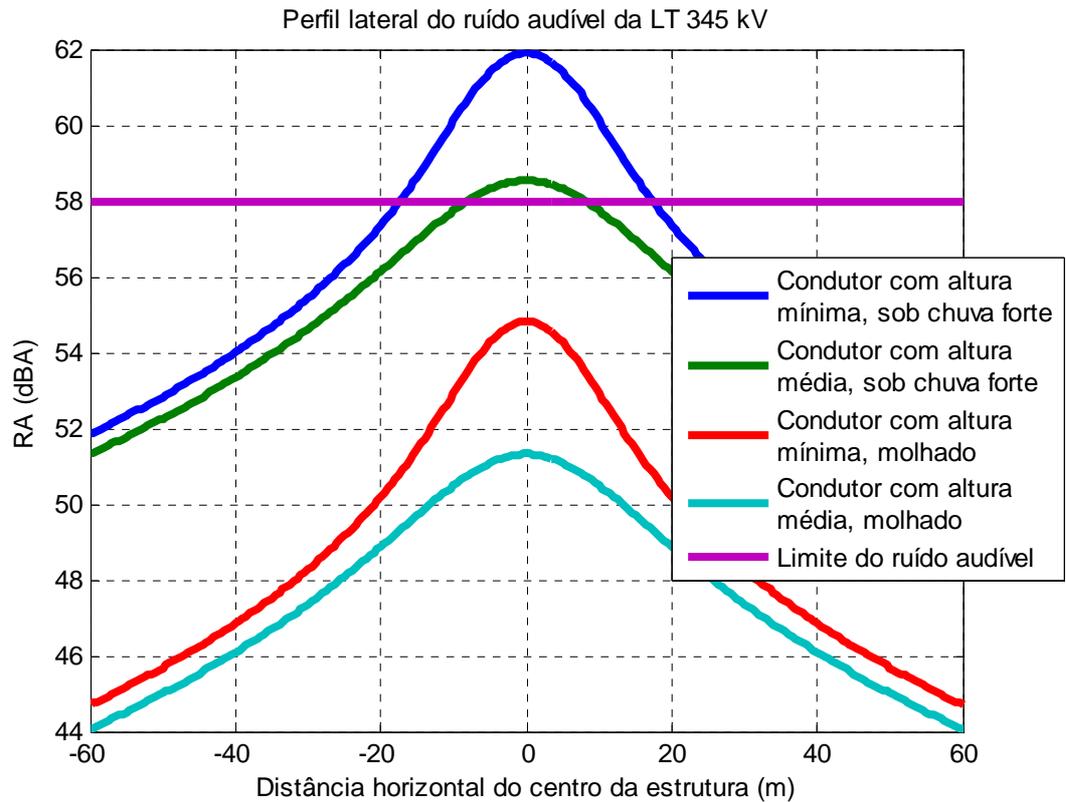
Apresenta-se, nas Figuras 3.31, 3.32 e 3.33, o perfil lateral do campo elétrico, do ruído audível (sob chuva forte e condutor molhado) e da rádio interferência, para o cabo condutor da LT 345 kV a uma altura média e mínima, de 15 e 8 metros, respectivamente, correspondentes à uma estrutura com 30 metros de altura e flecha do condutor de 22 metros. São observadas nessas figuras, grandes diferenças nos níveis desses efeitos eletromagnéticos quando o cálculo é feito considerando-se o condutor a uma altura média comparado à altura mínima.

A Figura 3.31 apresenta o perfil lateral do campo elétrico proporcionado por uma LT de 345 kV, considerando os cabos condutores a uma distância mínima e média do solo. Observa-se que o condutor a uma altura média do solo não produz elevado nível de campo elétrico.



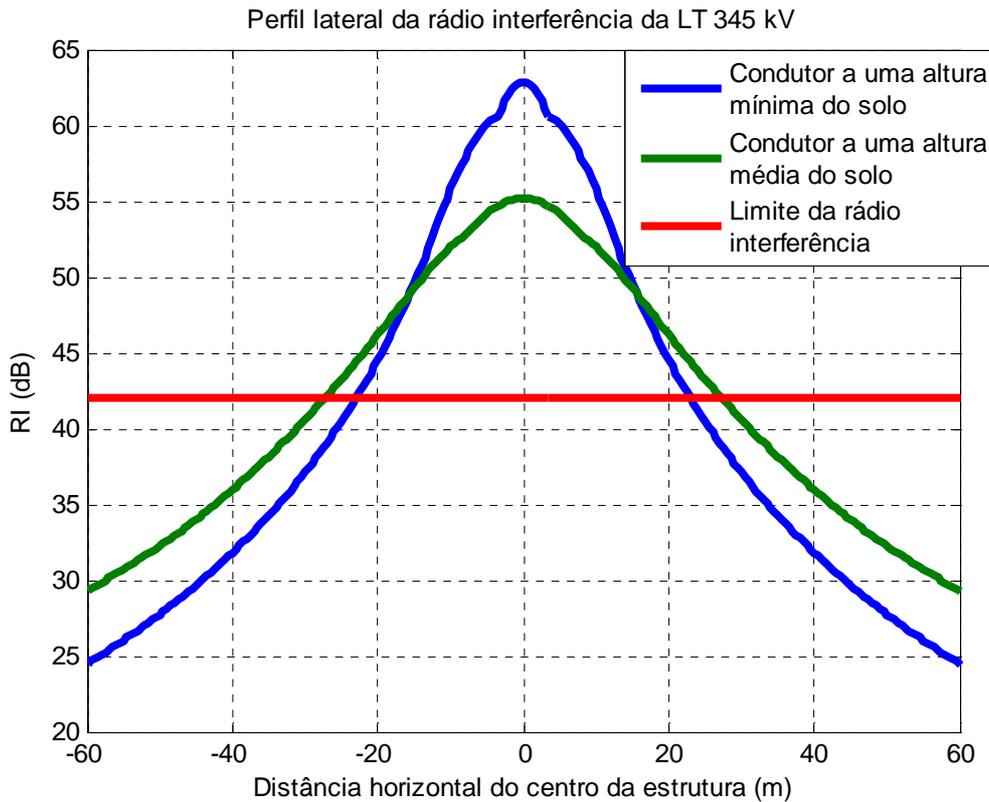
**Figura 3.31 - Perfil lateral do campo elétrico da LT 345 kV, caso específico, para o cabo com altura mínima e média.**

A Figura 3.32 apresenta o perfil lateral do ruído audível para a LT 345 kV considerando o cabo condutor a uma altura mínima e média, podendo o mesmo encontrar-se molhado ou sob chuva forte. Observa-se que o ruído audível proporcionado pelo condutor sob chuva forte é significativamente maior quando o cabo se encontra molhado, para a mesma ou diferente altura considerada do condutor. Nota-se que a menor emissão do ruído audível é para o condutor a uma altura média, encontrando-se molhado e a condição mais severa é para o condutor sob chuva forte, considerando-o a uma altura mínima do solo.



**Figura 3.32 - Perfil lateral do ruído audível da LT 345 kV, caso específico, para o cabo com altura mínima e média, sob chuva forte e molhado.**

A Figura 3.33 apresenta a diferença do perfil lateral da rádio interferência de uma LT 345 kV quando se considera o cabo condutor a uma altura mínima e média. Como pode ser visto, o limite da rádio interferência intercepta o perfil lateral na parte inferior, proporcionando uma maior largura de faixa de segurança para os cabos condutores a uma altura média do solo.



**Figura 3.33 - Perfil lateral da rádio interferência da LT 345 kV, caso específico, para o cabo com altura mínima e média.**

Conforme os resultados apresentados nas Figuras 3.32 e 3.33, a LT de 345 kV em estudo, com 2 condutores por fase, demanda uma largura de faixa de segurança de aproximadamente 40 metros, seja por causa do ruído audível ou pela rádio interferência, para os cabos condutores a uma altura mínima.

Nas Figuras 3.34 e 3.35, apresenta-se o perfil lateral do ruído audível e da rádio interferência, para a LT com 2, 3 e 4 condutores por fase, para o condutor a uma altura mínima do solo (condição mais crítica). Observa-se que a largura de faixa de segurança de aproximadamente 40 metros, exigida pelo ruído audível ou pela rádio interferência, quando se tem a utilização de 2 condutores por fase, pode ser reduzida ainda mais com a utilização de 3 ou 4 condutores por fase.

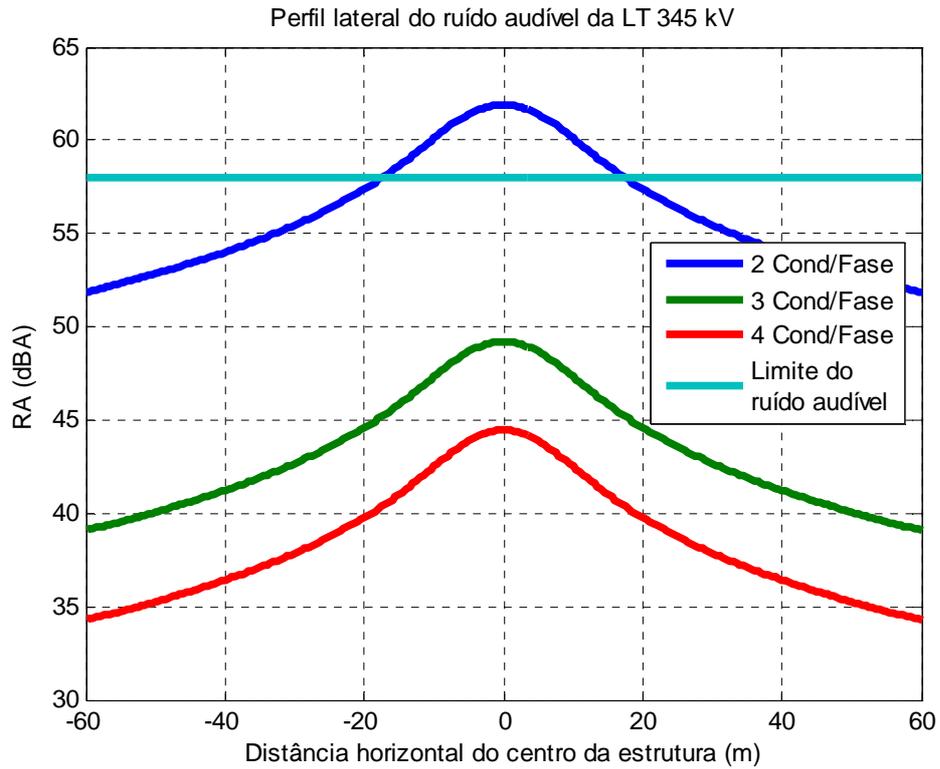


Figura 3.34 - Perfil lateral do ruído audível da LT 345 kV, para o cabo com altura mínima e diferentes condutores por fase.

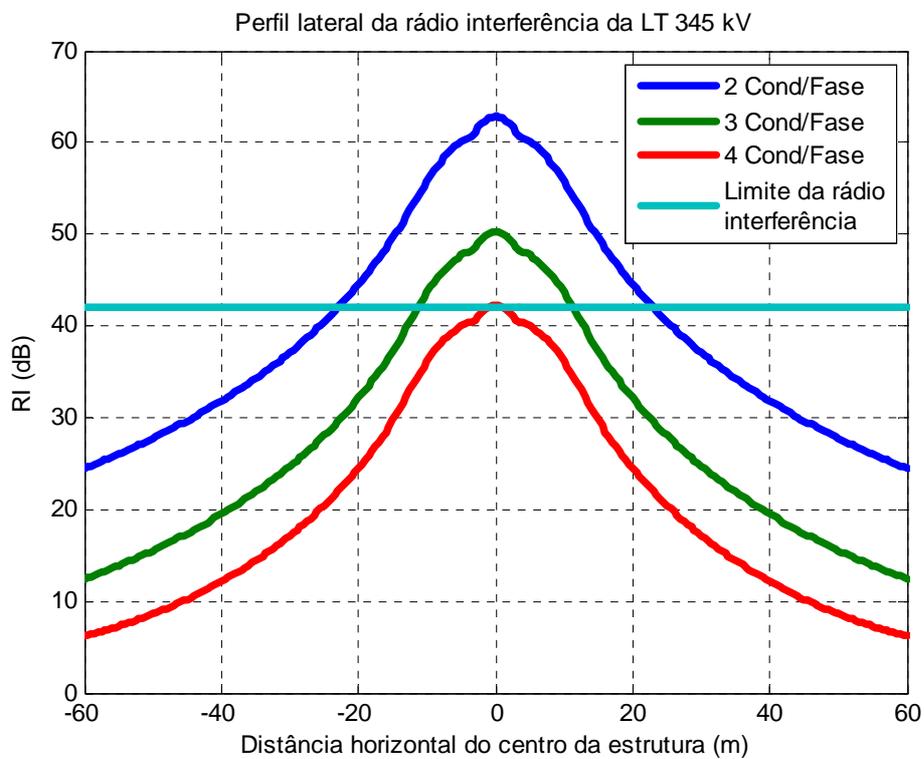


Figura 3.35 - Perfil lateral da rádio interferência da LT 345 kV, para o cabo com altura mínima e diferentes condutores por fase.

### **3.4.2 ANÁLISE DO PERFIL LATERAL DA RÁDIO INTERFERÊNCIA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA ALTURA DA ESTRUTURA**

Este item tem como objetivo apresentar as justificativas do aumento da largura da faixa de segurança, para as LTs 230 e 345 kV, em função do aumento da altura estrutura, exigida pela rádio interferência, conforme resultados apresentados nas Figuras 3.6 e 3.7, uma vez que para a LT 138 kV (apresentados na Figura 3.5), o aumento da altura da estrutura provoca uma diminuição da largura de faixa de segurança exigida por esse mesmo efeito eletromagnético. É de se esperar que o aumento da altura da estrutura proporcione uma diminuição da largura de faixa de segurança, uma vez que os cabos condutores encontram-se mais distantes do ponto de observação e conseqüentemente provocam um menor nível de emissão do efeito eletromagnético nesse ponto.

A Figura 3.36 apresenta o perfil lateral da rádio interferência da LT 138 kV para as estruturas com alturas de 15, 20 e 25 metros. Observa-se que o limite da rádio interferência de 42 dB intercepta a parte superior do perfil lateral, onde se nota uma menor largura de faixa de segurança para a maior altura de estrutura.

Já a Figura 3.37 apresenta o perfil lateral da rádio interferência da LT 345 kV, considerando-se as estruturas com as alturas de 25, 30 e 35 metros. Nota-se que o limite da rádio interferência intercepta o perfil lateral na parte inferior, onde se tem a maior largura de faixa de segurança para a maior altura de estrutura. A interseção do limite da rádio interferência na parte inferior do perfil lateral acontece também para a LT 230 kV, motivo pelo qual não foi apresentado o seu resultado neste item.

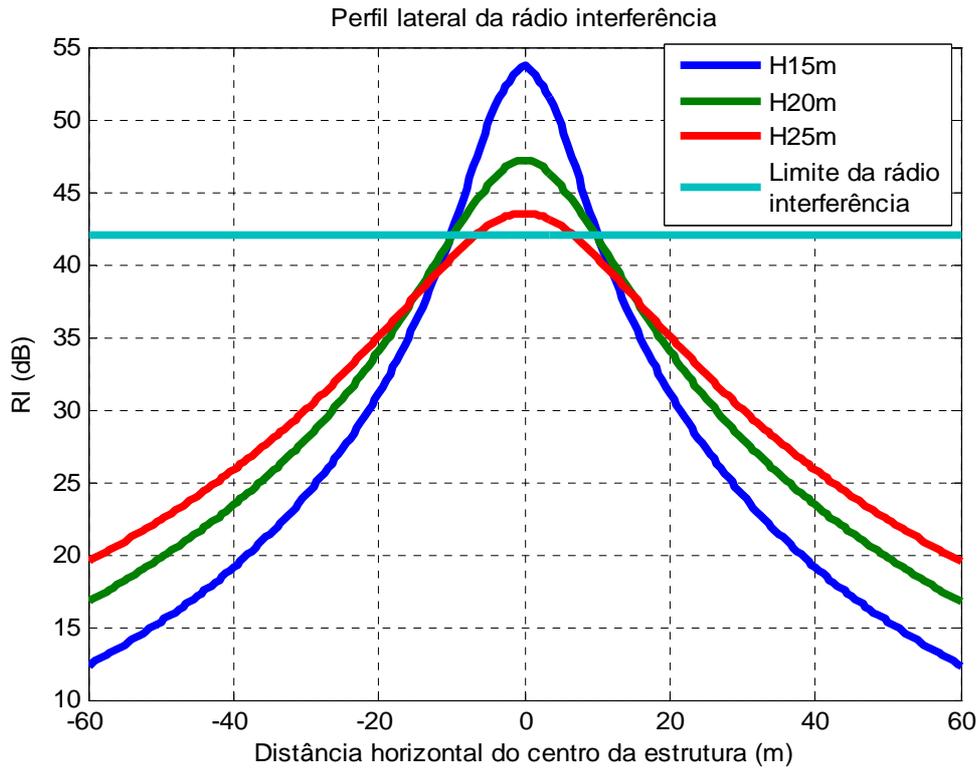


Figura 3.36 – Perfil lateral da rádio interferência da LT 138 kV, com as alturas de estruturas 15, 20 e 25m.

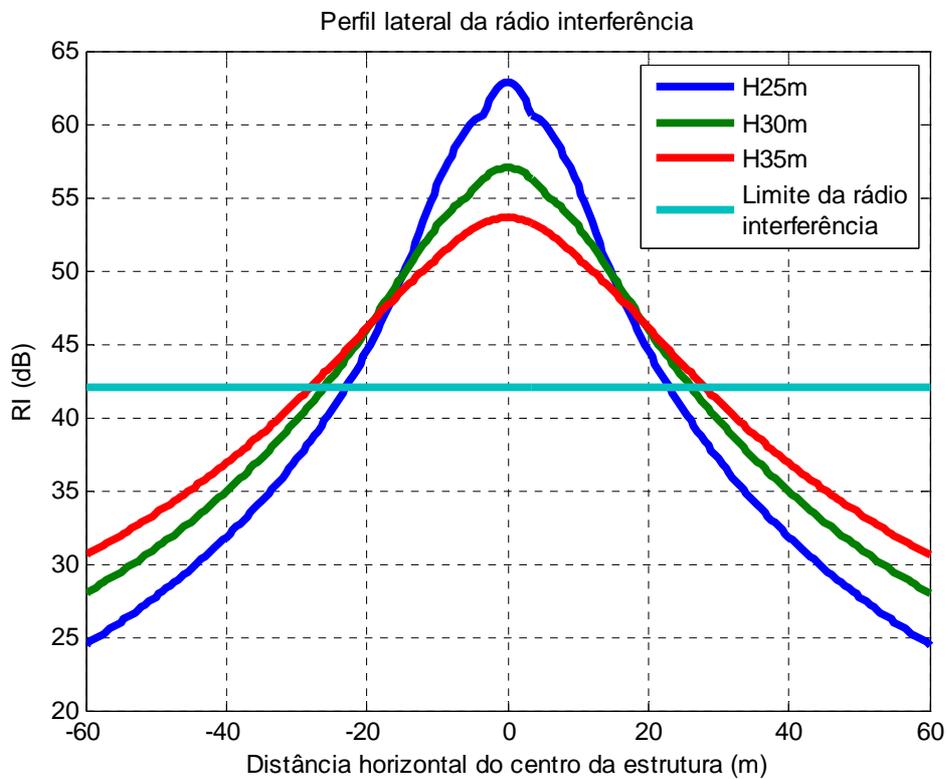


Figura 3.37 – Perfil lateral da rádio interferência da LT 345 kV, com as alturas de estruturas 25, 30 e 35m.

### **3.4.3 ANÁLISE DO PERFIL LATERAL DA RÁDIO INTERFERÊNCIA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA DISPOSIÇÃO DOS CABOS**

Este capítulo apresenta uma análise mais detalhada dos resultados mostrados no item 3.3.5 onde se tem as larguras de faixa de segurança para as LTs 138, 230 e 345 kV, para as diferentes disposições (vertical, horizontal e triangular) dos cabos condutores. Aqui é mostrado o motivo pelo qual a disposição vertical não é recomendável para a LT 345 kV, mas para a LT 230 kV e principalmente para a LT 138 kV essa disposição é muito aplicável, conforme perfil lateral apresentado nas Figuras 3.38, 3.39 e 3.40.

O perfil lateral da rádio interferência da disposição vertical, apresentado nas Figuras 3.38, 3.39 e 3.40, não apresenta simetria em relação ao centro da estrutura devido aos cabos condutores estarem dispostos em apenas um lado da estrutura, conforme mostrado na Figura 2.10.

Na Figura 3.38 observa-se que a disposição triangular, na LT 138 kV, exige uma menor largura de faixa de segurança quando se comparada com as demais disposições dos cabos condutores. Já para a LT 230 kV, é pequena a diferença das larguras de faixa de segurança para as disposições analisadas, conforme resultado apresentado na Figura 3.39. Mas, através do perfil lateral apresentado na Figura 3.40, observa-se que a disposição triangular não é recomendável para se implantar em uma linha de 345 kV, face à maior largura de faixa de segurança exigida pela rádio interferência.

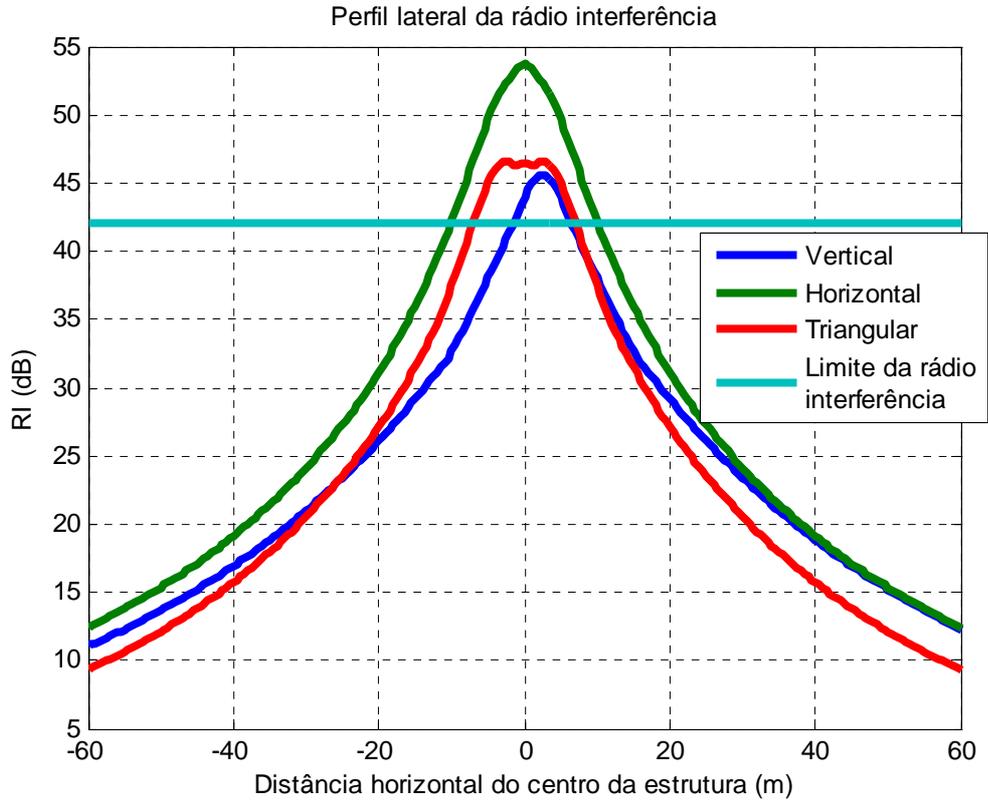


Figura 3.38 – Perfil lateral da rádio interferência da LT 138 kV, para as diferentes disposições dos cabos.

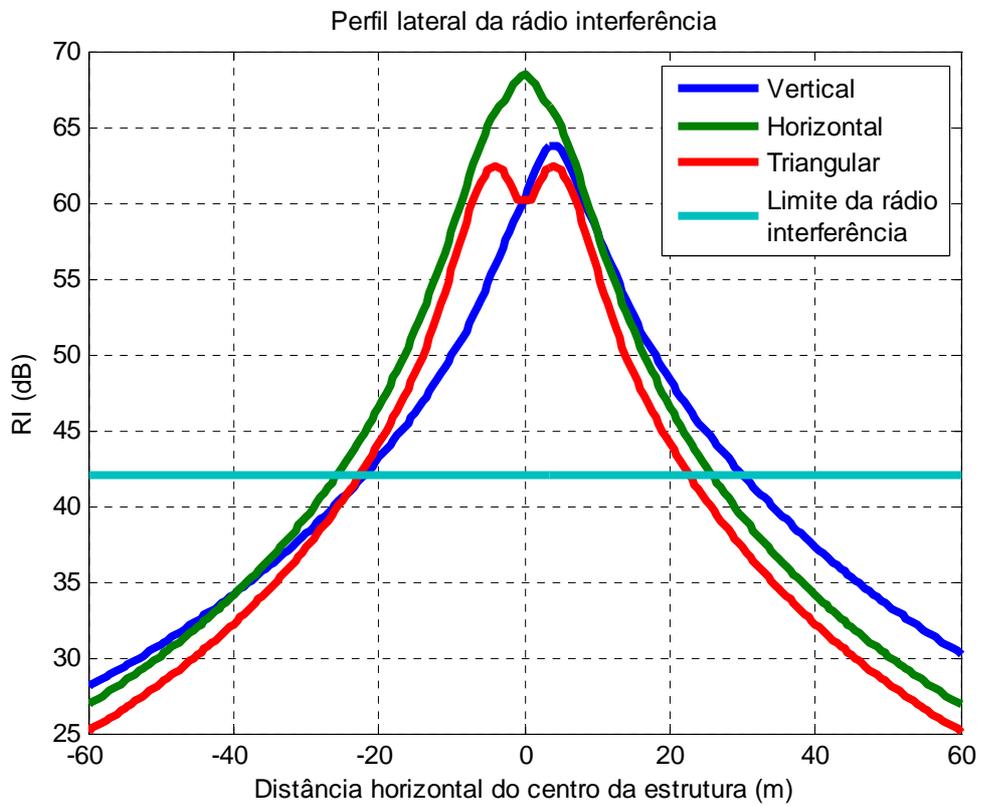


Figura 3.39 – Perfil lateral da rádio interferência da LT 230 kV, para as diferentes disposições dos cabos.

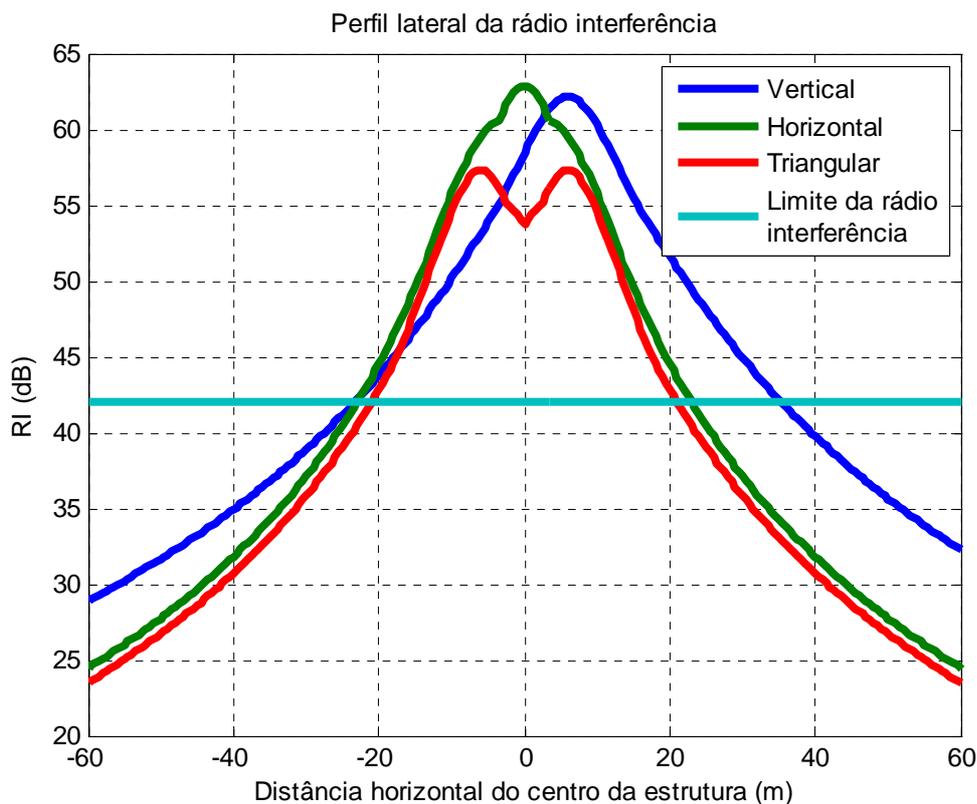


Figura 3.40 – Perfil lateral da rádio interferência da LT 345 kV, para as diferentes disposições dos cabos.

### 3.4.4 ANÁLISE DO PERFIL LATERAL DA RÁDIO INTERFERÊNCIA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO TIPO DE LT

Este item apresenta o resultado do perfil lateral da rádio interferência, efeito eletromagnético determinante da largura de faixa de segurança para os diferentes tipos de LT, para os três níveis de tensão analisados, a fim de se justificar o motivo do tipo de LT compacta, para as linhas de 230 e 345 kV, apresentar largura de faixa de segurança maior que a largura da linha convencional, conforme resultados apresentados no item 3.3.6.

A Figura 3.41 mostra o perfil lateral da rádio interferência da LT 138 kV, convencional e compacta. Nota-se que o limite da rádio interferência intercepta a parte superior do perfil lateral, proporcionando uma largura menor da faixa para a linha do tipo compacta.

O limite da rádio interferência intercepta o perfil lateral da rádio interferência da LT 345 kV na parte inferior, conforme mostrado na Figura 3.42, semelhantemente para uma linha de 230 kV. Devido a essa posição de interseção do limite com o perfil lateral, a largura de faixa de segurança de uma LT 230 ou 345 kV compacta é maior que a largura de faixa de uma linha convencional.

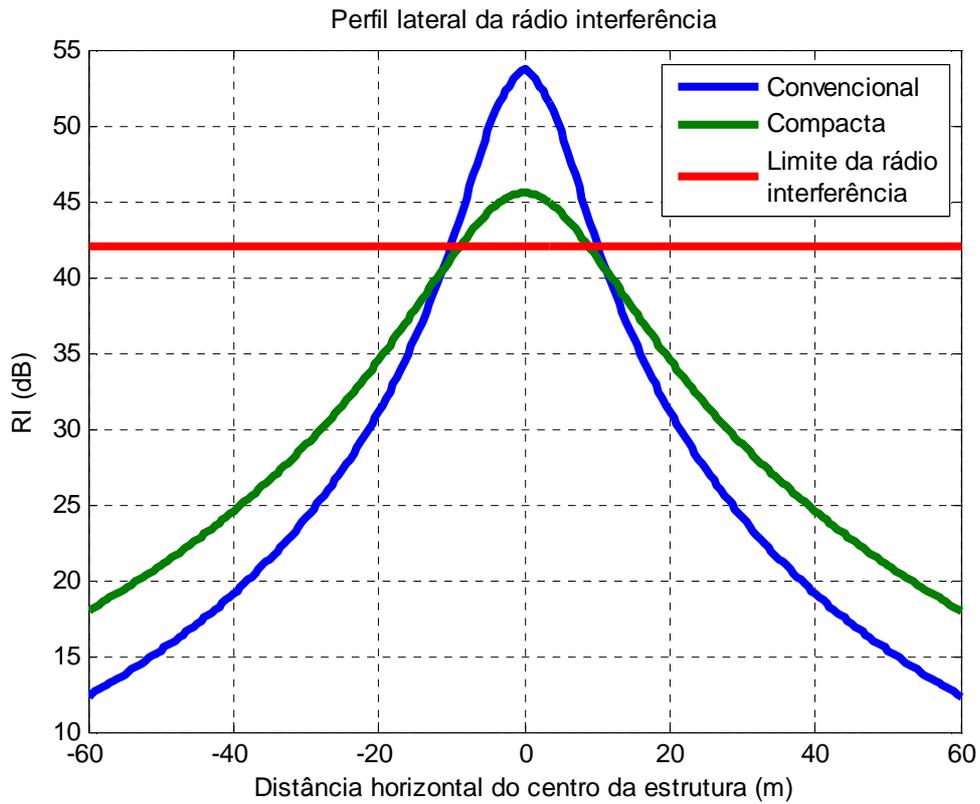


Figura 3.41 – Perfil lateral da rádio interferência da LT 138 kV, para os diferentes tipos de LT.

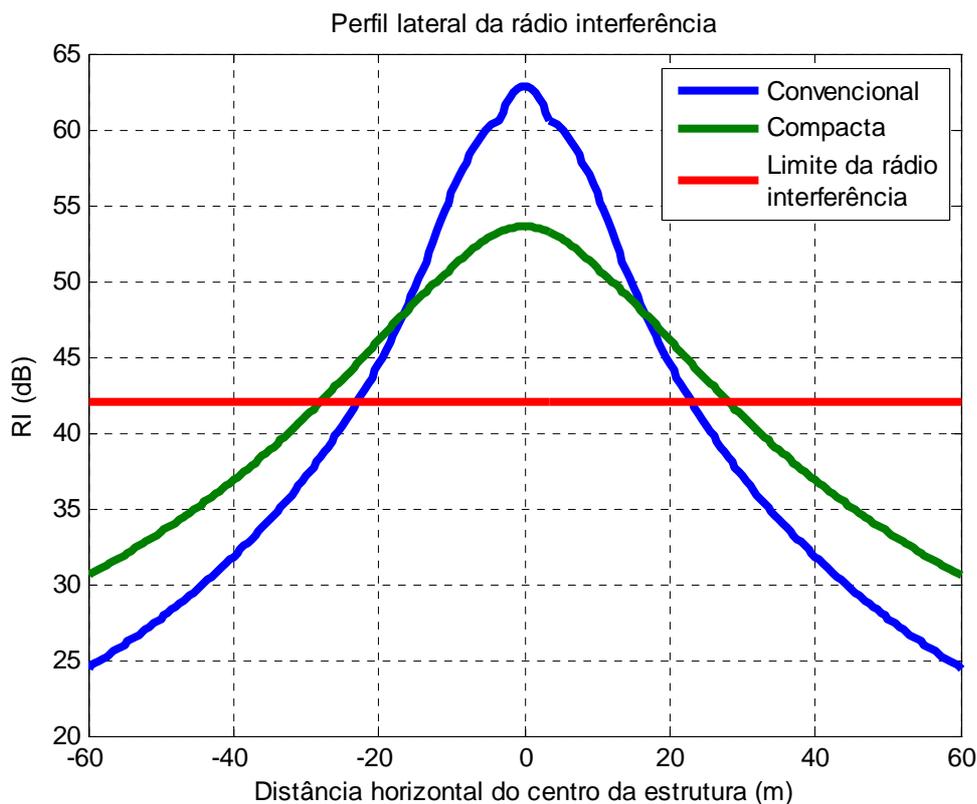


Figura 3.42 – Perfil lateral da rádio interferência da LT 345 kV, para os diferentes tipos de LT.

Os resultados apresentados neste capítulo mostram a diversidade de larguras de faixa de segurança para os parâmetros analisados das linhas de transmissão de 138, 230 e 345 kV. Os resultados apresentados mostram que alguns parâmetros tais como, comprimento de mísula, disposição e tipo de cabos condutores, são muito eficazes na otimização da largura de faixa de segurança de LT 138 kV, mas para a linha de 230 kV todos os parâmetros analisados influenciam na alteração da largura de faixa. Já a linha de 345 kV, apresenta expressivas alterações na largura de faixa de segurança quando se tem mudança do número de condutores por fase. Por outro lado, alguns efeitos eletromagnéticos, como o ruído audível e a rádio interferência, associados ao balanço dos cabos condutores, são os fatores determinantes na largura de faixa. O próximo capítulo apresenta com mais detalhes as conclusões obtidas de todo o trabalho realizado.

## 4 CONCLUSÕES

### 4.1 CONCLUSÕES

Este trabalho analisou a influência de diferentes parâmetros de linhas de transmissão (altura da estrutura, tipo do cabo condutor, relação de vão de peso e vão de vento, comprimento da mísula, disposição dos cabos condutores, tipo de linha, número de circuitos, número de condutores por fase e flecha do cabo condutor) na determinação de sua largura de faixa de segurança. Foram considerados os efeitos do campo elétrico, do campo magnético, do ruído audível, da rádio interferência e do balanço dos cabos condutores. Os resultados mostram que os parâmetros analisados apresentam comportamentos diferentes para obtenção da largura de faixa de segurança para cada nível de tensão da LT e que há indícios que as larguras de faixa de segurança, em função do nível de tensão da LT, atualmente aplicadas pelas concessionárias podem estar sub ou super dimensionadas.

As linhas de transmissão de 138, 230 e 345 kV, nas diferentes configurações analisadas, não apresentam níveis elevados de campo elétrico e de campo magnético, que justifiquem a utilização apenas desses efeitos eletromagnéticos para se determinar a largura de faixa de segurança da LT. Os resultados apresentados mostram o quanto é importante analisar o ruído audível, a rádio interferência e o balanço dos cabos, adicionalmente à análise dos campos elétrico e magnético, na determinação da largura de faixa de segurança, independentemente do nível de tensão da LT e do parâmetro a ser utilizado.

A consideração da altura mínima cabo-solo resulta em níveis de emissão de efeitos eletromagnéticos maiores quando comparado à altura média. As normas e resoluções vigentes não estipulam a altura em que se deve considerar os cabos condutores para se determinar a largura da faixa de segurança e os órgãos brasileiros e as concessionárias nacionais de energia

elétrica exigem, para uma determinada LT, apenas uma largura de faixa de segurança. Sendo assim, cabe ao projetista da LT escolher entre o critério mais conservador (a utilização da altura mínima do cabo) ou o mais econômico (a utilização da altura média), a altura a ser considerada para se determinar a largura de faixa de segurança. Os resultados da comparação do uso da altura mínima versus a altura média mostraram diferenças de até 57% na largura de faixa.

A rádio interferência e o balanço dos cabos condutores são os fatores determinantes na largura de faixa de segurança de uma linha de transmissão de 138 kV. A largura de faixa, determinada por esses critérios, é influenciada significativamente quando se tem alteração do comprimento da mísula, da disposição e dos tipos de cabos condutores.

O critério determinante da largura de faixa de segurança de uma linha de transmissão de 230 kV, para qualquer parâmetro considerado, é a rádio interferência. Portanto, a largura de faixa determinada por esse efeito eletromagnético, será maior que as faixas exigidas pelos demais efeitos e pelo balanço do cabo condutor. Para esse nível de tensão, a largura de faixa de segurança sofre grande alteração quando se tem variação em qualquer um dos parâmetros analisados nesta dissertação.

O ruído audível e a rádio interferência são os critérios determinantes da largura de faixa de segurança de uma linha de transmissão de 345 kV. Todos os parâmetros considerados neste trabalho influenciam na largura de faixa da linha com esse nível de tensão, mas ressalta-se que o número de condutores por fase proporciona um maior impacto na emissão desses efeitos eletromagnéticos.

De uma forma geral, os efeitos do ruído audível e da rádio interferência, associados ao balanço dos cabos condutores, são determinantes na largura de faixa de segurança de uma linha de transmissão, os quais devem ser tratados com mais rigor e critério. Mas, caso a

legislação em vigor sofra, no futuro, alteração dos limites dos efeitos eletromagnéticos considerados neste trabalho, os efeitos do campo elétrico ou do campo magnético poderão passar a ser determinantes na largura de faixa de segurança.

Uma prática muito comum utilizada em regiões onde se tem espaço reduzido para implantação de linha de transmissão é a aplicação do tipo de LT compacta. Conforme resultados apresentados neste trabalho, considerando os casos base assumidos para o estudo, tal método é viável apenas para o nível de tensão de 138 kV. Para os níveis de 230 e 345 kV, a emissão de rádio interferência exige larguras elevadas de faixa de segurança para esse tipo de LT. Sendo assim, a aplicação de linhas compactas não pode se resumir a apenas redução de vãos, mas sim a utilização de parâmetros ideais para este tipo de linha.

A particularidade de cada linha de transmissão evidencia o grau de importância da determinação e do dimensionamento adequado da largura de faixa de segurança das LTs, conforme resultados das análises realizadas nesta dissertação.

## **4.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE**

Os resultados apresentados nesta dissertação mostram a particularidade da largura de faixa de segurança exigida pelos efeitos eletromagnéticos e pelo balanço dos cabos condutores, para os três níveis de tensão analisados. Desta forma, como proposta de continuidade dos trabalhos, poderá ser analisada a influência dos parâmetros das linhas de transmissão de 69, 500 e 750 kV, na largura de faixa de segurança.

Durante a elaboração da revisão bibliográfica foi constatada uma grande diversidade de trabalhos que abordam métodos de cálculos dos efeitos dos campos elétrico e magnético, do ruído audível, da rádio interferência e do balanço dos cabos condutores. Uma proposta de continuidade deste trabalho é avaliar as diferenças entre os métodos apresentados nesta dissertação com os demais disponibilizados na literatura.

A largura da faixa de segurança determinada nesta dissertação é obtida utilizando-se informações em fase de projeto, pois nesta etapa a linha de transmissão não se encontra implantada. A realização de medições dos efeitos eletromagnéticos, no limite de faixa de segurança, após a construção e energização da LT, proposta de continuidade deste trabalho, tem como objetivo verificar a consistência das premissas e considerações realizadas no estágio de projeto da LT para se validar o cálculo da largura da faixa de segurança.

A análise da influência dos cabos condutores na largura da faixa de segurança foi obtida utilizando-se cabos condutores comuns, típicos, aplicados em linhas de transmissão de 138, 230 e 345 kV. Outra proposta de continuidade deste trabalho é a análise de cabos especiais, principalmente na influência dos tipos convencional e compacta da LT, na determinação da largura de faixa de segurança.

Outra proposta de continuidade deste trabalho é a análise dos parâmetros considerados nesta dissertação para linhas paralelas, seja para o mesmo nível de tensão ou diferente, com necessidade de faixas de segurança contíguas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NBR-5422, “Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica - Procedimento”, ABNT, Março, 1985.
- [2] ONS, “Requisitos Mínimos para Linhas de Transmissão”, Procedimentos de Rede Submódulo 2.4.
- [3] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, “Resolução Normativa No 398, de 23 de março de 2010.
- [4] Roni, S.M. “Identificação e análise de problemas no cálculo da faixa de segurança de linhas aéreas de transmissão“ XV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu, Paraná-Brasil, 1999.
- [5] CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais, “Roteiro para determinação da Velocidade do Vento de Projeto e Ângulo de Balanço das Cadeias de Isoladores e Cabos no Meio do Vão”, 3000-OT/PL3-2848a, de 06 de junho de 2003.
- [6] CELG, Companhia Energética de Goiás, “Especificação Técnica para Limitação do Uso de Faixa de Linhas de Subtransmissão e Transmissão da CELG PAR – 69 kV, 138 kV e 230 kV”, LTP-AA1.039/00, setembro de 2010.
- [7] CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista; “Largura de Faixa de Passagem”; Disponível em: <<http://www.portaldaconstrucao.com.br/ctEEP/ctEEP4x.html>> Acesso em: 14 nov.
- [8] EPTE - Engenharia e Planejamento em Transmissão de Energia; "Faixas de linha de transmissão"; Disponível em: <<http://www.epTE.com.br/faixa.html>> Acesso em: 14 nov. 2012.
- [9] Y. Liao, L. Hou, L. Wang, Z. Guan, Y. Zhang, and P. Zhu, "Included Angle Selection of V-Shape Insulator String for 750 kV Compact Transmission Line, " IEEE Transaction Power Delivery, vol. 26, NO. 1, January 2011.
- [10] B. Yan, X. Lin, W. Luo, Z. Chen, and Z. Liu, "Numerical Study on Dynamic Swing of Suspension Insulator String in Overhead Transmission Line Under Wind Load ," IEEE Transaction Power Delivery, vol. 25, NO. 1, January 2010.
- [11] General Electric Company and Electric Power Research Institute, “Transmission Line Reference Book, 345kV and Above,” Electric Power Research Institute, Palo Alto, California 1982.
- [12] IEEE Radio Noise Subcommittee Report, “Comparison of radio noise prediction methods with CIGRE/IEEE Survey Results”, to be recommended and approved in 1972.
- [13] Cristina S. “Influence analysis of the shielding grid parameters on right-of-way and on corona effects of an EHV 3-phase transmission line”, IEEE Generation, Transmission and Distribution, vol. 131, 1984.
- [14] A. Z. E. Dein; “The Effect of Compensating Conductors Parameters of 500kV Transmission Line on Right-of-Way and Corona”, 2010 7th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices.
- [15] F. Kiessling; P. Nefzger; U. Kaintzyk "Overhead Power Lines, Planning, Design, Construction", Power Systems
- [16] Boos, K. –V. ET al.: Experiences gained in the operation of multiple circuit high-voltage overhead lines of compact design. Cigré Report 22-12, 1986.
- [17] IEEE Committee Report, "CIGRE/IEEE Survey on Extra High Voltage Transmission Line Radio Noise," Paper No. T72 192-8, presented at the Winter Meeting, 1972, in New York, New York.

- [18] G. E. Guimarães, “Medições e cálculos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV”, defesa de mestrado UFMG, defendida em maio/2005.
- [19] P. A. Maruvada, A. Turgeon, D. L. Goulet; “Study of population exposure to magnetic fields due to secondary utilization of transmission line corridors”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10. No. 3, July 1995.
- [20] ICNIRP- International Commission on non-ionizing radiation protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz - 100 kHz). Health Physics vol. 99, pp 818-836, June 2010.
- [21] Ribeiro, F.F.; Luiz, B.B, José, M.P; “Manutenção da faixa de servidão da primeira linha de transmissão com parcela variável, utilizando como premissa básica a norma ABNT NBR 5422 – Uma experiência da Transmissão Paulista“ XIX SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2007.
- [22] A. Mehrtash; S. Afsharnia; M. A. Golkar; S. Kamalinia; H. Monsef “Assessment of overhead transmission line right of way standard deregulation in iran”, UPEC 2007, September 4-6, 2007, Brighton.
- [23] H. Jannat Alipour; S. Aminnejad; M. Jazaeri; “Decreasing the right of way of transmission lines by using towers with polymer insulation arms”, Powereng 2007, April 12-14, 2007, Setúbal, Portugal.
- [24] C. Gary, M. Moreau, "Predetermination of the RI Level of High-Voltage Transmission Lines: Part I - Predetermination of the Excitation Function" IEEE Paper No. 71 TP 66i presented at the Summer Meeting, Portland, Oregon, 1971.
- [25] C. Gary, M. Moreau, "Predetermination of the RI Level of High-Voltage Transmission Lines: Part II - Field Calculating Method" IEEE Paper No. 71 TP 662 presented at the Summer Meeting, Portland, Oregon, 1971.
- [26] G. K. Carter, G. W. Juette, K. W. Priest, "Calculation of the Radio Interference Statistics of Transmission Lines" IEEE Pica Conference Proceedings, p. 143, 1971.
- [27] Y. Sawada, "Calculating Method of Radio Noise Level and Its Application to Design of AC Power Transmission Line" IEEE Transactions (Power Apparatus and Systems) Vol. PAS-89, No. 5, pp. 844-853, May/June 1970.
- [28] W. E. Pakala, E. R. Taylor, Jr., "A Method for Analysis of Radio Noise on High-Voltage Transmission Lines" IEEE Transactions (Power Apparatus and Systems), Vol PAS-87, No. 2, pp. 334-345, Feb. 1968.
- [29] J. Reichman, J. R. Leslie, "A Summary of Radio Interference Studies Applied to EHV Lines" IEEE Transactions (Power Apparatus and Systems), Vol. 83, No. 3, pp. 223-228, March 1964.
- [30] Task force of the Corona and Field Effects Subcommittee "A Comparison of Methods for Calculating Audible Noise of High Voltage Transmission Lines" IEEE Transactions (Power Apparatus and Systems), Vol. PAS-101, No. 10, October 1982.
- [31] H. Kirkham, W. J. Gajdak, Jr., " A Mathematical Model of Transmission Line Audible Noise Part 1: Background and Model Development" IEEE Transactions (Power Apparatus and Systems), Vol. PAS-102, No. 3, March 1983.
- [32] H. Kirkham, W. J. Gajdak, Jr., " A Mathematical Model of Transmission Line Audible Noise Part 2: Comparison with Experiment" IEEE Transactions (Power Apparatus and Systems), Vol. PAS-102, No. 3, March 1983.