

0A	14/11/18	Emissão Inicial	VRA	KCAR	LNAG
Nº	Data	Natureza da Revisão	Elaborado	Verificado	Aprovado
			Sterlite São Francisco Energia S.A.		
Sterlite São Francisco Transmissão de Energia S.A.					
PROJETO BÁSICO – LOTE 7 – LEILÃO Nº02/2018 - ANEEL					
ELAB.	VERIF.	APROV.	RESP. TÉCNICO	CREA	DATA
VRA	KCAR	LNAG	CSF	2000119859	14/11/2018
TÍTULO					
DADOS CLIMATOLÓGICOS, VELOCIDADE DO VENTO E CARREGAMENTOS DEVIDOS AO VENTO					
Nº DOCUMENTO				FOLHA	REVISÃO
SF01818-LT-GNLT-G-RE-0003				1	0A

SUMÁRIO

1.	OBJETIVO	4
2.	LOCALIZAÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO	4
3.	CONSIDERAÇÕES GERAIS	4
4.	TEMPERATURAS.....	4
5.	ALTITUDE	4
6.	UMIDADE RELATIVA DO AR	4
7.	PRESSÃO ATMOSFÉRICA	5
8.	MASSA ESPECÍFICA DO AR	5
9.	DENSIDADE RELATIVA DO AR.....	5
10.	FATOR DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICO (FCA).....	5
11.	NÍVEL CERÁUNICO	5
12.	VELOCIDADE DO VENTO (VER ITEM 14).....	5
12.1	VENTO BÁSICO DE PROJETO	5
12.2	CÁLCULO ESTRUTURAL	6
12.3	CÁLCULO DOS ÂNGULOS DE BALANÇO DOS CONDUTORES	6
12.4	CÁLCULO DOS ÂNGULOS DE BALANÇO DOS PARA-RAIOS.....	6
13.	PRESSÕES DEVIDAS AO VENTO (VER ITEM 14)	6
13.1	CÁLCULO ESTRUTURAL	6
13.2	CÁLCULO DOS ÂNGULOS DE BALANÇO DOS CONDUTORES	7
13.3	CÁLCULO DOS ÂNGULOS DE BALANÇO DOS PARA-RAIOS.....	7
14.	OBSERVAÇÕES COMPLEMENTARES SOBRE A AÇÃO DOS VENTOS.....	7
14.1	VENTO BÁSICO DE PROJETO	7
14.2	PERÍODOS DE RETORNO ADOTADOS	7
14.3	PRESSÃO EXERCIDA PELO VENTO	8
14.4	HIPÓTESE DE CARGAS PARA VENTO DE 10 MINUTOS (VENTO EXTREMO).....	8
14.5	HIPÓTESE DE CARGAS PARA VENTO DE 3 SEGUNDOS (VENTO DE TORMENTAS)	9
15.	REFERÊNCIAS	10

16. ANEXOS.....	11
ANEXO 1 - ELEMENTOS AMBIENTAIS PARA A LT 500 KV PORTO SERGIPE – OLINDINA – SAPEAÇU	12
ANEXO 2 – ISÓTACAS MÁXIMAS PARA A LT 500 KV PORTO SERGIPE – OLINDINA – SAPEAÇU	67

1. OBJETIVO

Apresentar os dados climatológicos e o mapeamento das variáveis climatológicas bem como os cálculos das velocidades de vento e correspondentes pressões de vento a serem adotados no projeto das LTs 500 kV, circuito simples, Porto Sergipe – Olindina, 180 km, e Olindina – Sapeaçu, 187 km, integrantes do lote 7 do Edital de Leilão nº02/2018 ANEEL.

As metodologias e as fontes dos dados utilizadas como referências para a definição dos valores adotados no projeto e as bases dos dados considerados estão apresentadas nos Anexos a este relatório.

2. LOCALIZAÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

As linhas de transmissão em estudo interligam as seguintes subestações:

Subestação	Localização	Latitude	Longitude
SE Porto Sergipe	SE	10°48'53.45"S	36°56'20.05"O
SE Olindina	BA	11°19'06.13"S	38°23'03.39"O
SE Sapeaçu	BA	12°43'01.78"S	39°11'07.95"O

3. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nos Anexos 1 e 2, elaborados pela BATÁVIA Engenharia, empresa de consultoria externa, estão indicados os elementos climáticos e ambientais para as linhas de transmissão, bem como as velocidades do vento e as correspondentes pressões e as metodologias de cálculo. Nos itens a seguir, serão resumidos os principais dados climáticos, velocidades e pressões devidas ao vento para as LTs em estudo.

4. TEMPERATURAS

	LT 500 kV Porto Sergipe - Olindina	LT 500 kV Olindina - Sapeaçu
Média (EDT – “everyday temperature”)	25 °C	24 °C
Máxima média	30 °C	30 °C
Máxima absoluta	40 °C	40 °C
Mínima absoluta	10 °C	10 °C
Média das mínimas (coincidente com o vento máximo)	20 °C	20 °C

5. ALTITUDE

Para o projeto em questão adotou-se uma altitude média de 150 m para a LT 500 kV Porto Sergipe – Olindina e 260 para a LT 500 kV Olindina - Sapeaçu.

6. UMIDADE RELATIVA DO AR

	LT 500 kV Porto Sergipe - Olindina	LT 500 kV Olindina - Sapeaçu
Média anual	76 %	75 %

7. PRESSÃO ATMOSFÉRICA

	LT 500 kV Porto Sergipe - Olindina	LT 500 kV Olindina - Sapeaçu
Média anual	995 mbar	985 mbar

8. MASSA ESPECÍFICA DO AR

LT 500 kV Porto Sergipe - Olindina		
Valor a 20 °C e altitude de 150m	1,184 kg/m ³	
LT 500 kV Olindina - Sapeaçu		
Valor a 20 °C e altitude de 260m	1,169 kg/m ³	

9. DENSIDADE RELATIVA DO AR

	LT 500 kV Porto Sergipe - Olindina	LT 500 kV Olindina - Sapeaçu
DRA 50%	0,96	0,95
Valor mínimo 90% do tempo, para as condições atmosféricas predominantes na região	0,94	0,93

10. FATOR DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICO (FCA)

	LT 500 kV Porto Sergipe - Olindina	LT 500 kV Olindina - Sapeaçu
FCA _{60 Hz} 50%	1,03	1,01
FCA _{60 Hz} 99%	1,00	0,97
FCA _{man} 50%	1,01	1,00
FCA _{man} 90%	1,00	0,98

11. NÍVEL CERÁUNICO

	LT 500 kV Porto Sergipe - Olindina	LT 500 kV Olindina - Sapeaçu
Densidade de descargas atmosféricas (descargas/km ² /ano) (1)	3	3
Número de dias com trovoadas por ano (5)	32	32

12. VELOCIDADE DO VENTO (VER ITEM 14)
12.1 VENTO BÁSICO DE PROJETO

	LT 500 kV Porto Sergipe - Olindina	LT 500 kV Olindina - Sapeaçu
Vento básico de projeto, T = 50 anos, 10 min, 10 m, cat.B	80 km/h	80 km/h

12.2 CÁLCULO ESTRUTURAL

	LT 500 kV Porto Sergipe - Olindina	LT 500 kV Olindina - Sapeaçu
Vento extremo, T = 250 anos, 10 min, 10 m, cat.B	95 km/h	95 km/h
Vento de tormentas elétricas, T = 250 anos, 3 s, 10 m, cat B	165 km/h	165 km/h

12.3 CÁLCULO DOS ÂNGULOS DE BALANÇO DOS CONDUTORES

	LT 500 kV Porto Sergipe - Olindina	LT 500 kV Olindina - Sapeaçu
Vento para T = 2 anos, 30 s, 29 m, cat. B	21,42 m/s	21,42 m/s
Vento para T = 50 anos, 30 s, 29 m, cat. B	33,67 m/s	33,67 m/s

12.4 CÁLCULO DOS ÂNGULOS DE BALANÇO DOS PARA-RAIOS

	LT 500 kV Porto Sergipe - Olindina	LT 500 kV Olindina - Sapeaçu
Vento para T = 50 anos, 30 s, 38 m, cat. B	34,50 m/s	34,50 m/s

13. PRESSÕES DEVIDAS AO VENTO (VER ITEM 14)
13.1 CÁLCULO ESTRUTURAL

Vento extremo (250 anos, 10 min)	LT 500 kV Porto Sergipe - Olindina	LT 500 kV Olindina - Sapeaçu
Pressão dinâmica de referência	43 kgf/m ²	42 kgf/m ²
Atuando nos condutores $h_{med}=29$ m ($G_C = 2,2332$)	88 kgf/m ²	86 kgf/m ²
Atuando nos para-raios $h_{med}=38$ m ($G_C = 2,3341$)	92 kgf/m ²	90 kgf/m ²
Atuando nos isoladores $h_{med}=47$ m ($G_T = 2,5280$)	131 kgf/m ²	128 kgf/m ²
Atuando nas estruturas, a 10 m de altura ($G_T = 1,936$)	83,2 kgf/m ²	81,3 kgf/m ²

Vento de tormentas elétricas (250 anos, 3 s)	LT 500 kV Porto Sergipe - Olindina	LT 500 kV Olindina - Sapeaçu
Pressão dinâmica de referência	127 kgf/m ²	126 kgf/m ²
Atuando nos condutores e para-raios	32 kgf/m ²	32 kgf/m ²
Atuando nos isoladores	153 kgf/m ²	152 kgf/m ²

baixa a probabilidade de que um surto de manobra e ventos de extrema intensidade ocorram simultaneamente.

Para cálculo do balanço de cabos e cadeias associado à definição da largura da faixa de servidão está sendo adotada velocidade do vento com período de retorno de 50 anos, conforme Edital. A conversão dos valores indicados da altura do cabo de 10m para o cálculo dos ângulos de balanço e considerando a altura média dos condutores é obtida utilizando a seguinte expressão, conforme NBR 5422:

$$\frac{V_h}{V_{10}} = \left(\frac{h}{10}\right)^{\frac{1}{11}}$$

V_h Velocidade de vento na altura h (m)

V_{10} Velocidade de vento referida a 10 m de altura

14.3 PRESSÃO EXERCIDA PELO VENTO

Conforme as boas práticas correntes da engenharia de sistemas aéreos de transmissão, as LT de 500 kV serão projetadas para resistir, sem falhas, às cargas mecânicas produzidas por ventos com períodos de retorno de 250 anos / 10 minutos. Todas as cargas atuando nos cabos, cadeias de isoladores e estruturas são calculadas utilizando a metodologia constante da IEC 60826.

Adicionalmente, as estruturas serão dimensionadas para suportar ação de ventos de alta intensidade (tormentas) com tempo de média de 3 segundos, para fazer face às tempestades locais, como é prática largamente adotada no Brasil. Não existe, até a presente data, uma norma específica que regulamente claramente tais hipóteses de carregamento de forma homogênea. Até que essa lacuna seja preenchida, julga-se prudente que os seguintes termos sejam levados em consideração e adotados:

- Tendo em vista o elevado período de retorno (250 anos) adotado para as linhas de transmissão em estudo, resolveu-se definir a velocidade de vento para a hipótese de tormentas elétricas como 15% superior à velocidade do vento de rajadas. A tabela indicada no Anexo 2 já contempla esta correção.
- Como este tipo de vento tem frente estreita, se o mesmo atingir uma estrutura da linha de transmissão (caso mais desfavorável), atuará simultaneamente sobre um trecho significativamente reduzido dos cabos situados nos vãos adjacentes à estrutura afetada. De modo a levar em conta essa característica, a pressão de vento atuando sobre os cabos será multiplicada por um fator redutor igual a 0,25 (item 13.1 – vento de tormentas).
- O vento de tormentas não será corrigido para variações da altura de atuação.

14.4 HIPÓTESE DE CARGAS PARA VENTO DE 10 MINUTOS (VENTO EXTREMO)

As fórmulas seguintes foram reproduzidas da IEC 60826:

$$q_o = \frac{\frac{1}{2} * \tau * \mu * (K_R * V_{RB})^2}{9,81}$$

$$A_C = q_o * C_{xc} * G_C * G_L * d * L * \sin^2 \Omega$$

$$P_C = q_o * C_{xc} * G_C * G_L * \sin^2 \Omega$$

$$A_i = q_o * C_{xi} * G_i * S_i$$

$$P_i = q_o * C_{xi} * G_i$$

$$A_t = q_o * G_t * (1 + 0,2 * \sin^2 2\theta) * (S_{t1} * C_{xt1} * \cos^2 \theta + S_{t2} * C_{xt2} * \sin^2 \theta)$$

Nomenclatura

V_{RB}	velocidade de projeto referida a Terreno B (m/s)
K_R	fator que depende do tipo de terreno - A, B, C ou D (pu) (para terreno B: $K_R=1$)
q_o	pressão dinâmica de referência do vento (kgf/m^2)
C_x	coeficiente genérico de arrasto que depende da forma e das propriedades da superfície sobre a qual o vento atua (pu)
C_{xc}	= 1 para cabos
C_{xi}	= 1,2 para isoladores
C_{xt1} e C_{xt2}	= coeficiente de arrasto das fases 1 e 2 do painel em consideração, obtido da figura 7 da Norma IEC 60826
G_c	fator combinado do vento para cabos, que depende da altura e da categoria do terreno.
G_L	fator de vão obtido em função do vão adotado para cálculo.
G_i	fator de vento combinado obtido em função de altura média da cadeia de isoladores.
G_t	fator de vento combinado obtido em função da altura em relação ao solo do centro de gravidade do painel em consideração.
τ	correção da massa específica do ar em função da temperatura associada ao vento extremo ($^{\circ}\text{C}$) e da altitude (m)
μ	massa específica do ar (g/m^3)
d	diâmetro do cabo (condutor ou para-raios), em metros
L	comprimento do vão (m)
S_i	área da cadeia de isoladores (m^2)
S_{t1} e S_{t2}	área líquida das faces 1 e 2 do painel em coordenação (m^2)
Ω	ângulo entre a direção do vento e o condutor (graus)
A_c	cargas sobre os cabos condutores e para-raios (kgf)
P_c	pressão sobre os cabos condutores e para-raios (kgf/m^2)
A_i	cargas sobre as cadeias de isoladores (kgf)
P_i	pressão sobre as cadeias de isoladores (kgf/m^2)
A_t	cargas sobre as estruturas (kgf)
θ	ângulo de incidência da direção do vento com a perpendicular à face 1 do painel no plano horizontal (graus)

14.5 HIPÓTESE DE CARGAS PARA VENTO DE 3 SEGUNDOS (VENTO DE TORMENTAS)

Conforme item 14.3.b, a pressão do vento de tormentas atuando sobre os cabos será multiplicada por um fator redutor igual a 0,25.

Os cálculos de pressões seguem o seguinte modelo:

$$P_c = q_o * C_{xc} * \sin^2 \theta$$

$$P_i = q_o * C_{xi} * G_i$$

$$P_t = q_o * (1 + 0,2 * \sin^2 2\theta) * (S_{t1} * C_{xt1} * \cos^2 \theta + S_{t2} * C_{xt2} * \sin^2 \theta)$$

Hipótese de Cargas para Vento de 30 segundos (ângulos de balanço)

Os cálculos de pressões seguem o seguinte modelo:

$$P_c = q_o * C_{xc} * G_{alt}^2 * \sin^2 \Omega$$

$$P_i = q_o * C_{xi} * G_i$$

As correções de altura obedecem à seguinte formulação:

$$G_{alt} = \frac{V_h}{V_{10}} = \left(\frac{h}{10} \right)^{\frac{1}{11}}$$

V_h velocidade de vento na altura h (m)

V_{10} velocidade de vento referida a 10 m de altura

15. REFERÊNCIAS

- 1 Mapa de Densidade de Descargas Atmosféricas - Período de apuração:1998-2013, ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico - Emissão 30/09/2015
- 2 Projeto Básico LTs 500 kV, circuito simples, Porto Sergipe – Olindina e Olindina – Sapeaçu, CONDUTOR E PARA-RAIOS.
- 3 Projeto Básico LTs 500 kV, circuito simples, Porto Sergipe – Olindina e Olindina – Sapeaçu, ESTUDO MECÂNICO DO CONDUTOR E PARA-RAIOS.
- 4 Projeto Básico LTs 500 kV, circuito simples, Porto Sergipe – Olindina e Olindina – Sapeaçu, SÉRIES DE ESTRUTURAS E HIPÓTESES DE CARREGAMENTO.
- 5 IEEE 12.43 Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines

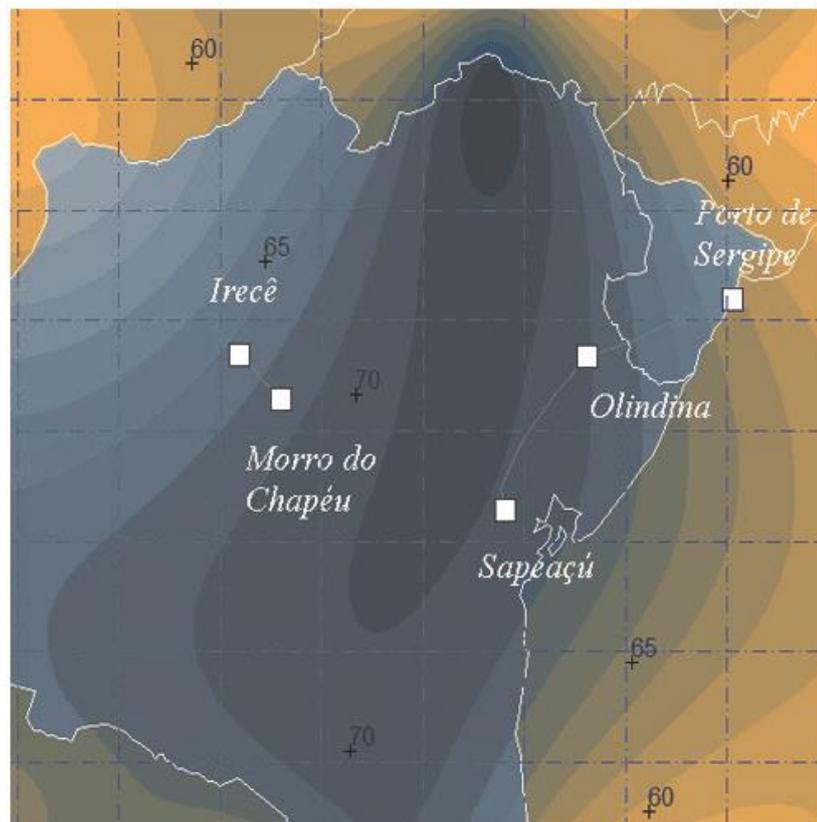
16. ANEXOS

ANEXO 1 - ELEMENTOS AMBIENTAIS PARA A LT 500 KV PORTO SERGIPE – OLINDINA – SAPEAÇU

Relatório Técnico

*Elementos Ambientais para as LTs
500 kV P Sergipe - Olindina - Sapeaçu
e 230 kV Morro do Chapéu - Irecê*

BATÁVIA
Engenharia



Preparado por Amauri A Menezes em 10/2018

Este Relatório Técnico apresenta o memorial descritivo para a determinação dos elementos climáticos relevantes na implantação da LT acima citada. A reprodução parcial ou total deste documento só deve ser feita com a permissão da BATÁVIA Engenharia

1	Objetivo	3
2	Conceituação Preliminar	5
3	Dados termométricos	6
4	Densidade Relativa do Ar e Fatores de Correção Atmosféricos	7
4.1	Valor médio da DRA e dos FCAs	7
4.2	Os desvios padrão da DRA e dos FCAs	9
5	Representação gráfica e mapeamento das variáveis	11
5.1	Densidades relativas do ar e “nível de tempo - ruim”	12
5.2	Fatores de Correção Atmosféricos	12
5.3	Umidades absolutas	13
5.3.1	Cálculo dos pontos de orvalho e de gelo	13
5.3.2	Cálculo das pressões de vapor	14
5.3.3	Cálculo das umidades absolutas	14
6	Conclusões e recomendações	14
7	Comentários finais	16
8	Referências	17
Anexo 1	Dados para determinação espacial da DRA e dos FCAs	18
Anexo 2	Características das estações do INMET	29
Anexo 3	Mapa das altitudes	33
Anexo 4	Mapa das pressões atmosféricas	34
Anexo 5	Mapas das temperaturas ambientes	35
Anexo 6	Mapas das densidades relativas do ar e de “tempo - ruim”	42
Anexo 7	Mapas dos fatores de correção atmosféricos	45
Anexo 8	Mapas das umidades do ar	51
Anexo 9	Mapas das temperaturas para amplitude sazonal	53

1 Objetivo

Este relatório quantifica as variabilidades espacial e temporal de fenômenos meteorológicos que têm interferências substanciais com as LTs

*Porto Sergipe - Olindina - Sapeaçu, C1, 500 kV, 387 km e
Morro do Chapéu - Irecê, C2 e C3, 230 kV, 67 km*

As variáveis aqui objetivadas ao longo da LT citada são as seguintes:

<i>Variáveis Ambientais</i>	<i>nomenclatura & unidades</i>
<i>altitude média</i>	<i>alt - metros</i>
<i>temperatura média</i>	<i>t_{med} - °C</i>
<i>temperatura mínima média anual</i>	<i>t_{min anual} - °C</i>
<i>temperatura mínima média no inverno</i>	<i>t_{min inv} - °C</i>
<i>temperatura mínima absoluta</i>	<i>t_{min abs} - °C</i>
<i>temperatura máxima média anual</i>	<i>t_{max anual} - °C</i>
<i>temperatura máxima média no verão</i>	<i>t_{max ver} - °C</i>
<i>temperatura máxima absoluta</i>	<i>t_{max abs} - °C</i>
<i>temperatura para verão- dia¹</i>	<i>VD - °C</i>

¹ Essas temperaturas atendem aos recentes requisitos para ampacidade sazonal, segundo a publicação da ONS - "Metodologia para Cálculo da Capacidade Sazonal de Projetos de Linhas de Transmissão s Serem Licitadas", junho de 2017, ONS

<i>temperatura para verão- noite</i>	$VN - ^\circ C$
<i>temperatura para inverno- dia</i>	$ID - ^\circ C$
<i>temperatura para inverno - noite</i>	$IN - ^\circ C$
<i>pressão atmosférica</i>	$p_{atm} - mbares$
<i>densidade relativa do ar (50 e 90 %)</i>	$DRA_{50\%} e$ $DRA_{90\%} - (pu)$
<i>fator de correção atmosférico, 60 Hz, (50 e 99 %)</i>	$FCA_{60Hz-50\%} e$ $FCA_{60Hz-99\%} - (pu)$
<i>fator de correção atmosférico, surtos de manobra (50 e 90 %)</i>	$FCA_{man50\%} e$ $FCA_{man90\%} - (pu)$
<i>fator de correção atmosférico, impulsos atmosféricos (50 e 90 %)</i>	$FCA_{atm50\%} e$ $FCA_{atm90\%} - (pu)$
<i>umidade relativa média do ar (anual)</i>	$u_{rel} - (\%)$
<i>umidade absoluta média do ar (anual)</i>	$u_{abs} - (g/m^3)$
<i>tempo ruim (para níveis de RI) - anual</i>	$TR - (\%)$

Linhas de transmissão aéreas constituem-se em empreendimentos com dimensões territoriais consideráveis e, não raro, atravessam áreas com diferentes condições geograficamente bem diferenciadas, resultando numa multiplicidade de elementos climáticos sobre elas atuantes. Portanto, torna-se relevante, para a execução de um projeto realista e coerente com seus próprios desafios, que haja a disponibilidade de métodos de inferências capazes de avaliar a evolução espacial das grandezas ambientais ao longo da rota da LT em estudo. A coleta de tais variáveis deve ser convenientemente feita em estações meteorológicas na mesma região e, obrigatoriamente, as suas variabilidades temporais devem ser quantificadas.

Como certo número de variáveis ambientais aqui enfocadas é dependente da altitude, o estudo em curso considera também a altitude na região, como forma de dimensionar algumas variações espaciais do clima, através de modelos matemáticos de correlação linear múltipla. A densidade relativa do ar (DRA) e os fatores de correção atmosféricos (FCAs²) não são variáveis meteorológicas, no rigor do conceito, mas encontram-se aqui incluídas por serem diretamente derivados da temperatura do ar, da pressão atmosférica e, para os FCAs, também da umidade absoluta do ar.

2 Conceituação Preliminar

A base de dados usada neste relatório origina-se de duas fontes diversas: do INMET [1] (Instituto nacional de Meteorologia - Ministério da Agricultura) e do DEPV [2, 7] (antiga Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Voo - Ministério da Aeronáutica). Tais fontes desempenham importantes e complementares papéis no modelo analítico aqui adotado para inferência estatística das variáveis ambientais, como exigido pelos procedimentos de projetos de LTs aéreas ora em curso no país.

Especificamente, pode-se dizer que os dados do INMET (mensais e anuais, em 205 estações) cuidam das determinações médias e das suas evoluções espaciais sobre o território brasileiro, enquanto que os dados do DEPV (horários, em 20 estações) definem as flutuações dos respectivos desvios-padrão. Detalhes da elaboração desse modelo dual são fornecidos ao longo do trabalho e aplicam-se às variáveis aqui objetivadas.

² ou ainda RIS (Relative Insulation Strength)

3 Dados termométricos

Os dados de temperatura utilizados no estudo foram medidos em estações climatológicas operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)³ e instaladas no estado de implantação do empreendimento.

Nessas estações, as temperaturas máximas e mínimas são medidas diariamente e as temperaturas correntes às 12, 18 e 24 horas, referidas ao horário de Greenwich (Greenwich Meridian Time - GMT). No procedimento de operação das estações do INMET, as temperaturas extremas diárias ficam perfeitamente caracterizadas.

A temperatura média diária é estimada através da seguinte equação, de uso rotineiro pelo INMET:

$$T_{med} = \frac{T_{12} + 2 \cdot T_{24} + T_{máx} + T_{mín}}{5}$$

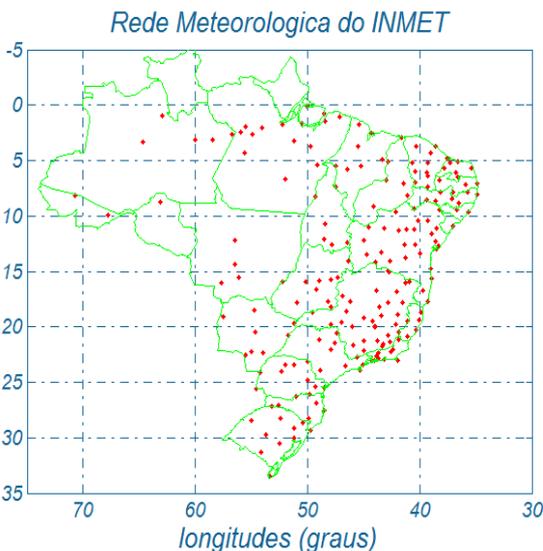


Figura 3.1 - Distribuição espacial das estações meteorológicas do INMET

T_{med} - temperatura média diária

$T_{máx}$ - temperatura máxima diária

$T_{mín}$ - temperatura mínima diária

T_{12} e T_{24} - temperaturas às 12 e 24 horas

As estatísticas dos valores de temperatura, medidos diariamente no período de 1961 a 1990, podem ser consultadas em [1]. Além dos valores médios anuais, buscou-se caracterizar as médias das temperaturas extremas, extraíndo-se do banco de dados os valores mínimos ou máximos ocorridos ao longo do ano, independentemente do mês em que foram anotados, e garantindo assim mapas que refletissem valores extremos que fossem os mais conservadores. Portanto, neste estudo, extremos médios de temperatura encontram-se também avaliados apropriadamente nos respectivos meses em que ocorrem.

A seguinte nomenclatura deve ser seguida:

média das temperaturas máximas	(°C)	- anual	(média dos 12 meses)
média das temperaturas máximas	(°C)	- de verão	(média no verão)
média das temperaturas mínimas	(°C)	- anual	(média dos 12 meses)
média das temperaturas mínimas	(°C)	- de inverno	(média no inverno)

³ INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, Ministério da Agricultura.

4 Densidade Relativa do Ar e Fatores de Correção Atmosféricos

A caracterização da média e do desvio padrão da densidade relativa do ar (DRA) e dos fatores de correção atmosféricos (FCAs), para frequência industrial e surtos de manobra ou atmosféricos, é aqui feita através de abordagens distintas.

4.1 Valor médio da DRA e dos FCAs

O valor médio dessas variáveis será feito por meio dos dados médios anuais medidos na rede do INMET (temperatura, pressão atmosférica para a DRA, acrescidos da umidade absoluta, para os valores dos FCAs). DRAs e FCAs têm distribuições normais para qualquer efeito prático [7] e seus valores médios podem ser calculados com as médias das variáveis indiretas (t_{med} , p_{med} e u_{abs}). Para dirimir qualquer dúvida quanto a essa afirmativa, as Tabelas 4.1.1 e 4.1.2 apresentam os respectivos resultados, quando se usa um banco de dados horário em 10 anos, e quando se faz o cálculo com médias anuais. O banco de dados usado como referência é o do DEPV⁴, tal como apresentado em [7].

Tabela 4.1.1 - Comparação dos valores para DRA calculados por (t_{med} , p_{med}) a cada hora e com valores médios anuais

Cidade	sigla	DRA _{50%} (pu) como em [7]	DRA _{50%} (pu) médias anuais
Belém	BE	0.976	0.980
Belo Horizonte	BH	0.913	0.900
Brasília	BR	0.883	0.870
Campo Grande	CG	0.927	0.930
Curitiba	CT	0.913	0.890
Caravelas	CV	0.987	0.990
Florianópolis	FL	1.001	1.000
Fortaleza	FZ	0.975	0.970
Galeão (RJ)	GL	0.990	0.990
Campinas	KP	0.926	0.926
Manaus	MN	0.968	0.970
Maceió	MO	0.973	0.980
Natal	NT	0.975	0.975
Porto Alegre	PA	1.004	0.990
Recife	RF	0.980	0.980
Rio de Janeiro (SD)	RJ	0.991	0.990
São Luiz	SL	0.971	0.980
São Paulo	SP	0.918	0.920
Salvador	SV	0.983	0.980
Vitória	VT	0.991	0.980

⁴ Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Voo, do Ministério da Aeronáutica.

Tabela 4.1.2 - valores dos FCAs para 60 Hz (FCA_{60Hz}) e surtos de manobra (FCA_{man}), calculados por (t_{med} , p_{med} e U_{abs}) horários e com valores médios anuais, gaps de 1 a 5 metros

tensão a 60 Hz (gape de 3 m)			surtos de manobra (gape de 3 m)		
sigla	FCA50% (pu) como em [7]	FCA50% (pu) médias anuais	sigla	FCA50% (pu) como em [7]	FCA50% (pu) médias anuais
BE	1.062	1.061	BE	1.041	1.040
BH	0.960	0.959	BH	0.962	0.963
BR	0.925	0.922	BR	0.932	0.932
CG	0.992	0.994	CG	0.987	0.988
CT	0.939	0.936	CT	0.948	0.949
CV	1.050	1.050	CV	1.034	1.033
FL	1.033	1.034	FL	1.023	1.023
FZ	1.053	1.053	FZ	1.035	1.034
GL	1.045	1.045	GL	1.030	1.029
KP	0.965	0.964	KP	0.967	0.969
MN	1.059	1.059	MN	1.039	1.038
MO	1.044	1.044	MO	1.028	1.027
NT	1.049	1.049	NT	1.032	1.031
PA	1.022	1.023	PA	1.015	1.016
RF	1.053	1.053	RF	1.035	1.034
RJ	1.042	1.043	RJ	1.028	1.028
SL	1.059	1.058	SL	1.039	1.038
SP	0.956	0.953	SP	0.960	0.961
SV	1.053	1.053	SV	1.035	1.034
VT	1.049	1.049	VT	1.033	1.032

As diferenças verificadas nos três casos indicam que as médias podem ser aproximadas usando-se valores médios das variáveis indiretas (t_{med} , p_{med} e u_{abs}), em vez de se adotar ou exigir um cálculo bem mais requintado e trabalhoso, tal como é o de bancos de dados horários durante 10 anos, com todas as variáveis lidas simultaneamente. A simplificação é bastante apreciável, pois nem sempre, ou quase nunca, tais bancos encontram-se disponíveis. Portanto, os dados do INMET, que tem uma bem mais expressiva quantidade de estações (205, em todo o Brasil, por ocasião da elaboração de [1]) são capazes de fornecer valores médios para DRA e FCAs. Observe a Figura 4.2.1 onde a rede do DEPV encontra-se grafada com a sua restrita densidade. Entretanto, o valor médio isolado dessas variáveis (valor 50 %) não é suficientemente seguro para a aplicação em LTs. É preciso associá-los a valores mais

conservadores que levem em conta as incertezas espaciais típicas que estão amiúde vinculados a linhas de transmissão que atravessam variados micro e macro climas.

4.2 Os desvios padrão da DRA e dos FCAs

Os mais recentes Editais da ANEEL, no que se refere à DRA, exigem um valor ao longo da LT que seja garantido 90% do tempo, de forma a minimizar as influências do efeito Corona e suas manifestações (RI, RA, perdas). Portanto, os valores médios devem ser corrigidos pela conhecida fórmula genérica $Var_{90\%} = \mu - 1.28 \sigma$, onde Var é uma variável que se encontre estatisticamente em questão e (μ, σ) seus valores médios e desvios padrão respectivos.

Como as variabilidades temporais da DRA e dos FCAs, medida por σ , não podem ser caracterizadas pelo banco de dados do INMET [1], é preciso que se recorra ao relevante trabalho desenvolvido em [7]. A Figura 4.2.1 apresenta a dispersão pouco densa da rede do DEPV, mas que é atualmente a única fonte para se processar um modelo de transferência espacial para os coeficientes de variação aqui objetivados. Complementando, a Tabela 4.2.1 apresenta os coeficientes de variação⁵ da DRA e dos FCA_{60Hz} e FCA_{man} .

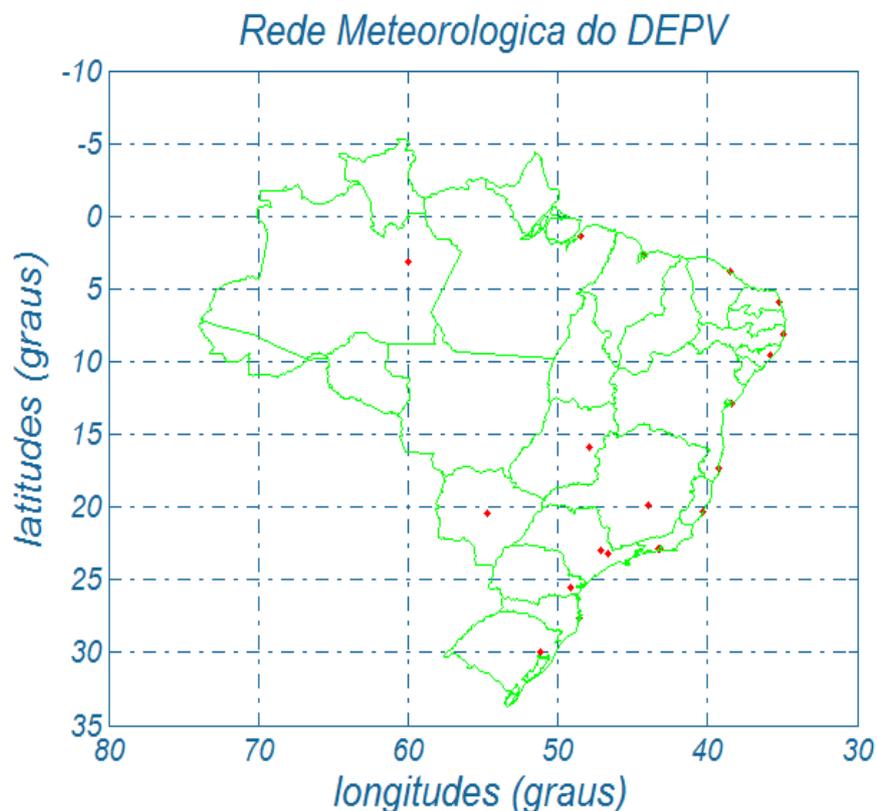


Figura 4.2.1 - Rede do DEPV, com as 20 estações usadas na modelagem de [7]

⁵ coeficiente de variação = $CV\% = 100 (\sigma/\mu)$

Tabela 4.2.1 - Características geográficas das estações do DEPV e respectivos valores percentuais dos coeficientes de variação da DRA e dos FCAs

sigla	latitude (°)	altitude (m)	$CV_{DRA}(\%)$	CV_{60Hz} (%)	CV_{man} (%)
BE	1.38	16	1.00	0.68	0.53
BH	19.85	787	1.70	2.70	1.89
BR	15.87	1060	1.50	3.66	2.88
CG	20.47	558	1.70	3.08	2.15
CT	25.52	909	1.90	2.90	1.99
CV	17.28	3	1.30	1.08	0.76
FL	27.67	7	1.90	1.85	1.20
FZ	3.78	24	0.80	0.98	0.75
GL	22.83	9	1.60	1.34	0.92
KP	23.00	661	1.80	3.06	2.17
MN	3.15	83	1.00	0.75	0.59
MO	9.51	116	1.10	1.04	0.78
NT	5.92	49	1.00	0.92	0.69
PA	30.00	20	2.40	1.95	1.27
RF	8.13	10	0.80	0.81	0.59
RJ	22.92	5	1.40	1.42	0.98
SL	2.72	53	0.90	0.71	0.57
SP	23.17	805	1.60	2.70	1.89
SV	12.90	6	1.00	0.97	0.69
VT	20.30	60	1.50	1.20	0.83

Com as informações acima, as seguintes equações de correlação linear múltipla podem ser inferidas objetivando a transferência espacial dos coeficientes de variação citados ou, respectivamente:

$$\begin{aligned}
 CV_{DRA} &= 0.7160 + 41.32 \text{ latitude}/1000 + 0.3268 \text{ altitude}/1000 \\
 CV_{FCA60Hz} &= 0.6050 + 39.28 \text{ latitude}/1000 + 1.5640 \text{ altitude}/1000 \\
 CV_{FCAman} &= 0.7790 + 15.61 \text{ latitude}/1000 + 0.8388 \text{ altitude}/1000
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 CV_{DRA} &\text{ coeficiente de variação da distribuição da DRA (\%)} \\
 CV_{FCA60Hz} &\text{ coeficiente de variação dos valores de FCAs para 60 Hz}^6 \text{ (\%)} \\
 CV_{FCAman} &\text{ coeficiente de variação dos FCAs para surtos de manobra}^7 \text{ (\%)}
 \end{aligned}$$

⁶ Essa mesma equação será mantida para tensões CC. Tais CVs são suficientemente baixos para garantir a validade dessa analogia, acrescido à semelhança entre as modelagens matemáticas das tensões em 60 Hz e contínua. Veja também o item 5.2.

⁷ Essa mesma equação será mantida para os surtos atmosféricos, pelos mesmos motivos acima.

5 Representação gráfica e mapeamento das variáveis

As variáveis ambientais aqui abordadas correlacionam-se bem com a latitude e a altitude e serão, portanto, representadas pelas equações de regressão:

$$\text{variável} = a_0 + a_1 \text{ latitude} + a_2 \text{ altitude},$$

onde a latitude é dada em graus e altitude em km.

A Tabela 5.1 indica os coeficientes definidos por correlação linear múltipla e os valores dos respectivos erros médios quadráticos (emq) atestam a qualidade da aderência entre valores reais e modelados.

Tabela 5.1 - Coeficientes das equações de regressão linear múltipla

variável	coeficiente a_0	coeficiente a_1	coeficiente a_2	emq
temp média	2.817E+01	-2.480E-01	-3.813E+00	1.335E+00
temp min anual	2.393E+01	-2.411E-01	-4.692E+00	1.176E+00
temp min inverno	2.319E+01	-3.824E-01	-5.217E+00	1.504E+00
temp min abs	1.959E+01	-6.624E-01	-6.417E+00	3.268E+00
temp max anual	3.361E+01	-2.386E-01	-2.936E+00	1.875E+00
temp max verão	3.495E+01	-1.423E-01	-3.660E+00	1.861E+00
temp max abs	4.090E+01	-3.000E-02	-2.028E+00	2.050E+00
pressão	1.013E+03	1.404E-01	-1.250E+02	1.761E+01
umidade absoluta	2.046E+01	-1.934E-01	-4.523E+00	1.266E+00
umidade relativa	7.533E+01	1.372E-01	-5.806E+00	7.085E+00
DRA ₅₀ %	9.704E-01	9.057E-04	-9.624E-02	6.253E-03
DRA ₉₀ %	9.613E-01	3.838E-04	-9.817E-02	6.146E-03
FCA ₆₀₋₅₀ %	1.063E+00	-9.426E-04	-1.109E-01	1.070E-02
FCA ₆₀₋₉₉ %	1.046E+00	-1.830E-03	-1.414E-01	1.059E-02
FCA _{man 50%}	1.040E+00	-6.011E-04	-9.100E-02	8.015E-03
FCA _{man 90 %}	1.029E+00	-7.923E-04	-9.979E-02	7.865E-03
FCA _{atm 50 %}	1.068E+00	-1.123E-03	-1.309E-01	1.387E-02
FCA _{atm 90 %}	1.057E+00	-1.305E-03	-1.392E-01	1.376E-02
tempo - ruim (RI)	2.393E+01	-2.411E-01	-4.692E+00	1.176E+00

5.1 Densidades relativas do ar e “nível de tempo - ruim”

Textualmente, os editais de Linhas de Transmissão da ANEEL exigem que (sic):

(a) Corona visual

A linha de transmissão, com seus cabos e acessórios, bem como as ferragens das cadeias de isoladores, não deve apresentar corona visual em 90% do tempo para as condições atmosféricas predominantes na região atravessada pela linha de transmissão aérea.

O $DRA_{90\%}$ corresponde a um maior rigor na aplicação do DRA, particularmente quando da sua utilização nas avaliações do efeito corona e suas manifestações em LTs, através da relação:

$$DRA_{90\%} = DRA_{\text{médio}} - 1,28 \sigma_{DRA}$$

onde o valor de σ_{DRA} já foi discutido e modelado tal como descrito em 4.2.

Ainda diretamente vinculado ao efeito Corona e suas manifestações, o Anexo 6 apresenta uma quantificação para o percentual de “tempo - ruim”, a ser aplicado na determinação dos níveis de rádio interferência ao longo de “todo o tempo”, tal como requer a metodologia de [8, Red Book]. Os resultados fundamentam-se na precipitação pluviométrica anual registrada nas estações do INMET e que serve de medição para variabilidade espacial do tempo ruim sobre o território brasileiro. Para a inferência do % de tempo ruim, foi adotada uma média anual de 1,5 mm/h quando da precipitação pluviométrica média anual registrada nas estações do INMET. Tal consideração de 1.5 mm/h é certamente subjetiva, mas é mais realista do que se adotarem os padrões climáticos constantes de [8] como típicos do Brasil.

5.2 Fatores de Correção Atmosféricos

Os fatores de correção atmosféricos são definidos através de uma relação entre os fatores de correção da densidade relativa do ar (k_1) e da umidade absoluta (k_2), como segue e detalhadamente descrito em [7].

$$FCA = k_1 \cdot k_2$$

$k_1 = \delta^m$ - fator de correção para a densidade relativa do ar, veja Figura 1.2 do Anexo 1

$k_2 = k^w$ - fator de correção para a umidade absoluta do ar, veja Figura 1.3 do Anexo 1

Para o caso de 60 Hz recomenda-se a utilização do valor referido a 99% pois as tensões dessa natureza devem ser suportadas em quaisquer condições atmosféricas, de forma que a qualidade de suprimento energético seja assegurada.

Para sobretensões de manobra ou atmosféricas, que correspondem a solicitações de ocorrência mais infreqüente, o valor médio do FCA ($FCA_{man}^{médio}$ - manobra, ou $FCA_{atm}^{médio}$ - atmosférico) pode ser adotado, mas recomenda-se o valor de 90% que é mais conservador, pois que há erros de avaliação que decorrem da variabilidade espacial dessa variável, além das simplificações descritas no Anexo 1, que se enquadram bem para o caso de LTs e não a objetos d dimensões reduzidas.

As formulações para os FCAs acima valem para distâncias em ar de 1 a 5 m, com dispersão em torno da média de 1,3% para 60 Hz e 1,7% para impulsos. Para os casos de distâncias superiores a 5 m, os valores de FCA tendem para o valor de 1,0, indicando que para gaps mais longos, o FCA não mais depende das condições atmosféricas. Como os casos mais severos são aqueles em que o $FCA < 1,0$, nenhuma correção será aqui recomendada, pois os resultados encontram-se a favor da segurança.

5.3 Umidades absolutas

A umidade absoluta, que é relevante para as determinações dos FCAs, pode ser modelada através da equação que segue:

5.3.1 Cálculo dos pontos de orvalho e de gelo

Inicialmente, são determinados os pontos de orvalho e de gelo, para as temperaturas ambientes em questão (bulbo seco):

$$T_d = \frac{237.3 \left[\frac{\ln(RH/100)}{17.270} + \frac{T}{237.3 + T} \right]}{1 - \left[\frac{\ln(RH/100)}{17.270} + \frac{T}{237.3 + T} \right]}$$

$$T_i = \frac{265.5 \left[\frac{\ln(RH/100)}{21.875} + \frac{T}{265.5 + T} \right]}{1 - \left[\frac{\ln(RH/100)}{21.875} + \frac{T}{265.5 + T} \right]}$$

RH é a umidade relativa (%),

T_d e T_i são os pontos de orvalho e de gelo (°K), respectivamente,

T temperatura de bulbo seco do ambiente (°K).

5.3.2 Cálculo das pressões de vapor

As pressões de vapor saturado correspondentes aos pontos de orvalho (e_d) e de gelo (e_i) são dadas pelas fórmulas seguintes:

$$e_d = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27 T_d}{T_d + 237.3}\right] \quad e_i = 0.6108 \exp\left[\frac{21.875 T_i}{T_i + 265.5}\right]$$

5.3.3 Cálculo das umidades absolutas

E finalmente, as umidades absolutas em g/m^3 (u_{abs}) ou são calculadas como segue, onde se assume os valores de e_d ou de e_i :

$$u_{abs} = \frac{2165 e}{T + 273.16}$$

6 Conclusões e recomendações

Os mapas constantes deste relatório oferecem ao projetista de LTs recursos ora disponíveis para uma escolha paramétrica tecnicamente justificável no que se refere aos elementos climáticos aqui avaliados estatisticamente. De uma forma geral, os parâmetros recomendados são conservadores e visam garantir um desempenho superior ao mínimo exigido. Com uma importância de destaque, encontra-se a densidade relativa do ar, caracterizada pelo seu valor médio e $DRA_{90\%}$, que é o valor excedido 90% do tempo, garantindo o que é exigido nos editais da ANEEL. Somente com os mapeamentos exclusivos das médias e dos desvios da DRA, não se torna imediata a identificação do local onde as condições do DRA são as mais adversas, pois a média mínima não coincide, necessariamente, com o máximo desvio padrão da DRA. Assim sendo, para facilidade de interpretação e escolha, foram traçadas as isolinhas do Anexo 6 que apresenta os valores de $DRA_{médio}$ e de $DRA_{90\%}$, através da relação $DRA_{90\%} = DRA_{médio} - 1,28$ desvios-padrão. Os mesmos conceitos se aplicam aos fatores de correção atmosféricos aqui sugeridos ($FCA_{60\text{Hz}}^{99\%}$, $FCA_{man}^{90\%}$ e $FCA_{atm}^{90\%}$), muito embora a sua utilização ainda não esteja regulamentada e nem mesmo exigida, embora correspondam à prática segura de escolha paramétrica.

Vale ainda sublinhar que FCAs acima de 1.00 pu são típicos de regiões com elevada umidade absoluta, tal como é o caso da região amazônica e do planalto no centro-oeste. No entanto, com a descontrolada continuidade de queimadas e desmatamentos, que vêm ocorrendo há décadas, a tendência é de que os valores de FCA venham se reduzindo com o tempo. O alerta serve para que valores de FCA acima de 1.00 pu sejam usados com certa reserva, a critério do projetista. Os valores indicados na Tabela 6.1 já seguem esse viés no sentido da segurança.

A Tabela seguinte apresenta um resumo das leituras nas Figuras dos Anexos 3 a 7:

*Tabela 6.1 - Resumo das recomendações numéricas
para os elementos climáticos objeto deste estudo.*

<i>Parâmetros climáticos</i>	<i>Porto Sergipe Olindina 500 kV</i>	<i>Olindina Sapeaçú 500 kV</i>	<i>M do Chapéu Irecê 230 kV</i>
<i>altitude média - (m)</i>	150	260	800
<i>temp média anual – (°C)</i>	25	24	22
<i>temp mín 50% anual – (°C)</i>	20	20	17
<i>temp mín 50% inverno – (°C)</i>	18	17	15
<i>temp mín absoluta – (°C)</i>	10	10	7
<i>temp máx 50% anual – (°C)</i>	30	30	29
<i>temp máx 50% verão – (°C)</i>	33	32	30
<i>temp máx abs – (°C)</i>	40	40	40
<i>temp Verão-Dia (°C)⁸</i>	32	32	30
<i>temp Verão-Noite (°C)¹</i>	25	23	22
<i>temp Inverno-Dia (°C)¹</i>	29	29	29
<i>temp Inverno-Noite (°C)¹</i>	23	21	20
<i>pressão média – (mbar)</i>	995	985	920
<i>DRA 50% – (pu)</i>	0.96	0.95	0.90
<i>DRA 90% – (pu)</i>	0.94	0.93	0.88
<i>FCA_{60 Hz} 50% – (pu)</i>	1.03	1.01	0.95
<i>FCA_{60 Hz} 99% – (pu)</i>	1.00	0.97	0.90
<i>FCA_{man}50% – (pu)</i>	1.01	1.00	0.96
<i>FCA_{man} 90% – (pu)</i>	1.00	0.98	0.94

⁸ valores retirados do arquivo digital da ONS para ampacidade sazonal

$FCA_{atm50\%} - (pu)$	1.03	1.01	0.94
$FCA_{atm90\%} - (pu)$	1.01	0.99	0.92
$umi_{rel} (U_{rel}) - (\%)$	76	76	72
$umi_{abs} (U_{abs}) - (g/m^3)$	18	17	14
$tempo_{ruim} - (\%)$	12	12	10

Notas:

- 1 As temperaturas mínimas (média anual e no inverno) são usadas indistintamente pelos vários consultores, dependendo da segurança.*
- 2 O mesmo se aplica para as temperaturas máximas (média anual e no verão)*
- 3 O $DRA_{90\%}$ deve ser usado em atendimento à exigência da ANEEL*
- 4 O $FCA_{60Hz,99\%}$ deve ser usado*
- 5 Quanto aos demais valores de FCAs para surtos de manobra e impulsos atmosféricos, não há exigências por parte da ANEEL quanto à utilização dos valores 50% ou 90%. O valor 90% é evidentemente mais rigoroso.*
- 6 É aconselhável que valores quaisquer de FCAs superiores a 1.0 pu sejam usados com cuidado extra. As queimadas e desmatamentos que ocorrem frequentemente neste país tendem a baixar a umidade absoluta ambiental e, em consequência direta, provocam redução dos FCAs.*

7 Comentários finais

As recomendações relativas à quantificação de elementos climáticos constantes deste relatório seguem as orientações e cálculos apresentados basicamente pelas referências [2, 3, 4, 6, 7 e 8], enquanto que as bases de dados provêm de [1, 2 e 7]. Vale sempre lembrar que [2 e 7] contêm sínteses metodológicas pioneiras que permitiram uma avaliação estatística mais aprofundada quanto a determinados fenômenos, notadamente no que se refere aos percentis da densidade relativa do ar e dos variados fatores de correção atmosféricos aqui considerados, através de modelos objetivando a determinação dos seus respectivos desvios-padrão. Além disso, há que se dar a devida ênfase ao que [3] declara a respeito dos FCAs sempre que o fator U_{abs} / DRA excede $15 g/m^3$ (sic):

Para valores de U_{abs} / DRA acima de 15 g/m^3 , o valor do parâmetro k pode chegar a (- 15%), veja também a Figura 1.1

Tal observação tem influência expressiva sobre os resultados de cálculo, na medida em que valores acima de 15 g/m^3 são frequentemente encontrados no Brasil⁹.

8 Referências

- 1 *INMET – Instituto Nacional de Meteorologia – “Normais climatológicas” (1961-1990).*
- 2 *Andrade, V. H. G et ali – Dados meteorológicos e parâmetros correlatos que influenciam os isolamentos em ar – Estatística de valores, VII SNPTEE.*
- 3 *IEC 60-1 - High Voltage Test Techniques - Part 1: General definitions and test requirements, 2010.*
- 4 *Menezes Jr A. A., Silva Filho J. I. - Transferência espacial de informações meteorológicas - Modelos matemáticos. Relatório Técnico CEPEL/1983*
- 5 *IEC 60826 - Overhead Transmission Line Design Criteria*
- 6 *NBR 5422 - Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica, Procedimentos, 1985.*
- 7 *Azevedo, R. M., Silva Filho, J. I. Andrade, V. H. G., - Fatores de correção atmosféricos aplicados ao dimensionamento de isolamentos em ar - Nova metodologia de cálculo, XVII SNPTEE, 2003*
- 8 *Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above, Electric Power Research Institute, Palo Alto*

⁹ veja os valores típicos em [2 e 8].

Anexo 1 Dados para determinação espacial da DRA e dos FCAs

Este Anexo objetiva apresentar parte dos resultados constantes de [7], que constituem a base das recomendações constantes deste relatório. As Tabelas 1.1, 1.2 e 1.3 ilustram os valores básicos para as correlações dos valores de DRAs (ou δ) e FCAs.

Tabela 1.1 - Resultados do processamento e dados provenientes do DEPV

estação	longitude (graus)	latitude (graus)	altitude (m)	h (g/m ³)		δ (pu)		h/ δ (g/m ³)	
				média	desvio	média	desvio	média	desvio
BE - Belém	48,48	1,38	16	21,10	1,37	0,976	0,010	21,628	1,515
BH - B. Horiz.	43,95	19,85	787	13,64	2,66	0,913	0,017	14,985	3,061
BR - Brasília	47,92	15,87	1060	12,92	2,78	0,883	0,015	14,646	3,227
CG - C. Grande	54,67	20,47	558	15,72	3,59	0,927	0,017	17,008	4,054
CT - Curitiba	49,18	25,52	909	11,92	2,93	0,913	0,019	13,107	3,399
CV - Caravelas	39,25	17,28	3	18,43	2,22	0,987	0,013	18,688	2,410
FL - Florian.	48,55	27,67	7	15,00	3,58	1,001	0,019	15,051	3,817
FZ - Fortaleza	38,53	3,78	24	19,77	1,47	0,975	0,008	20,292	1,520
GL - Galeão	43,25	22,83	9	17,36	2,73	0,990	0,016	17,567	2,965
KP - Campinas	47,13	23,00	661	13,15	2,91	0,926	0,018	14,246	3,284
MN - Manaus	59,98	3,15	83	21,22	1,26	0,968	0,010	21,938	1,381
MO - Maceió	35,78	9,51	116	18,45	1,63	0,973	0,011	18,969	1,764
NT - Natal	35,25	5,92	49	19,02	1,52	0,975	0,010	19,521	1,637
PA - P. Alegre	11,18	30,00	20	13,38	3,65	1,004	0,024	13,412	3,893
RF - Recife	34,92	8,13	10	19,39	1,48	0,980	0,008	19,793	1,584
RJ - S. Dumont	43,15	22,92	5	16,94	2,67	0,991	0,014	17,118	2,865
SL - São Luiz	44,25	2,72	53	20,94	1,10	0,971	0,009	21,578	1,171
SP - São Paulo	46,65	23,17	805	12,87	2,62	0,918	0,016	14,058	3,005
SV - Salvador	38,35	12,90	6	19,12	1,95	0,983	0,010	19,474	2,110
VT - Vitória	40,30	20,30	60	17,92	2,59	0,991	0,015	18,123	2,823

Tabela 1.2 - Média \bar{x} e coeficiente de variação cv da série horária do FCA_{60Hz} , em 10 anos, função do comprimento do gape (d)

local	$d = 1 m$		$d = 3 m$		$d = 5 m$	
	\bar{x} (pu)	cv (%)	\bar{x} (pu)	cv (%)	\bar{x} (pu)	cv (%)
BE	1,091	0,96	1,062	0,68	1,041	0,45
BH	0,956	2,74	0,960	2,70	0,973	1,83
BR	0,922	3,37	0,925	3,66	0,947	2,77
CG	0,993	3,66	0,992	3,08	0,994	2,08
CT	0,936	2,69	0,939	2,90	0,959	2,03
CV	1,074	1,60	1,050	1,08	1,033	0,72
FL	1,047	2,72	1,033	1,85	1,022	1,24
FZ	1,079	1,43	1,053	0,98	1,035	0,65
GL	1,066	2,01	1,045	1,34	1,030	0,89
KP	0,961	3,13	0,965	3,06	0,976	2,10
MN	1,087	1,07	1,059	0,75	1,039	0,50
MO	1,065	1,59	1,044	1,04	1,029	0,69
NT	1,072	1,37	1,049	0,92	1,032	0,61
PA	1,031	2,79	1,022	1,95	1,015	1,31
RF	1,079	1,15	1,053	0,81	1,035	0,53
RJ	1,062	2,13	1,042	1,42	1,028	0,94
SL	1,087	0,99	1,059	0,71	1,039	0,47
SP	0,951	2,65	0,956	2,70	0,970	1,86
SV	1,078	1,42	1,053	0,97	1,035	0,65
VT	1,072	1,79	1,049	1,20	1,032	0,80

Tabela 1.3 - Média e coeficiente de variação da série horária do FCA_{man} , em 10 anos, função do comprimento do gape (d)

local	$d = 1 m$		$d = 3 m$		$d = 5 m$	
	\bar{x} (pu)	cv (%)	\bar{x} (pu)	cv (%)	\bar{x} (pu)	cv (%)
BE	1,075	1,51	1,041	0,53	1,025	0,32
BH	0,936	1,75	0,962	1,89	0,976	1,18
BR	0,902	1,99	0,932	2,88	0,957	1,82
CG	0,968	2,54	0,987	2,15	0,992	1,34
CT	0,925	1,46	0,948	1,99	0,967	1,25
CV	1,056	1,74	1,034	0,76	1,021	0,47
FL	1,036	2,07	1,023	1,2	1,014	0,74
FZ	1,058	1,85	1,035	0,75	1,021	0,46
GL	1,049	1,93	1,030	0,92	1,018	0,56
KP	0,946	2,01	0,967	2,17	0,979	1,36
MN	1,067	1,61	1,039	0,59	1,023	0,36
MO	1,041	1,65	1,028	0,78	1,017	0,48
NT	1,049	1,58	1,032	0,69	1,019	0,42
PA	1,025	1,92	1,015	1,27	1,009	0,78
RF	1,059	1,48	1,035	0,59	1,021	0,36
RJ	1,045	1,95	1,028	0,98	1,017	0,6
SL	1,067	1,57	1,039	0,57	1,023	0,34
SP	0,936	1,57	0,960	1,89	0,975	1,18
SV	1,059	1,66	1,035	0,69	1,021	0,42
VT	1,055	1,83	1,033	0,83	1,020	0,51

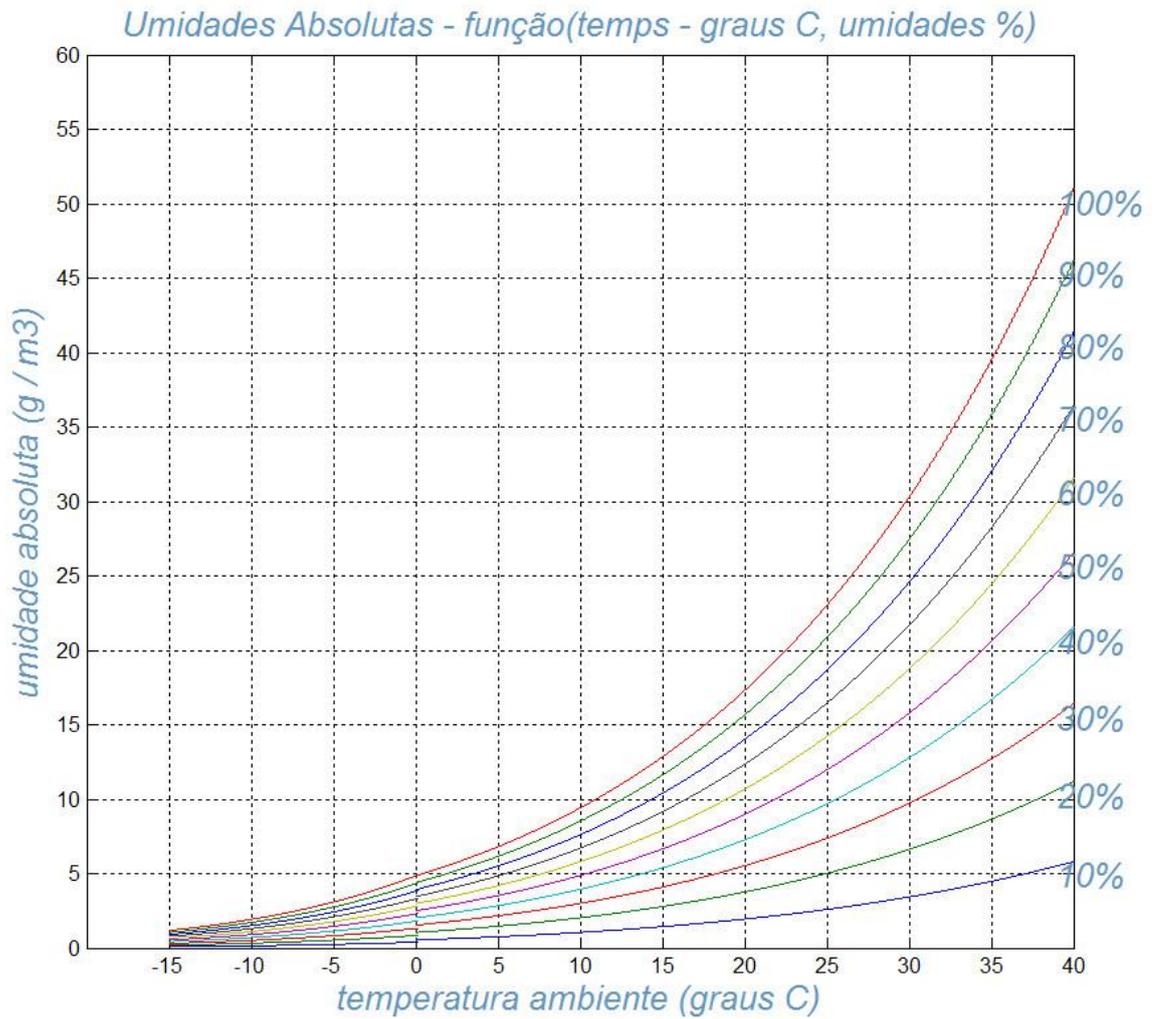


Figura 1.1 - Umidade absoluta do ar em função das leituras dos termômetros de bulbo seco e da umidade absoluta

Uma vez de posse das condições climáticas na região de interesse, ou seja, das temperaturas de bulbo seco e úmido, da pressão atmosférica e da umidade relativa, determinam-se a umidade absoluta respectiva (U_{abs} ou h) e a densidade relativa do ar (DRA ou δ). Da relação entre essas 2 variáveis (h e δ), o coeficiente k é definido pela Figura 1.2, como segue.

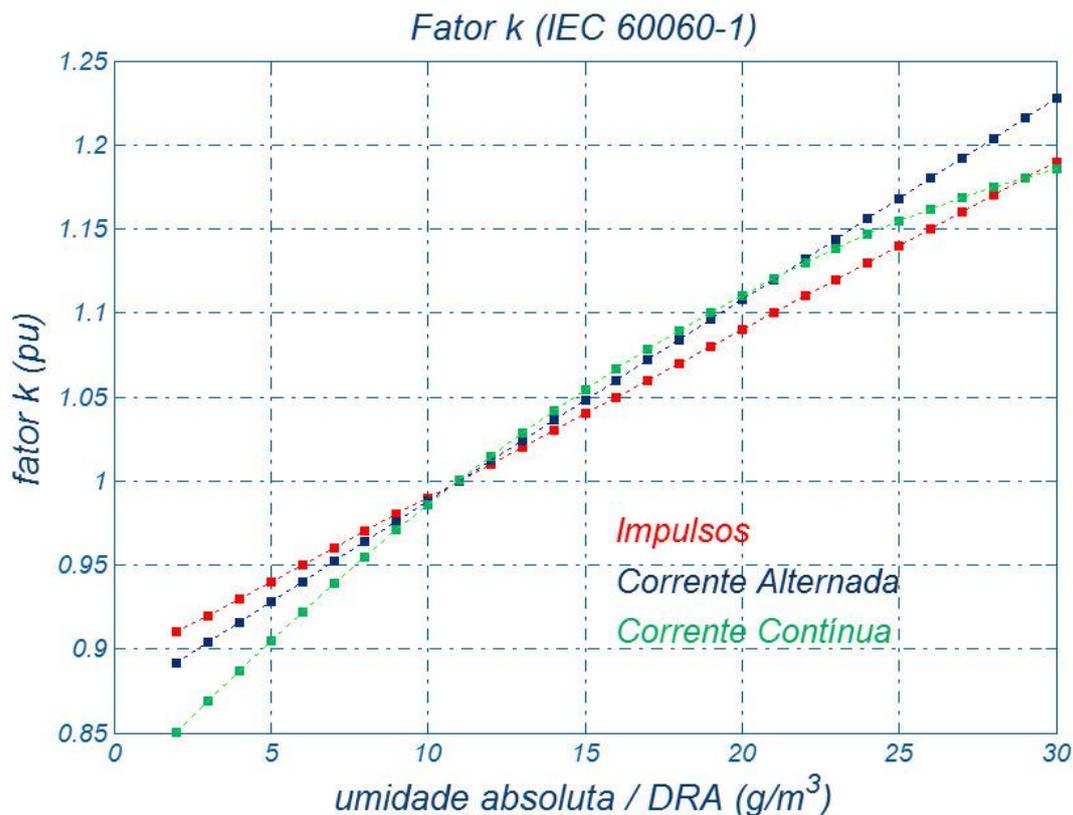


Figura 1.2 - Determinação do fator k em função de $h / \delta (g / m^3)$ e do tipo de tensão (60 Hz, impulso ou CC)

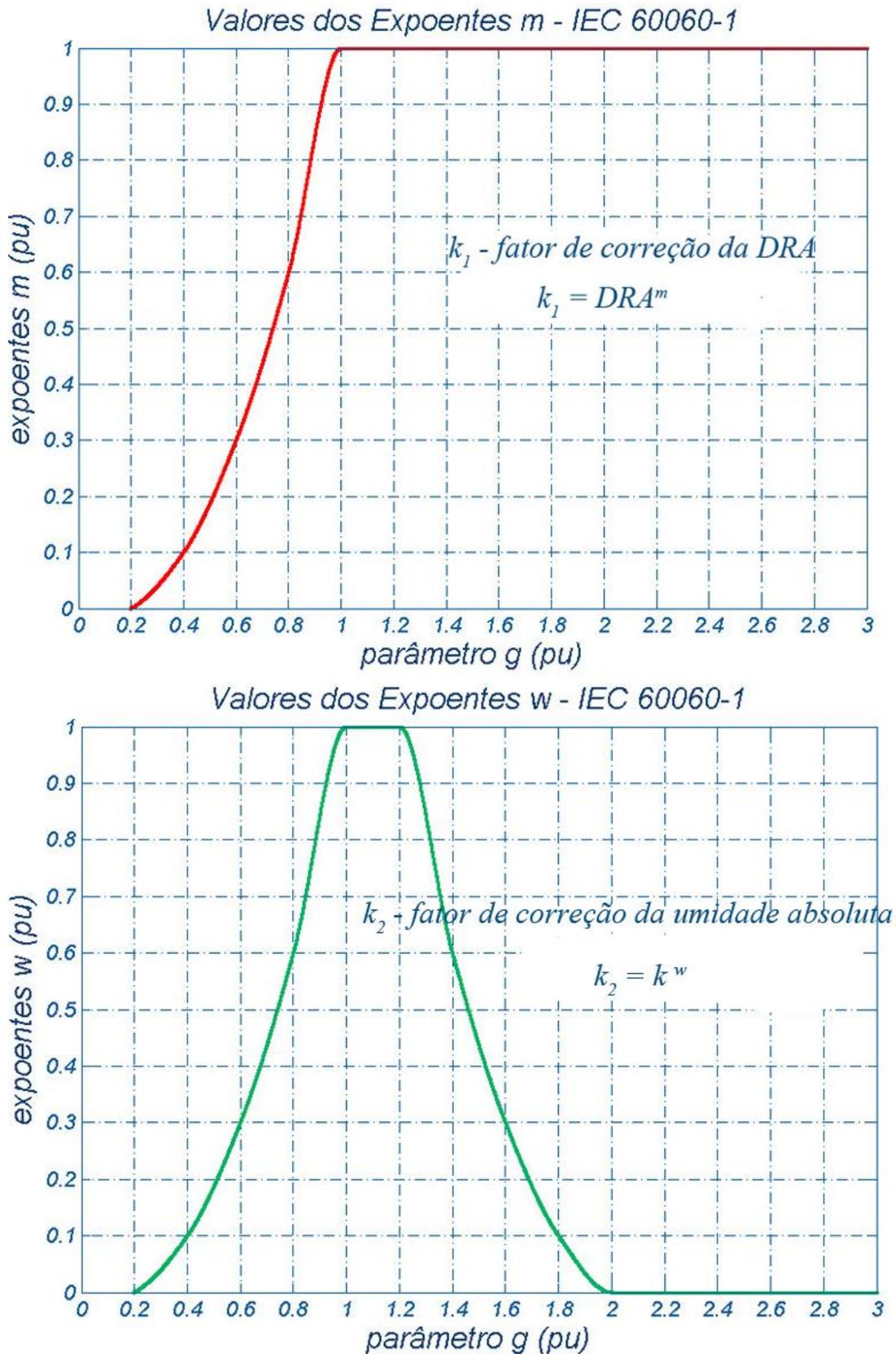


Figura 1.3 - Valores dos expoentes m para a DRA (superior) e w para a correção da umidade absoluta do ar inferior), em função do parâmetro g

O parâmetro g que determina os expoentes m e w é determinado pela relação

$$g = \frac{U_{50}}{500 d \delta k}$$

d - distância do isolamento (ou gape em ar), em metros.

δ - densidade relativa do ar (pu), ou DRA

k - coeficiente obtido da Figura 1.2, acima

U_{50} - valor de crista da tensão disruptiva com 50% de probabilidade de não ser excedido nas reais condições atmosféricas de trabalho, em kV, dado pelas expressões seguintes:

- tensões de frequência industrial

$$U_{50} = 750\sqrt{2} * \ln(1 + 0,55d^{1,2})$$

- sobretensões de frente lenta ou de manobra

$$U_{50} = 500 * d^{0,6} * K_g$$

$$K_g \text{ (fator de gape)} = 1,3^{10}$$

- sobretensões de frente rápida ou atmosféricas, polaridade positiva:

$$U_{50} = 530 * d$$

Os dados indicados nas Tabelas 1.1 a 1.3 foram determinados com base nas Figuras 1.1 a 1.3 e a metodologia adotada encontra-se detalhadamente descrita em [7 e 8]. Cabe aqui ressaltar que [1, 2, 3, 4 e 8] desempenharam um papel fundamental no equacionamento da DRA e dos FCAs para aplicação sistemática ao longo de linhas de transmissão, haja vista que as normas IEC que cuidam do assunto [3 e 6] foram originalmente desenvolvidas para aplicação em laboratórios de alta tensão.

Os trabalhos citados introduziram simplificações cabíveis que tornaram possível estender os conceitos normativos com fins laboratoriais para aplicações em linhas de transmissão, quando uma visão mais espacial sempre se faz necessária. Ainda com relação aos valores constantes das Tabelas 1.1 a 1.3, algumas considerações de simplificação tornam-se cabíveis, quando se leva em conta que a aplicação primordial, neste estudo, concentra-se em linhas de transmissão aéreas.

Inicialmente, observe-se que a dispersão dos valores dos FCAs em função do comprimento do gape, de 1 a 5 m é pequena, senão desprezível. Verifique nas Tabelas 1.4 a 1.7 a seguir:

¹⁰ detalhes em [6 e 8]

*Tabela 1.4 - Valores médios de $FCA_{60\text{Hz}}^{\text{médio}}$
para $d = 1, 3$ e 5 m e os erros referidos a 3 m*

<i>cidade</i>	<i>longitude (graus)</i>	<i>latitude (graus)</i>	<i>altitude (m)</i>	<i>$FCA_{60\text{Hz}}^{\text{médio}}$ 1 m</i>	<i>$FCA_{60\text{Hz}}^{\text{médio}}$ 3 m</i>	<i>$FCA_{60\text{Hz}}^{\text{médio}}$ 5 m</i>	<i>$FCA_{60\text{Hz}}^{\text{médio}}$ médio</i>	<i>erro (±%)</i>
<i>BE</i>	<i>48,48</i>	<i>1,38</i>	<i>16</i>	<i>1,091</i>	<i>1,062</i>	<i>1,041</i>	<i>1,065</i>	<i>2,35</i>
<i>BH</i>	<i>43,95</i>	<i>19,85</i>	<i>787</i>	<i>0,956</i>	<i>0,960</i>	<i>0,973</i>	<i>0,963</i>	<i>0,88</i>
<i>BR</i>	<i>47,92</i>	<i>15,87</i>	<i>1060</i>	<i>0,922</i>	<i>0,925</i>	<i>0,947</i>	<i>0,931</i>	<i>1,34</i>
<i>CG</i>	<i>54,67</i>	<i>20,47</i>	<i>558</i>	<i>0,993</i>	<i>0,992</i>	<i>0,994</i>	<i>0,993</i>	<i>0,05</i>
<i>CT</i>	<i>49,18</i>	<i>25,52</i>	<i>909</i>	<i>0,936</i>	<i>0,939</i>	<i>0,959</i>	<i>0,945</i>	<i>1,22</i>
<i>CV</i>	<i>39,25</i>	<i>17,28</i>	<i>3</i>	<i>1,074</i>	<i>1,050</i>	<i>1,033</i>	<i>1,052</i>	<i>1,95</i>
<i>FL</i>	<i>48,55</i>	<i>27,67</i>	<i>7</i>	<i>1,047</i>	<i>1,033</i>	<i>1,022</i>	<i>1,034</i>	<i>1,21</i>
<i>FZ</i>	<i>38,53</i>	<i>3,78</i>	<i>24</i>	<i>1,079</i>	<i>1,053</i>	<i>1,035</i>	<i>1,056</i>	<i>2,08</i>
<i>GL</i>	<i>43,25</i>	<i>22,83</i>	<i>9</i>	<i>1,066</i>	<i>1,045</i>	<i>1,030</i>	<i>1,047</i>	<i>1,72</i>
<i>KP</i>	<i>47,13</i>	<i>23,00</i>	<i>661</i>	<i>0,961</i>	<i>0,965</i>	<i>0,976</i>	<i>0,967</i>	<i>0,78</i>
<i>MN</i>	<i>59,98</i>	<i>3,15</i>	<i>83</i>	<i>1,087</i>	<i>1,059</i>	<i>1,039</i>	<i>1,062</i>	<i>2,26</i>
<i>MO</i>	<i>35,78</i>	<i>9,51</i>	<i>116</i>	<i>1,065</i>	<i>1,044</i>	<i>1,029</i>	<i>1,046</i>	<i>1,72</i>
<i>NT</i>	<i>35,25</i>	<i>5,92</i>	<i>49</i>	<i>1,072</i>	<i>1,049</i>	<i>1,032</i>	<i>1,051</i>	<i>1,90</i>
<i>PA</i>	<i>11,18</i>	<i>30,00</i>	<i>20</i>	<i>1,031</i>	<i>1,022</i>	<i>1,015</i>	<i>1,023</i>	<i>0,78</i>
<i>RF</i>	<i>34,92</i>	<i>8,13</i>	<i>10</i>	<i>1,079</i>	<i>1,053</i>	<i>1,035</i>	<i>1,056</i>	<i>2,08</i>
<i>RJ</i>	<i>43,15</i>	<i>22,92</i>	<i>5</i>	<i>1,062</i>	<i>1,042</i>	<i>1,028</i>	<i>1,044</i>	<i>1,63</i>
<i>SL</i>	<i>44,25</i>	<i>2,72</i>	<i>53</i>	<i>1,087</i>	<i>1,059</i>	<i>1,039</i>	<i>1,062</i>	<i>2,26</i>
<i>SP</i>	<i>46,65</i>	<i>23,17</i>	<i>805</i>	<i>0,951</i>	<i>0,956</i>	<i>0,970</i>	<i>0,959</i>	<i>0,99</i>
<i>SV</i>	<i>38,35</i>	<i>12,90</i>	<i>6</i>	<i>1,078</i>	<i>1,053</i>	<i>1,035</i>	<i>1,055</i>	<i>2,04</i>
<i>VT</i>	<i>40,30</i>	<i>20,30</i>	<i>60</i>	<i>1,072</i>	<i>1,049</i>	<i>1,032</i>	<i>1,051</i>	<i>1,90</i>

*Tabela 1.5 - Valores médios de $FCA^{99\%}_{60Hz}$
para $d = 1, 3$ e 5 m e os erros referidos a 3 m*

<i>cidade</i>	<i>longitude (graus)</i>	<i>latitude (graus)</i>	<i>altitude (m)</i>	<i>$FCA^{99\%}_{60Hz}$ (1 m)</i>	<i>$FCA^{99\%}_{60Hz}$ (3 m)</i>	<i>$FCA^{99\%}_{60Hz}$ (5 m)</i>	<i>$FCA^{99\%}_{60Hz}$ médio</i>	<i>erro (±%)</i>
<i>BE</i>	<i>48,48</i>	<i>1,38</i>	<i>16</i>	<i>1,067</i>	<i>1,045</i>	<i>1,030</i>	<i>1,05</i>	<i>1,74</i>
<i>BH</i>	<i>43,95</i>	<i>19,85</i>	<i>787</i>	<i>0,895</i>	<i>0,900</i>	<i>0,932</i>	<i>0,91</i>	<i>2,01</i>
<i>BR</i>	<i>47,92</i>	<i>15,87</i>	<i>1060</i>	<i>0,850</i>	<i>0,846</i>	<i>0,886</i>	<i>0,86</i>	<i>2,11</i>
<i>CG</i>	<i>54,67</i>	<i>20,47</i>	<i>558</i>	<i>0,908</i>	<i>0,921</i>	<i>0,946</i>	<i>0,92</i>	<i>2,03</i>
<i>CT</i>	<i>49,18</i>	<i>25,52</i>	<i>909</i>	<i>0,877</i>	<i>0,876</i>	<i>0,914</i>	<i>0,89</i>	<i>2,04</i>
<i>CV</i>	<i>39,25</i>	<i>17,28</i>	<i>3</i>	<i>1,034</i>	<i>1,024</i>	<i>1,016</i>	<i>1,02</i>	<i>0,89</i>
<i>FL</i>	<i>48,55</i>	<i>27,67</i>	<i>7</i>	<i>0,981</i>	<i>0,988</i>	<i>0,992</i>	<i>0,99</i>	<i>0,60</i>
<i>FZ</i>	<i>38,53</i>	<i>3,78</i>	<i>24</i>	<i>1,043</i>	<i>1,029</i>	<i>1,019</i>	<i>1,03</i>	<i>1,15</i>
<i>GL</i>	<i>43,25</i>	<i>22,83</i>	<i>9</i>	<i>1,016</i>	<i>1,012</i>	<i>1,009</i>	<i>1,01</i>	<i>0,37</i>
<i>KP</i>	<i>47,13</i>	<i>23,00</i>	<i>661</i>	<i>0,891</i>	<i>0,896</i>	<i>0,928</i>	<i>0,91</i>	<i>2,06</i>
<i>MN</i>	<i>59,98</i>	<i>3,15</i>	<i>83</i>	<i>1,060</i>	<i>1,040</i>	<i>1,027</i>	<i>1,04</i>	<i>1,58</i>
<i>MO</i>	<i>35,78</i>	<i>9,51</i>	<i>116</i>	<i>1,026</i>	<i>1,019</i>	<i>1,012</i>	<i>1,02</i>	<i>0,64</i>
<i>NT</i>	<i>35,25</i>	<i>5,92</i>	<i>49</i>	<i>1,038</i>	<i>1,027</i>	<i>1,017</i>	<i>1,03</i>	<i>1,00</i>
<i>PA</i>	<i>11,18</i>	<i>30,00</i>	<i>20</i>	<i>0,964</i>	<i>0,976</i>	<i>0,984</i>	<i>0,97</i>	<i>1,03</i>
<i>RF</i>	<i>34,92</i>	<i>8,13</i>	<i>10</i>	<i>1,050</i>	<i>1,033</i>	<i>1,022</i>	<i>1,04</i>	<i>1,35</i>
<i>RJ</i>	<i>43,15</i>	<i>22,92</i>	<i>5</i>	<i>1,009</i>	<i>1,008</i>	<i>1,005</i>	<i>1,01</i>	<i>0,19</i>
<i>SL</i>	<i>44,25</i>	<i>2,72</i>	<i>53</i>	<i>1,062</i>	<i>1,041</i>	<i>1,028</i>	<i>1,04</i>	<i>1,64</i>
<i>SP</i>	<i>46,65</i>	<i>23,17</i>	<i>805</i>	<i>0,892</i>	<i>0,896</i>	<i>0,928</i>	<i>0,91</i>	<i>1,97</i>
<i>SV</i>	<i>38,35</i>	<i>12,90</i>	<i>6</i>	<i>1,042</i>	<i>1,029</i>	<i>1,019</i>	<i>1,03</i>	<i>1,12</i>
<i>VT</i>	<i>40,30</i>	<i>20,30</i>	<i>60</i>	<i>1,027</i>	<i>1,020</i>	<i>1,013</i>	<i>1,02</i>	<i>0,71</i>

*Tabela 1.6 - Valores médios de $FCA_{imp}^{médio}$
para $d = 1, 3$ e 5 m e os erros referidos a 3 m*

<i>cidade</i>	<i>longitude (graus)</i>	<i>latitude (graus)</i>	<i>altitude (m)</i>	<i>$FCA_{imp}^{médio}$ (1 m)</i>	<i>$FCA_{imp}^{médio}$ (3 m)</i>	<i>$FCA_{imp}^{médio}$ (5 m)</i>	<i>$FCA_{imp}^{médio}$ médio</i>	<i>erro (±%)</i>
<i>BE</i>	<i>48,48</i>	<i>1,38</i>	<i>16</i>	<i>1,075</i>	<i>1,041</i>	<i>1,025</i>	<i>1,047</i>	<i>2,39</i>
<i>BH</i>	<i>43,95</i>	<i>19,85</i>	<i>787</i>	<i>0,936</i>	<i>0,962</i>	<i>0,976</i>	<i>0,958</i>	<i>2,09</i>
<i>BR</i>	<i>47,92</i>	<i>15,87</i>	<i>1060</i>	<i>0,902</i>	<i>0,932</i>	<i>0,957</i>	<i>0,930</i>	<i>2,96</i>
<i>CG</i>	<i>54,67</i>	<i>20,47</i>	<i>558</i>	<i>0,968</i>	<i>0,987</i>	<i>0,992</i>	<i>0,982</i>	<i>1,22</i>
<i>CT</i>	<i>49,18</i>	<i>25,52</i>	<i>909</i>	<i>0,925</i>	<i>0,948</i>	<i>0,967</i>	<i>0,947</i>	<i>2,22</i>
<i>CV</i>	<i>39,25</i>	<i>17,28</i>	<i>3</i>	<i>1,056</i>	<i>1,034</i>	<i>1,021</i>	<i>1,037</i>	<i>1,69</i>
<i>FL</i>	<i>48,55</i>	<i>27,67</i>	<i>7</i>	<i>1,036</i>	<i>1,023</i>	<i>1,014</i>	<i>1,024</i>	<i>1,07</i>
<i>FZ</i>	<i>38,53</i>	<i>3,78</i>	<i>24</i>	<i>1,058</i>	<i>1,035</i>	<i>1,021</i>	<i>1,038</i>	<i>1,78</i>
<i>GL</i>	<i>43,25</i>	<i>22,83</i>	<i>9</i>	<i>1,049</i>	<i>1,030</i>	<i>1,018</i>	<i>1,032</i>	<i>1,50</i>
<i>KP</i>	<i>47,13</i>	<i>23,00</i>	<i>661</i>	<i>0,946</i>	<i>0,967</i>	<i>0,979</i>	<i>0,964</i>	<i>1,71</i>
<i>MN</i>	<i>59,98</i>	<i>3,15</i>	<i>83</i>	<i>1,067</i>	<i>1,039</i>	<i>1,023</i>	<i>1,043</i>	<i>2,11</i>
<i>MO</i>	<i>35,78</i>	<i>9,51</i>	<i>116</i>	<i>1,041</i>	<i>1,028</i>	<i>1,017</i>	<i>1,029</i>	<i>1,17</i>
<i>NT</i>	<i>35,25</i>	<i>5,92</i>	<i>49</i>	<i>1,049</i>	<i>1,032</i>	<i>1,019</i>	<i>1,033</i>	<i>1,45</i>
<i>PA</i>	<i>11,18</i>	<i>30,00</i>	<i>20</i>	<i>1,025</i>	<i>1,015</i>	<i>1,009</i>	<i>1,016</i>	<i>0,79</i>
<i>RF</i>	<i>34,92</i>	<i>8,13</i>	<i>10</i>	<i>1,059</i>	<i>1,035</i>	<i>1,021</i>	<i>1,038</i>	<i>1,83</i>
<i>RJ</i>	<i>43,15</i>	<i>22,92</i>	<i>5</i>	<i>1,045</i>	<i>1,028</i>	<i>1,017</i>	<i>1,030</i>	<i>1,36</i>
<i>SL</i>	<i>44,25</i>	<i>2,72</i>	<i>53</i>	<i>1,067</i>	<i>1,039</i>	<i>1,023</i>	<i>1,043</i>	<i>2,11</i>
<i>SP</i>	<i>46,65</i>	<i>23,17</i>	<i>805</i>	<i>0,936</i>	<i>0,960</i>	<i>0,975</i>	<i>0,957</i>	<i>2,04</i>
<i>SV</i>	<i>38,35</i>	<i>12,90</i>	<i>6</i>	<i>1,059</i>	<i>1,035</i>	<i>1,021</i>	<i>1,038</i>	<i>1,83</i>
<i>VT</i>	<i>40,30</i>	<i>20,30</i>	<i>60</i>	<i>1,055</i>	<i>1,033</i>	<i>1,020</i>	<i>1,036</i>	<i>1,69</i>

Tabela 1.7 - Valores médios de $FCA_{imp}^{90\%}$
para $d = 1, 3$ e 5 m e os erros referidos a 3 m

<i>cidade</i>	<i>longitude (graus)</i>	<i>latitude (graus)</i>	<i>altitude (m)</i>	$FCA_{imp}^{90\%}$ (1 m)	$FCA_{imp}^{90\%}$ (3 m)	$FCA_{imp}^{90\%}$ (5 m)	$FCA_{imp}^{90\%}$ médio	<i>erro (±%)</i>
BE	48,48	1,38	16	1,0542	1,0339	1,0228	1,0370	1,51
BH	43,95	19,85	787	0,9150	0,9387	0,9475	0,9337	1,74
BR	47,92	15,87	1060	0,8790	0,8976	0,8899	0,8889	0,61
CG	54,67	20,47	558	0,9365	0,9598	0,9551	0,9505	0,98
CT	49,18	25,52	909	0,9077	0,9239	0,9352	0,9222	1,49
CV	39,25	17,28	3	1,0325	1,0239	1,0164	1,0243	0,78
FL	48,55	27,67	7	1,0086	1,0073	1,0026	1,0062	0,29
FZ	38,53	3,78	24	1,0329	1,0251	1,0166	1,0249	0,80
GL	43,25	22,83	9	1,0231	1,0179	1,0114	1,0175	0,57
KP	47,13	23,00	661	0,9217	0,9401	0,9412	0,9343	1,05
MN	59,98	3,15	83	1,0450	1,0312	1,0203	1,0321	1,20
MO	35,78	9,51	116	1,0190	1,0177	1,0122	1,0163	0,33
NT	35,25	5,92	49	1,0278	1,0229	1,0153	1,0220	0,61
PA	11,18	30,00	20	0,9998	0,9985	0,9963	0,9982	0,17
RF	34,92	8,13	10	1,0389	1,0272	1,0183	1,0281	1,00
RJ	43,15	22,92	5	1,0189	1,0151	1,0095	1,0145	0,47
SL	44,25	2,72	53	1,0456	1,0314	1,0205	1,0325	1,21
SP	46,65	23,17	805	0,9172	0,9368	0,9465	0,9335	1,57
SV	38,35	12,90	6	1,0365	1,0259	1,0173	1,0265	0,94
VT	40,30	20,30	60	1,0303	1,0220	1,0146	1,0223	0,77

Em conseqüência, é possível que se faça uso dos valores de FCA no entorno de 3 m, com erros médios de 1,56%, 1,31% e 1,75% respectivamente para $FCA_{60Hz}^{médio}$, $FCA_{60Hz}^{99\%}$ e $FCA_{imp}^{médio}$, e aplicáveis na faixa de 1 a 5 m de comprimento de gaps em ar sem comprometimento da precisão.

Anexo 2 Características das estações do INMET

Tabela 2 - Características das estações meteorológicas

<i>cidade</i>	<i>longitude (graus)</i>	<i>latitude (graus)</i>	<i>altitude (km)</i>
<i>Alagoinhas</i>	<i>38.58</i>	<i>12.28</i>	<i>131</i>
<i>Aracaju</i>	<i>37.05</i>	<i>10.92</i>	<i>5</i>
<i>Arco Verde</i>	<i>37.08</i>	<i>8.42</i>	<i>681</i>
<i>B Jesus da Lapa</i>	<i>43.42</i>	<i>13.27</i>	<i>440</i>
<i>B Jesus do Piauí</i>	<i>44.12</i>	<i>9.10</i>	<i>332</i>
<i>Barra</i>	<i>43.17</i>	<i>11.08</i>	<i>402</i>
<i>Barreiras</i>	<i>45.00</i>	<i>12.15</i>	<i>439</i>
<i>Brasília</i>	<i>47.93</i>	<i>15.78</i>	<i>1160</i>
<i>Cabrobó</i>	<i>39.33</i>	<i>8.52</i>	<i>342</i>
<i>Caetité</i>	<i>42.62</i>	<i>14.05</i>	<i>882</i>
<i>Camaçari</i>	<i>38.32</i>	<i>12.67</i>	<i>48</i>
<i>Canavieiras</i>	<i>38.95</i>	<i>15.67</i>	<i>4</i>
<i>Carinhanha</i>	<i>43.92</i>	<i>14.17</i>	<i>440</i>
<i>Cipó</i>	<i>38.52</i>	<i>11.08</i>	<i>145</i>
<i>Correntina</i>	<i>44.77</i>	<i>13.47</i>	<i>587</i>

Tabela 2 - Características das estações meteorológicas

<i>cidade</i>	<i>longitude (graus)</i>	<i>latitude (graus)</i>	<i>altitude (km)</i>
<i>Espinosa</i>	<i>42.85</i>	<i>14.92</i>	<i>570</i>
<i>Floresta</i>	<i>38.57</i>	<i>8.60</i>	<i>310</i>
<i>Formosa</i>	<i>47.33</i>	<i>15.53</i>	<i>912</i>
<i>Garanhuns</i>	<i>36.52</i>	<i>8.88</i>	<i>823</i>
<i>Ilhéus</i>	<i>39.07</i>	<i>14.80</i>	<i>60</i>
<i>Irecê</i>	<i>41.87</i>	<i>11.30</i>	<i>747</i>
<i>Itaberaba</i>	<i>40.43</i>	<i>12.55</i>	<i>250</i>
<i>Itiruçu</i>	<i>39.95</i>	<i>13.37</i>	<i>756</i>
<i>Ituaçu</i>	<i>41.30</i>	<i>13.82</i>	<i>531</i>
<i>Jacobina</i>	<i>40.47</i>	<i>11.18</i>	<i>485</i>
<i>Lençóis</i>	<i>41.38</i>	<i>12.57</i>	<i>439</i>
<i>Monte Azul</i>	<i>42.75</i>	<i>15.08</i>	<i>604</i>
<i>Monte Santo</i>	<i>39.30</i>	<i>10.43</i>	<i>465</i>
<i>Morro do Chapéu</i>	<i>41.16</i>	<i>11.53</i>	<i>940</i>
<i>Palmeira Indios</i>	<i>36.70</i>	<i>9.45</i>	<i>275</i>

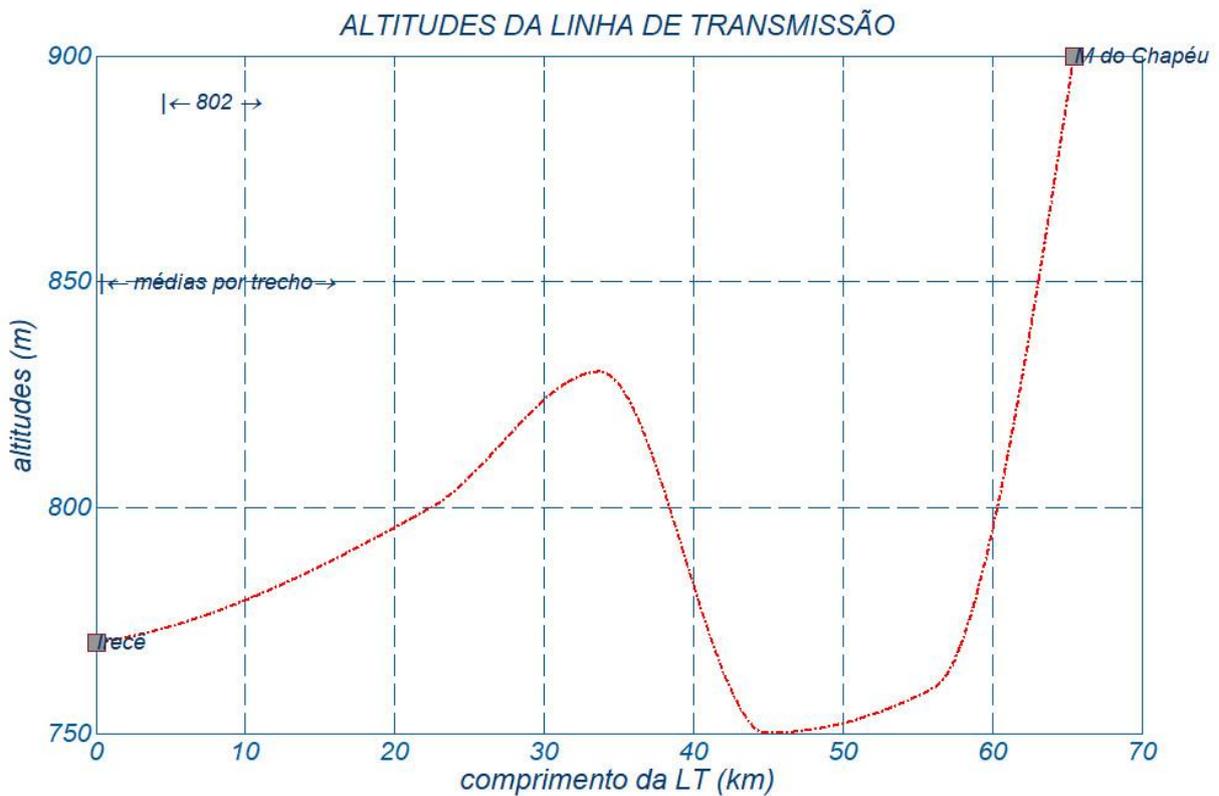
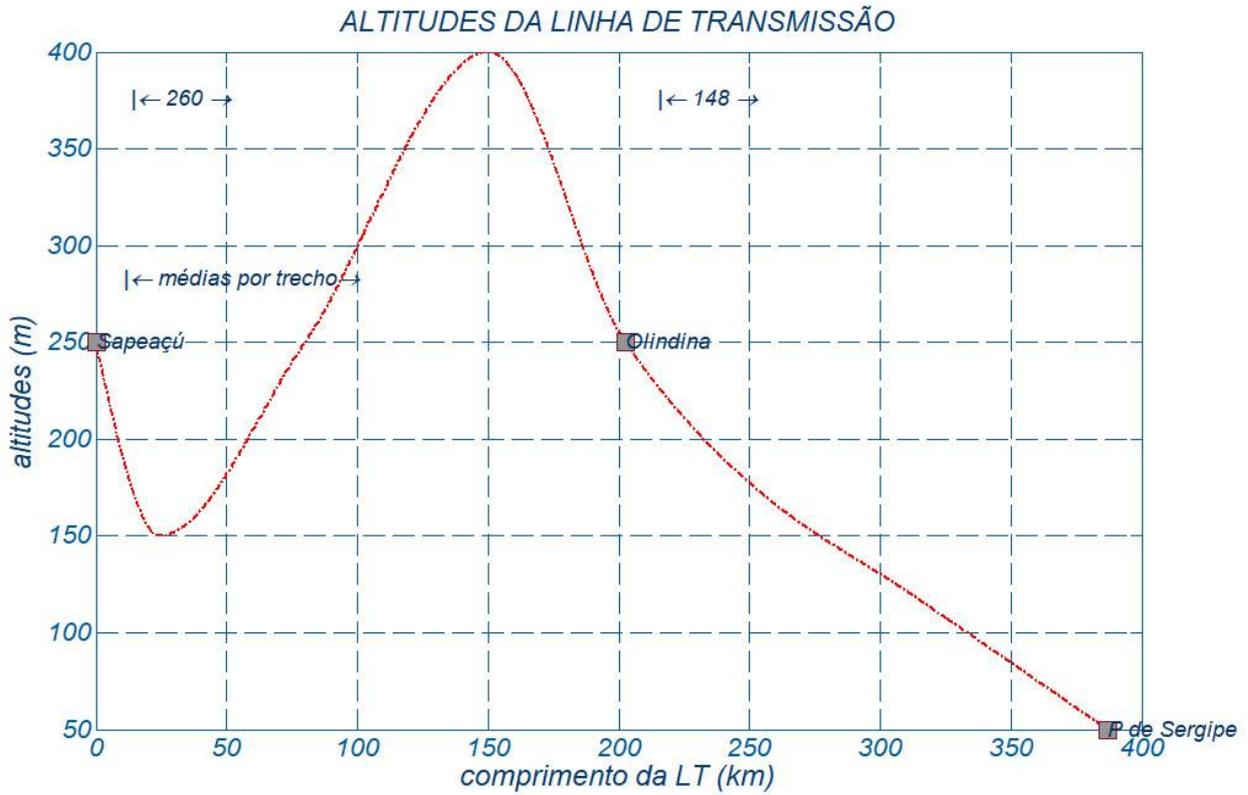
Tabela 2 - Características das estações meteorológicas

<i>cidade</i>	<i>longitude (graus)</i>	<i>latitude (graus)</i>	<i>altitude (km)</i>
<i>Paranã</i>	<i>47.83</i>	<i>12.55</i>	<i>275</i>
<i>Paulistana</i>	<i>41.13</i>	<i>8.13</i>	<i>374</i>
<i>Paulo Afonso</i>	<i>38.22</i>	<i>9.40</i>	<i>253</i>
<i>Pedra Azul</i>	<i>41.28</i>	<i>16.00</i>	<i>649</i>
<i>Petrolina</i>	<i>40.48</i>	<i>9.38</i>	<i>370</i>
<i>Posse</i>	<i>46.37</i>	<i>14.10</i>	<i>826</i>
<i>Remanso</i>	<i>42.10</i>	<i>9.63</i>	<i>401</i>
<i>S. Rita de Cássia</i>	<i>44.52</i>	<i>11.02</i>	<i>550</i>
<i>Salvador</i>	<i>38.52</i>	<i>13.02</i>	<i>51</i>
<i>Senhor do Bonfim</i>	<i>40.18</i>	<i>10.47</i>	<i>558</i>
<i>Serrinha</i>	<i>38.97</i>	<i>11.63</i>	<i>360</i>
<i>Taguatinga</i>	<i>46.43</i>	<i>12.40</i>	<i>604</i>
<i>Vitória Conquista</i>	<i>40.88</i>	<i>14.62</i>	<i>839</i>
<i>Ibicoara</i>	<i>41.23</i>	<i>13.26</i>	<i>900</i>
<i>Brotas</i>	<i>42.49</i>	<i>12.10</i>	<i>900</i>

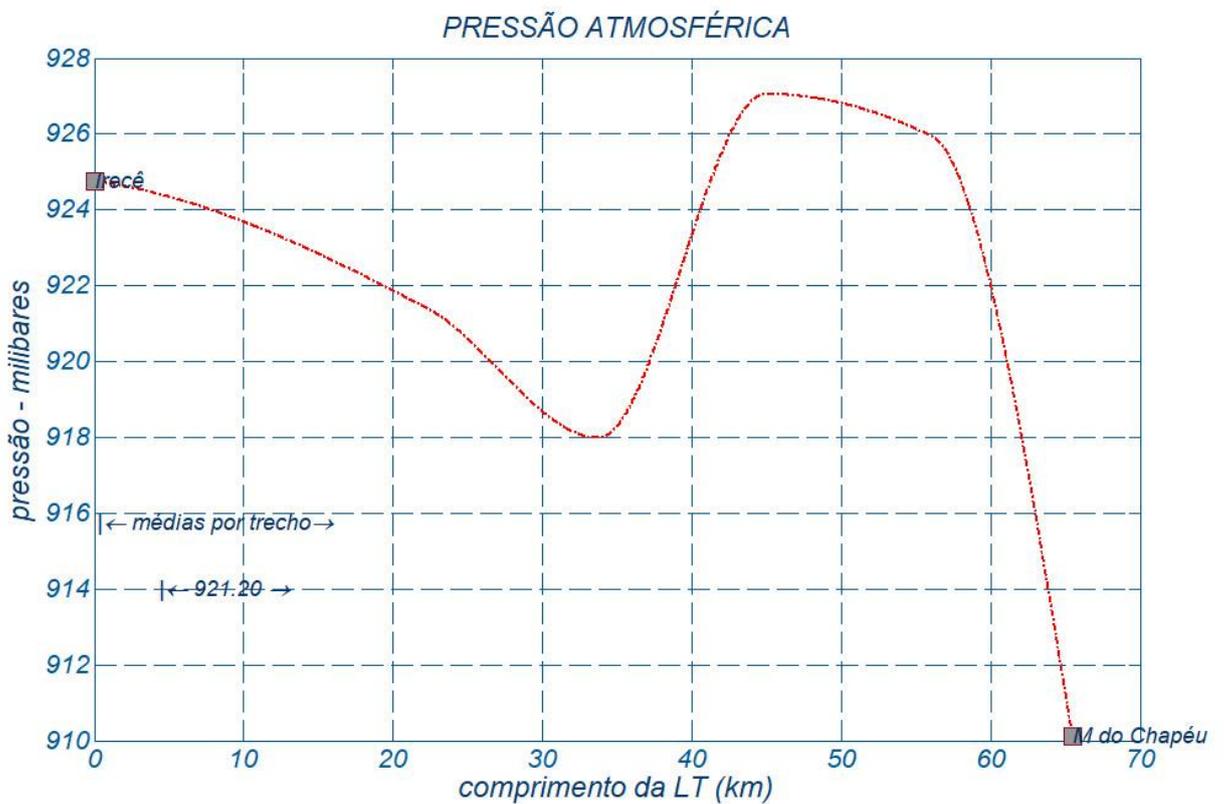
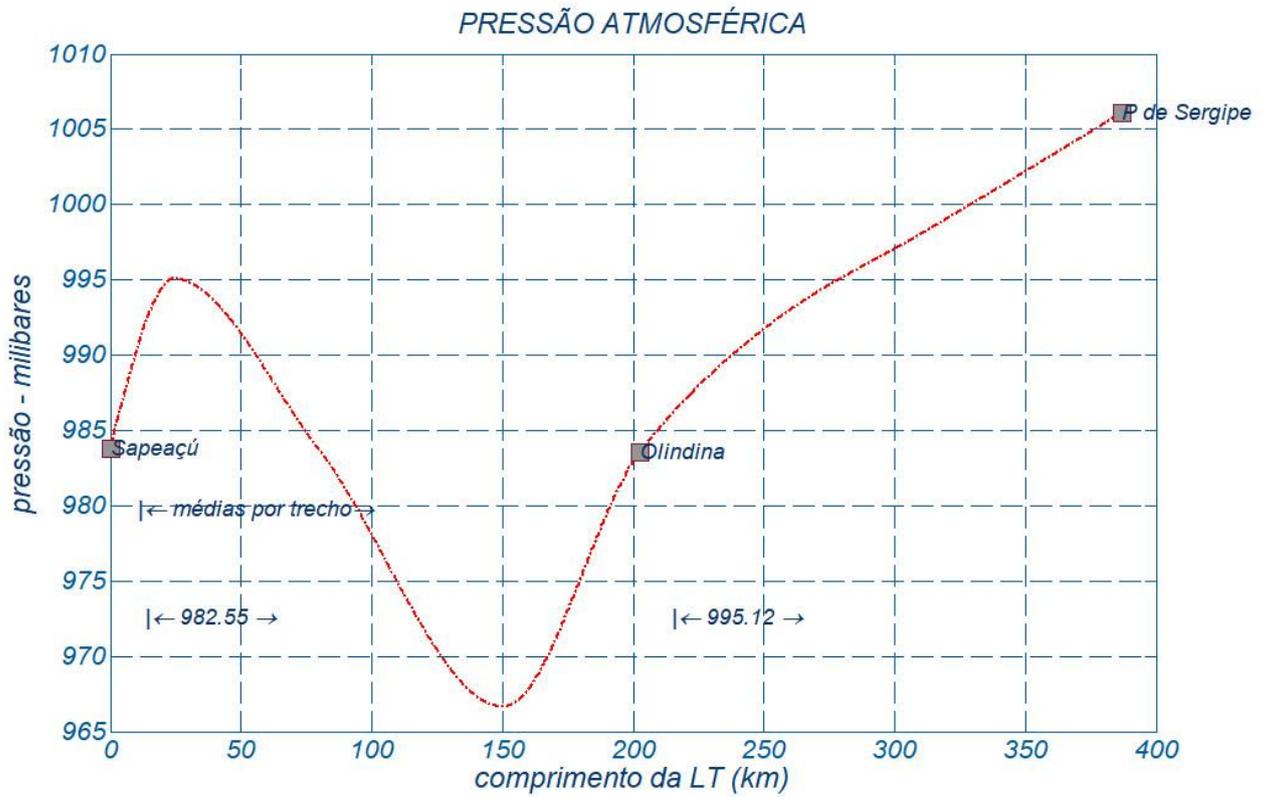
Tabela 2 - Características das estações meteorológicas

<i>cidade</i>	<i>longitude (graus)</i>	<i>latitude (graus)</i>	<i>altitude (km)</i>
<i>Gilbués</i>	<i>45.39</i>	<i>9.48</i>	<i>550</i>
<i>Ourolândia</i>	<i>41.16</i>	<i>10.86</i>	<i>600</i>
<i>Umburanas</i>	<i>41.56</i>	<i>10.68</i>	<i>1000</i>
<i>Graúnas</i>	<i>40.63</i>	<i>10.92</i>	<i>900</i>
<i>Rio do Ouro</i>	<i>42.67</i>	<i>11.28</i>	<i>850</i>
<i>Rio das Éguas</i>	<i>46.05</i>	<i>13.34</i>	<i>950</i>
<i>Barreiros</i>	<i>44.79</i>	<i>12.14</i>	<i>750</i>
<i>Igaporã</i>	<i>42.68</i>	<i>13.72</i>	<i>950</i>

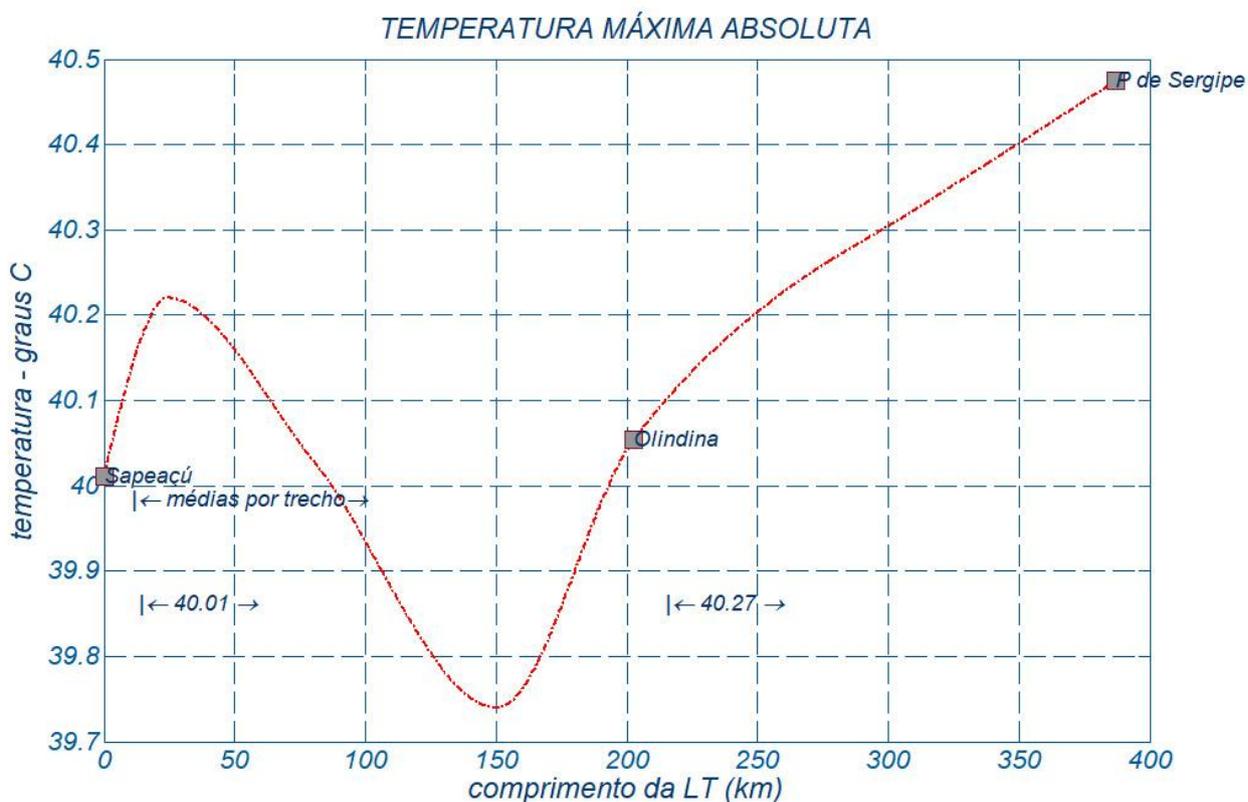
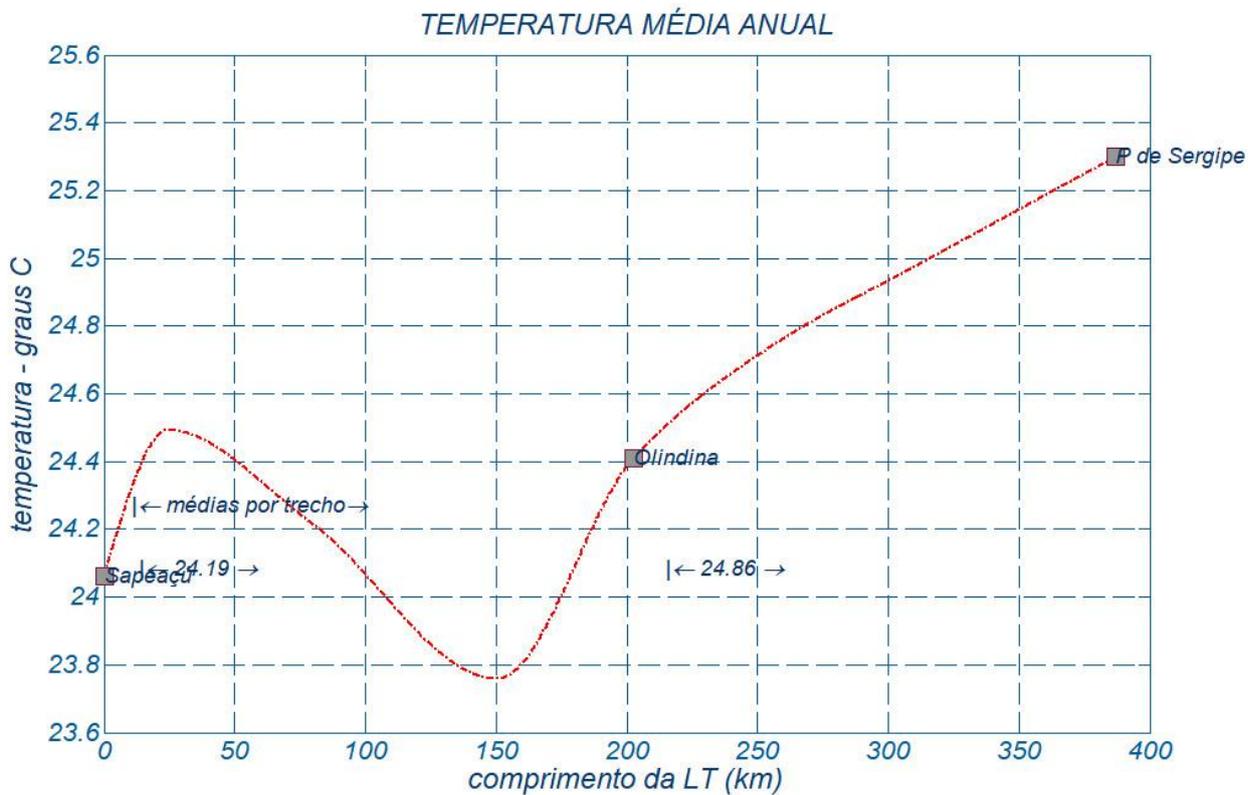
Anexo 3 Mapa das altitudes

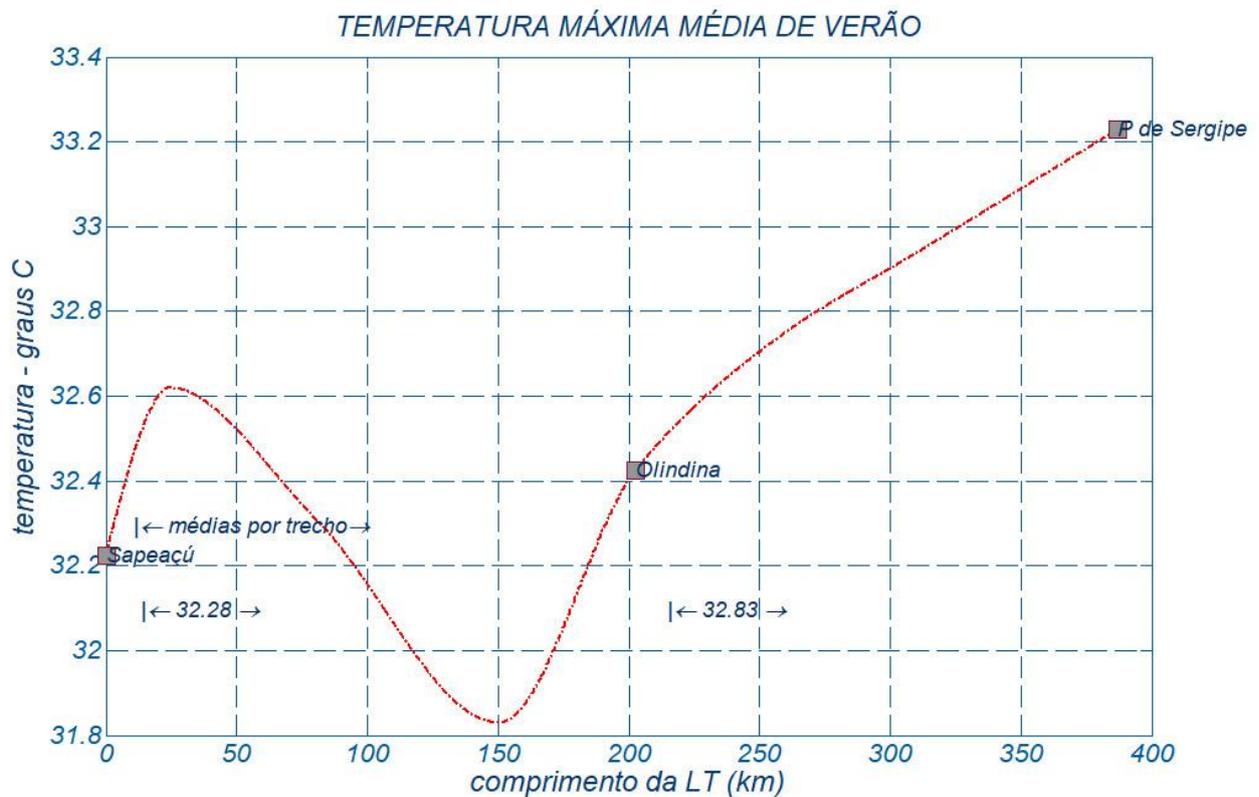
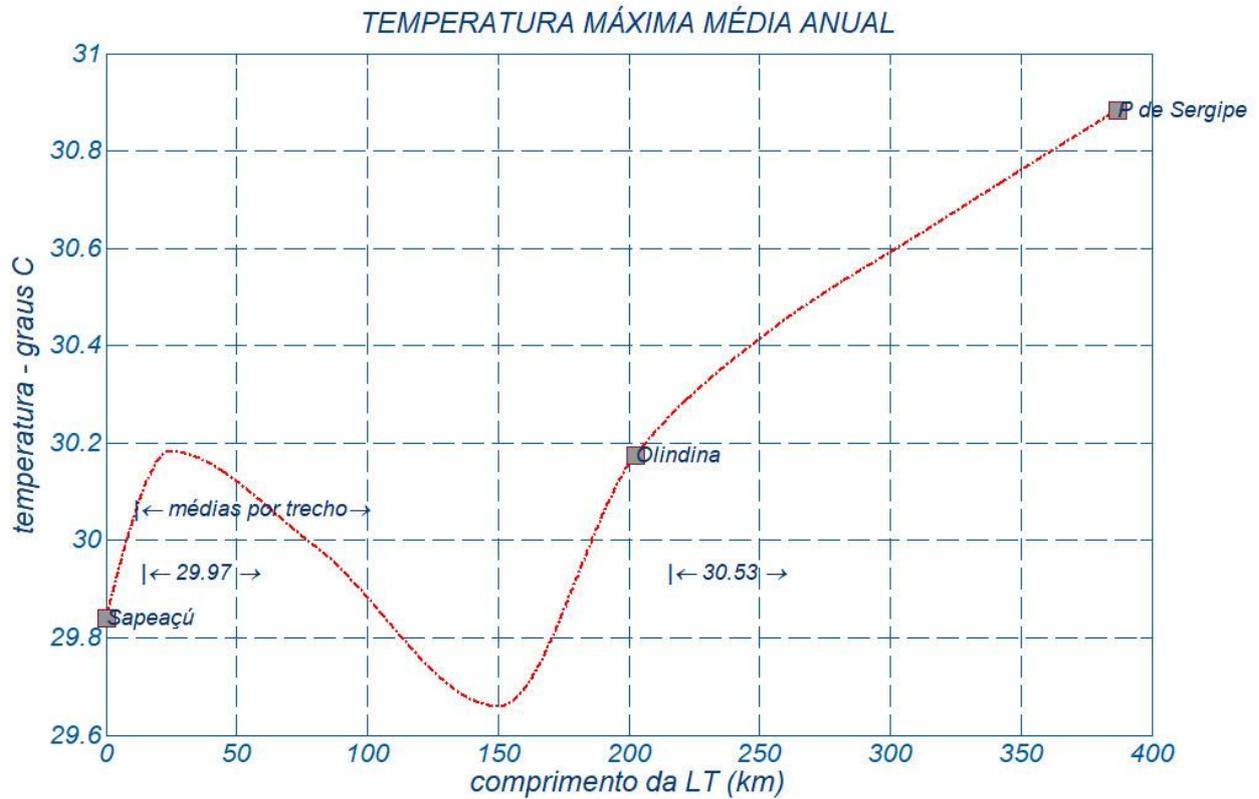


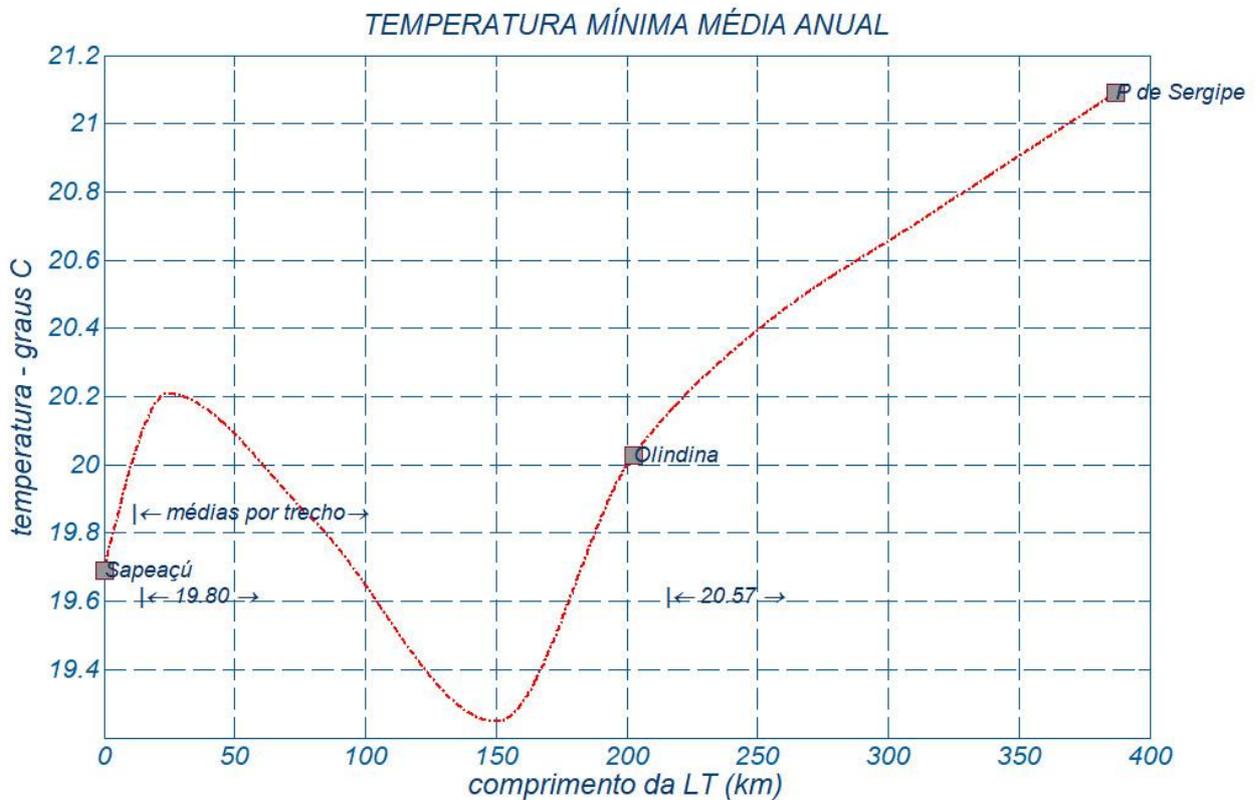
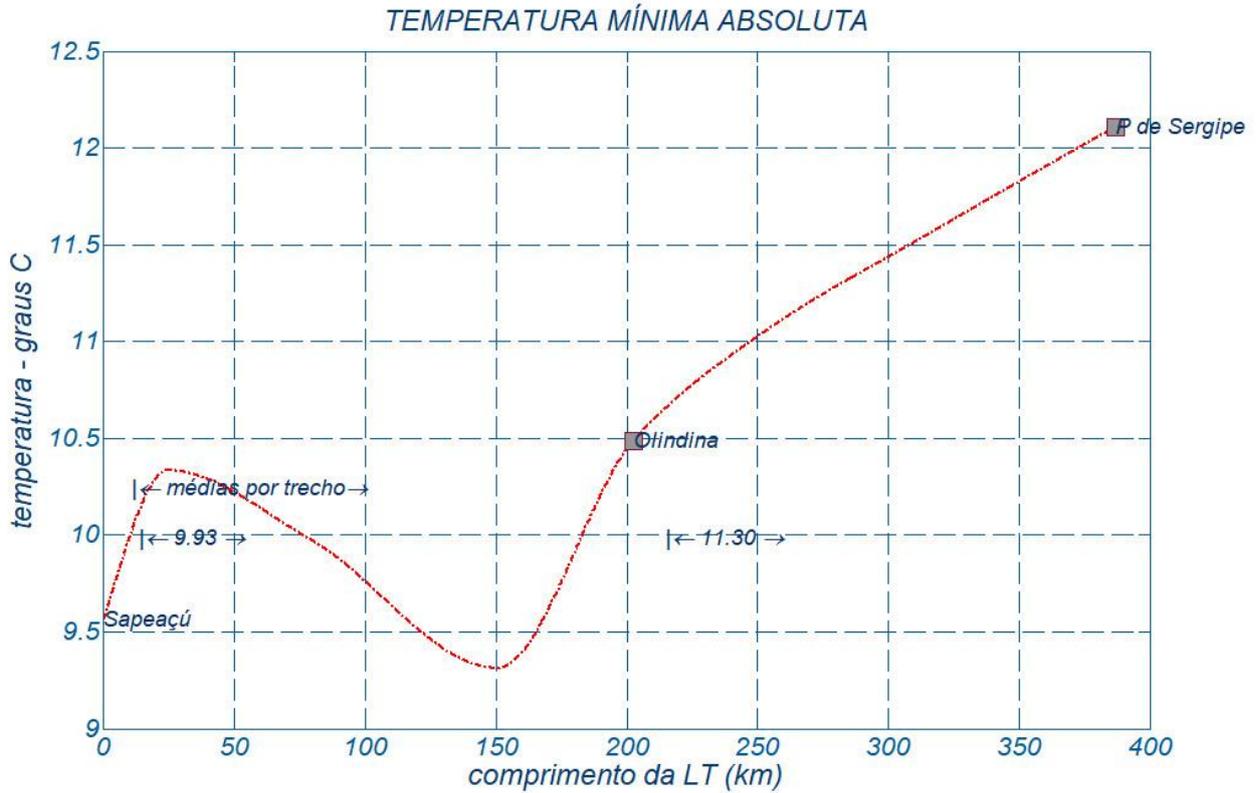
Anexo 4 Mapa das pressões atmosféricas

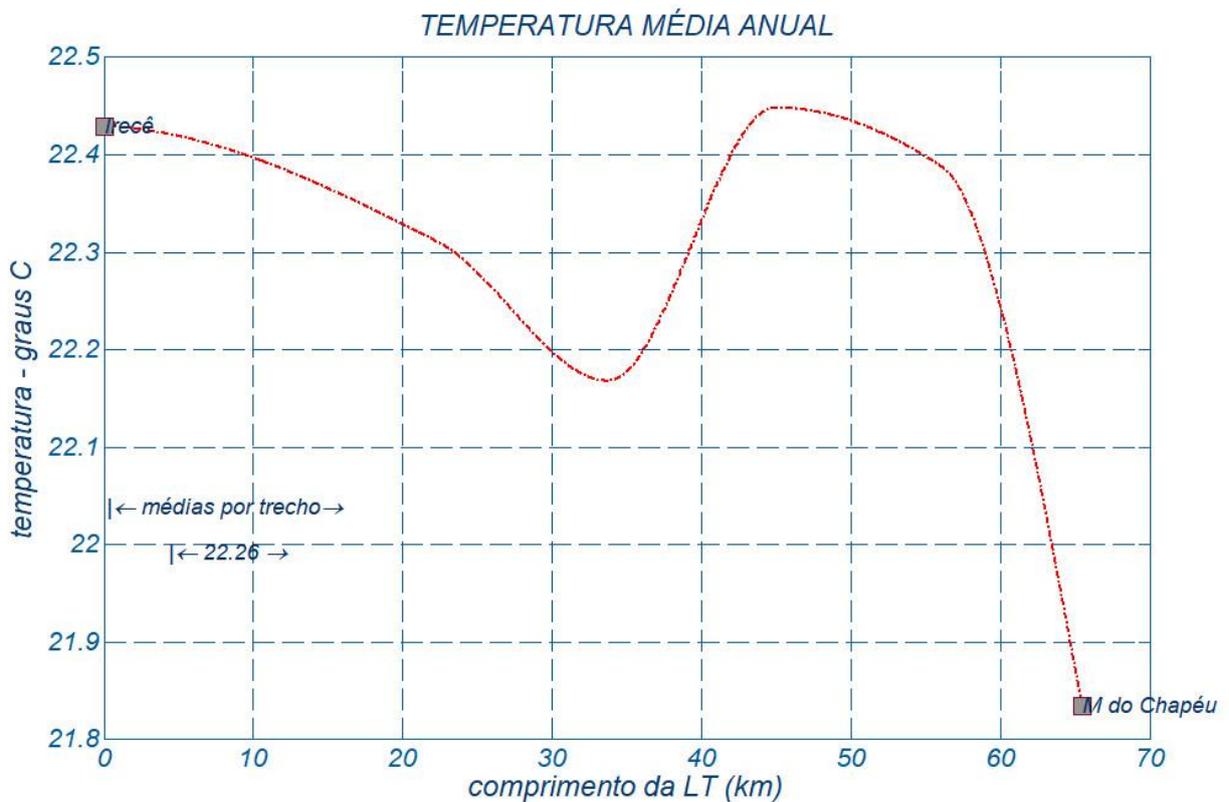
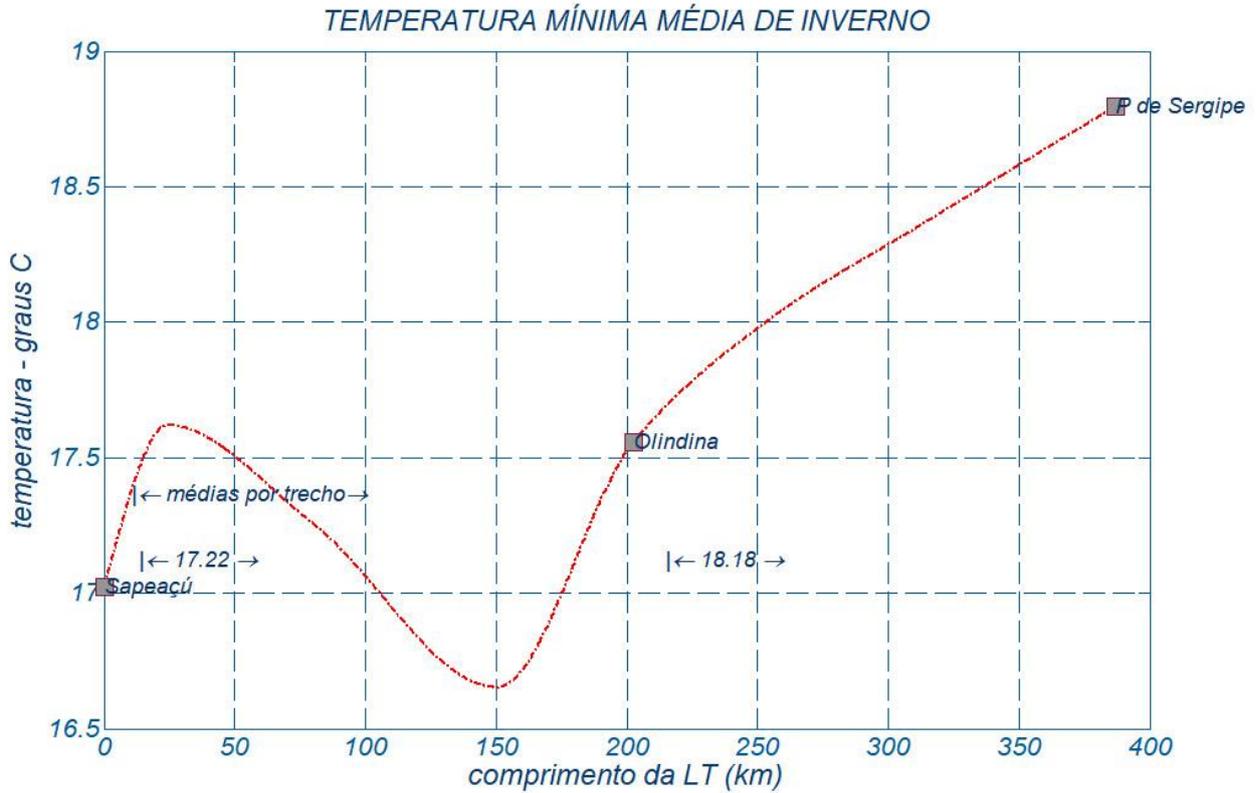


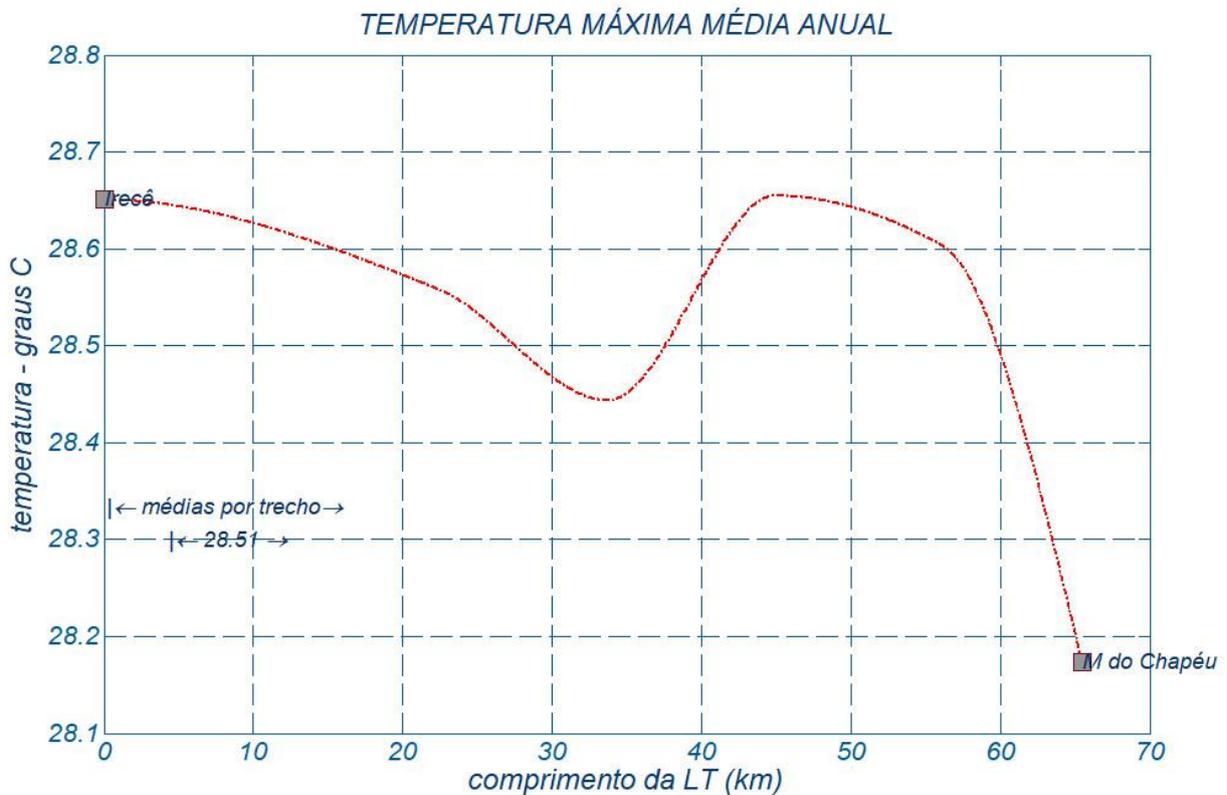
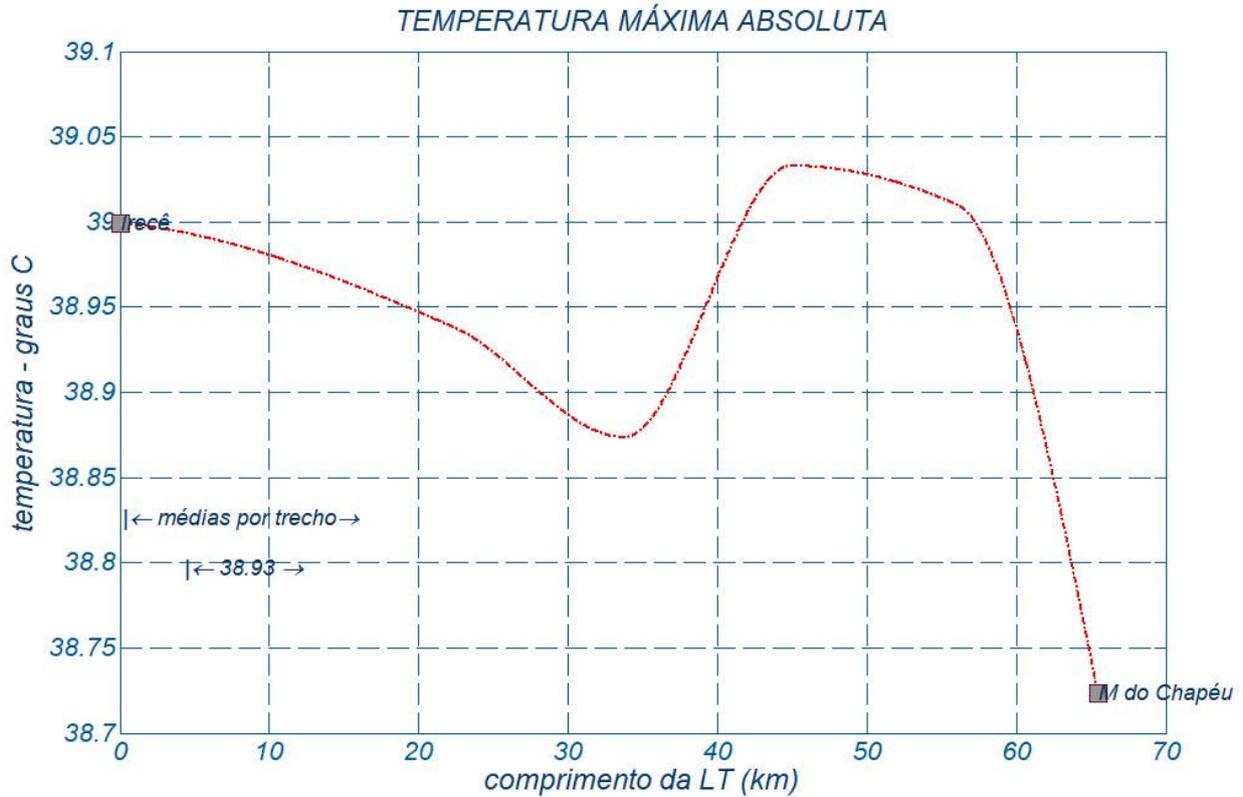
Anexo 5 Mapas das temperaturas ambientes

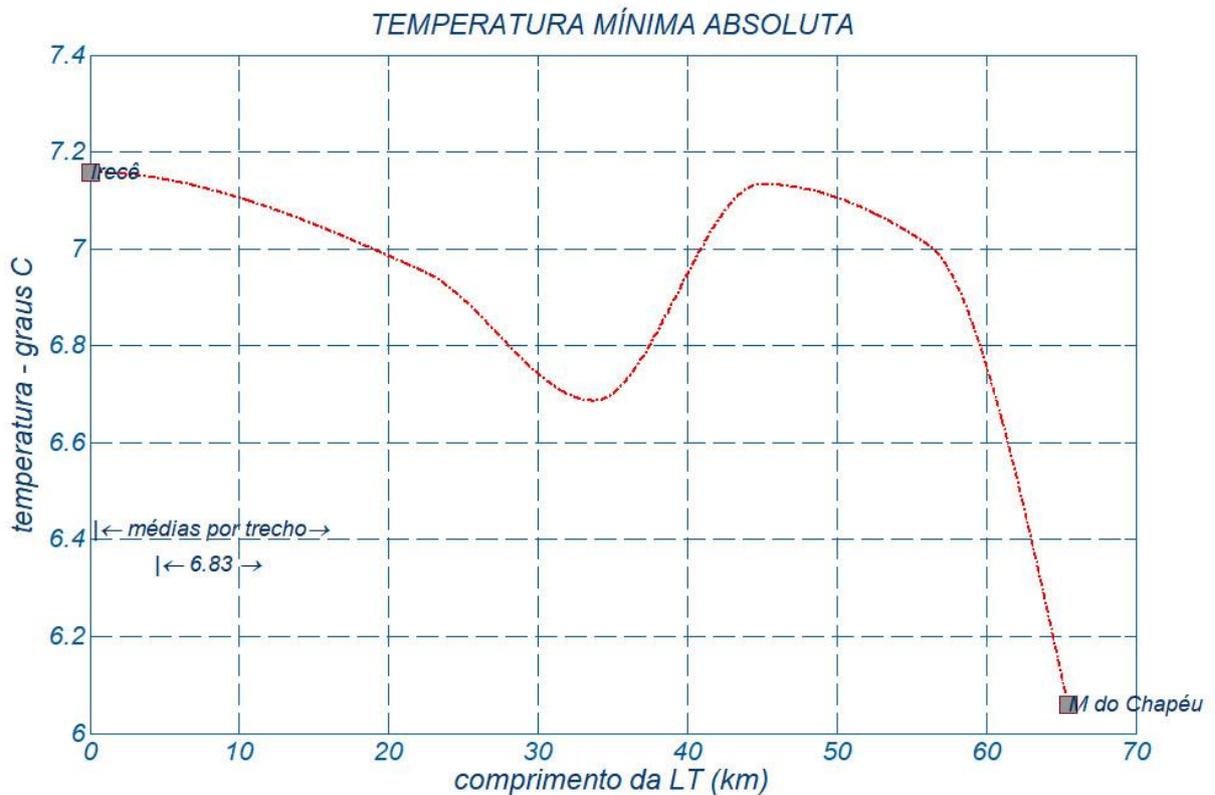
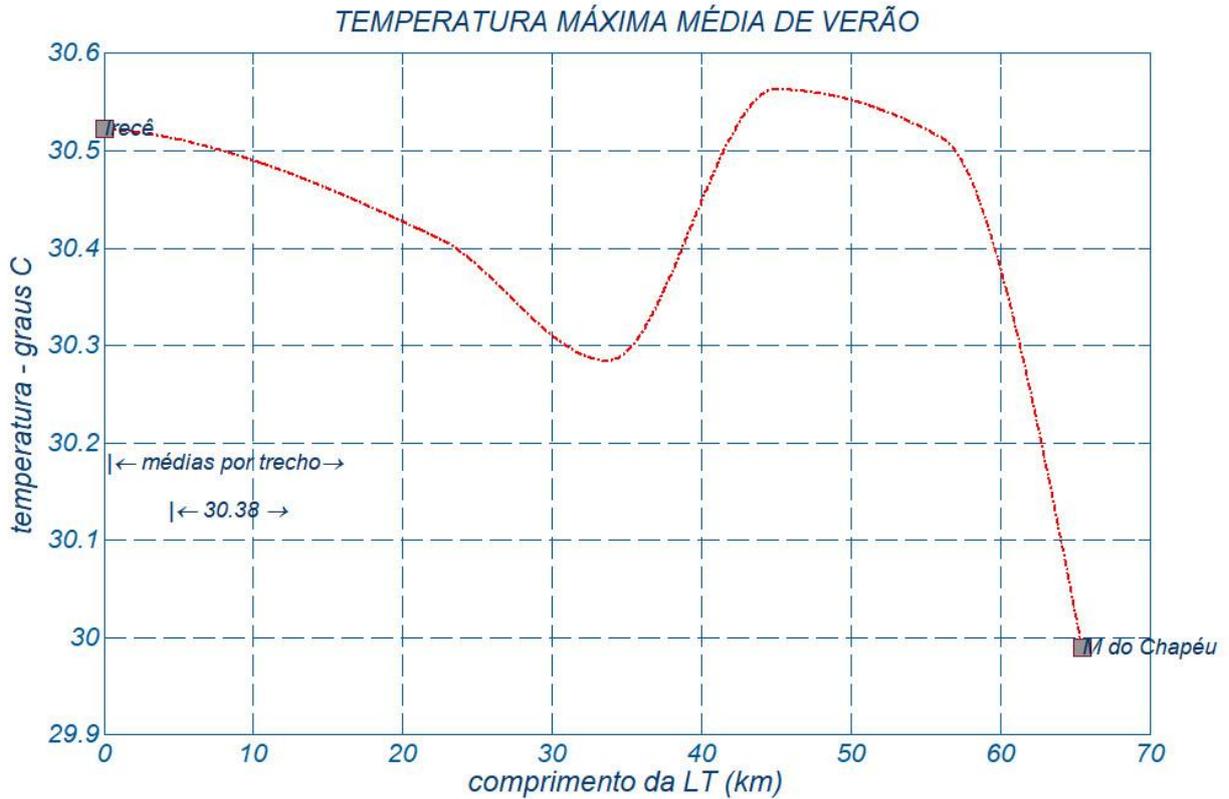


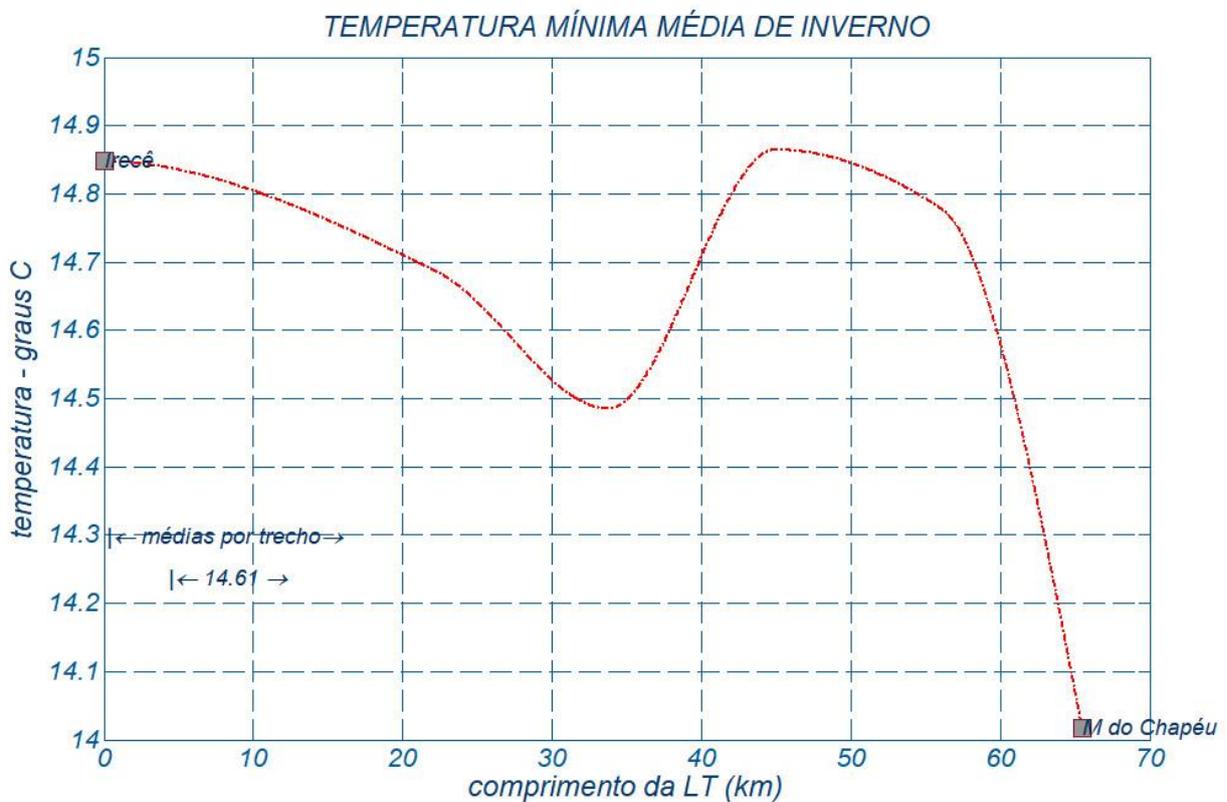
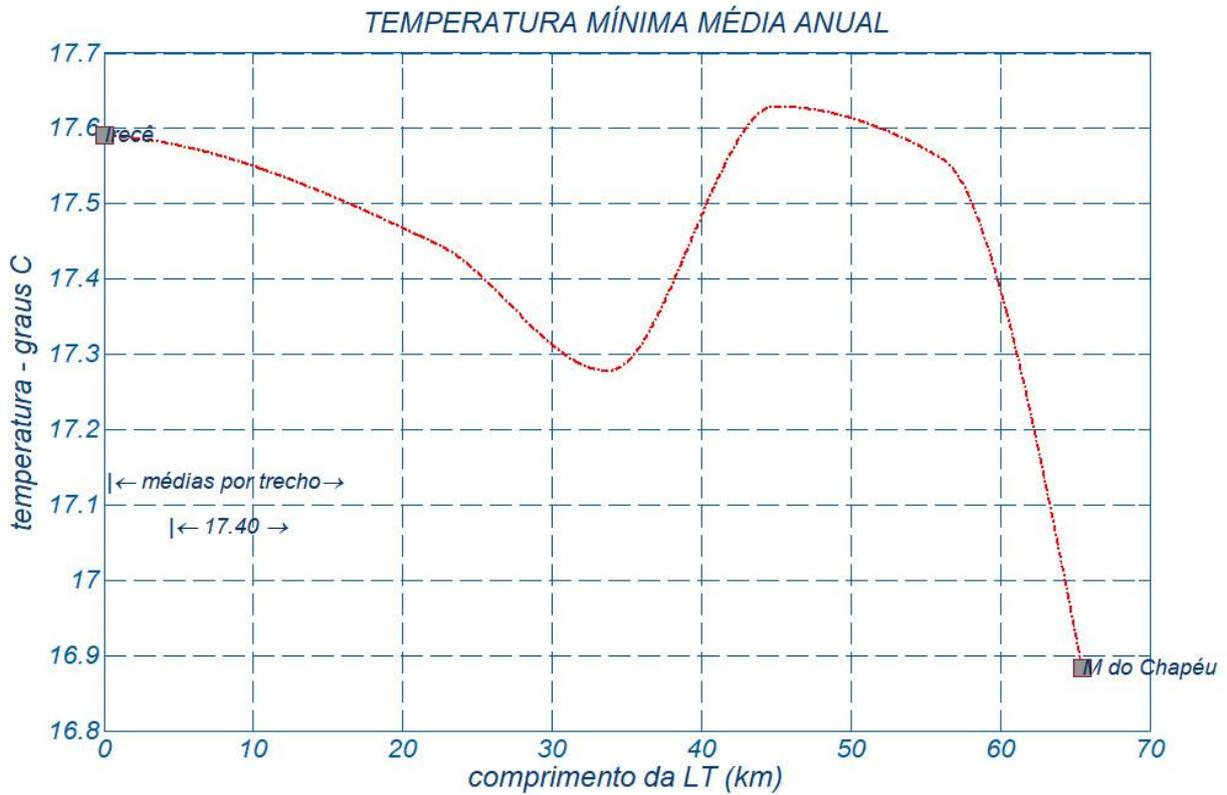




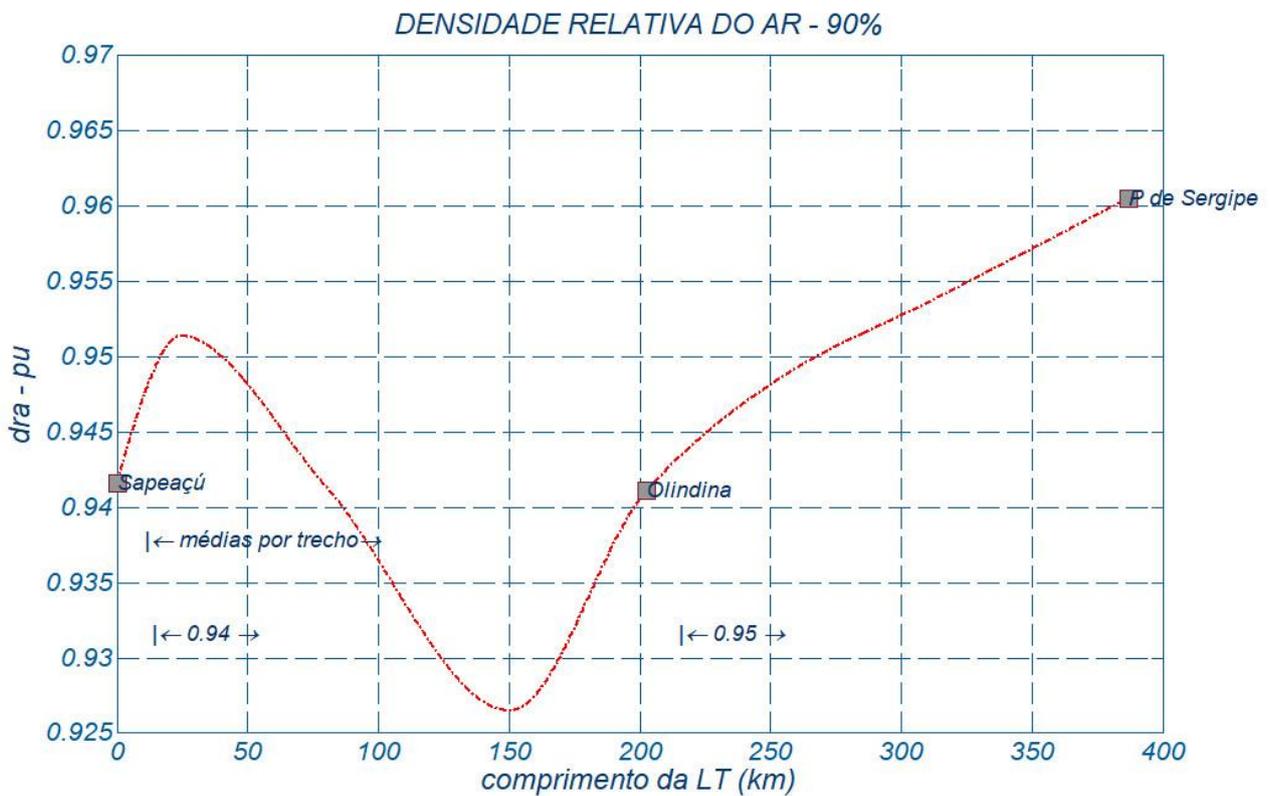
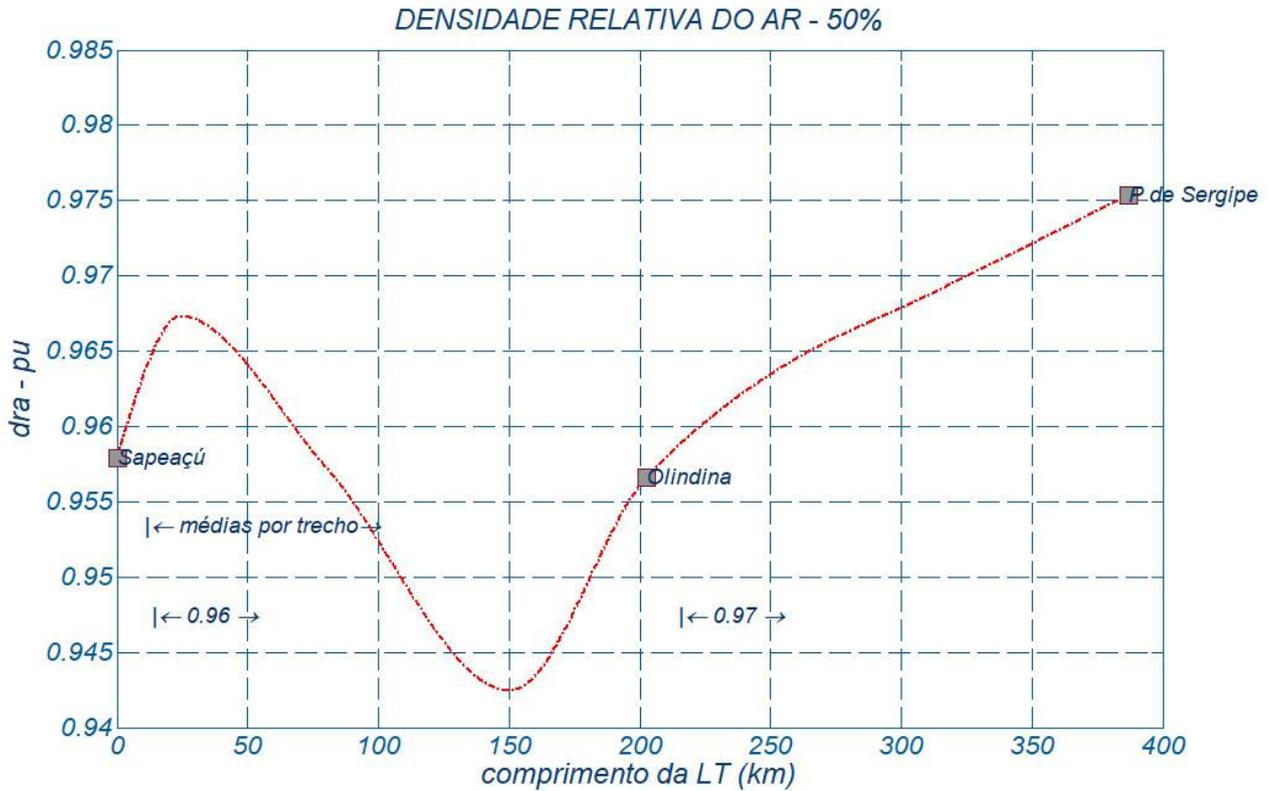


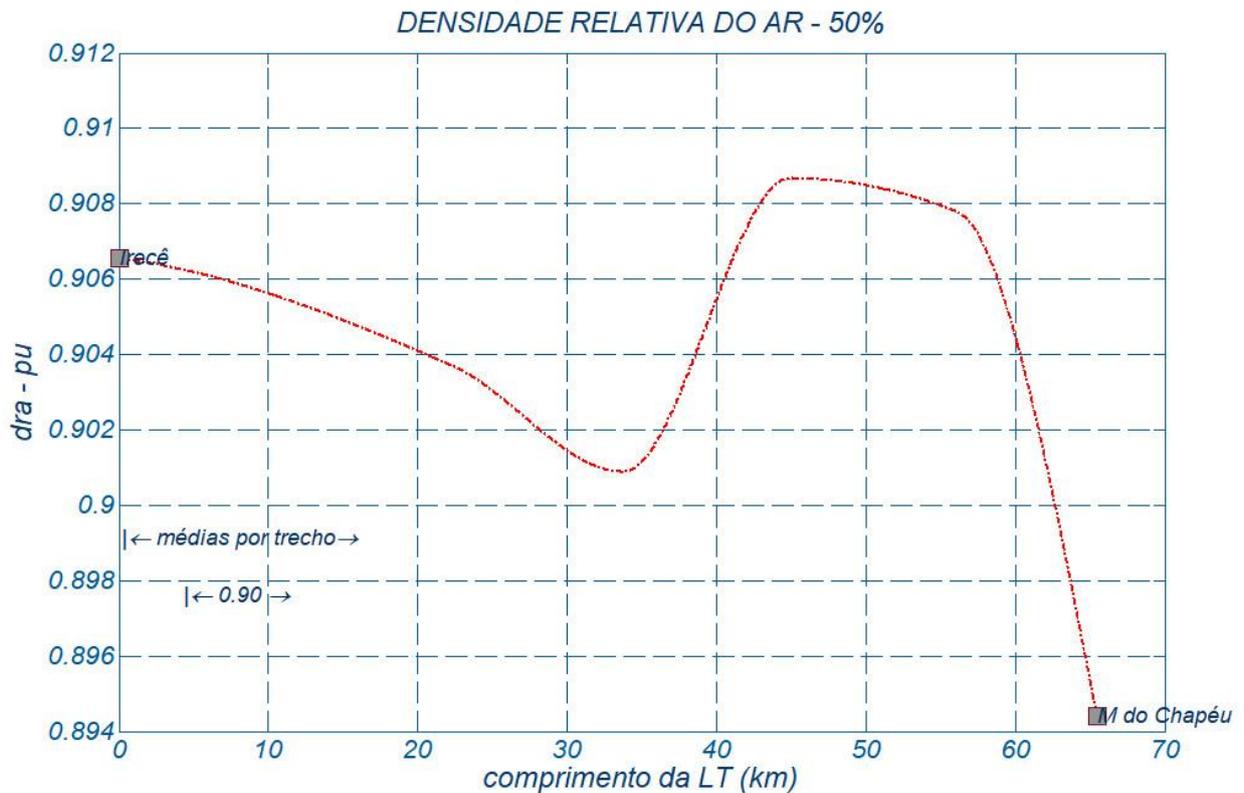
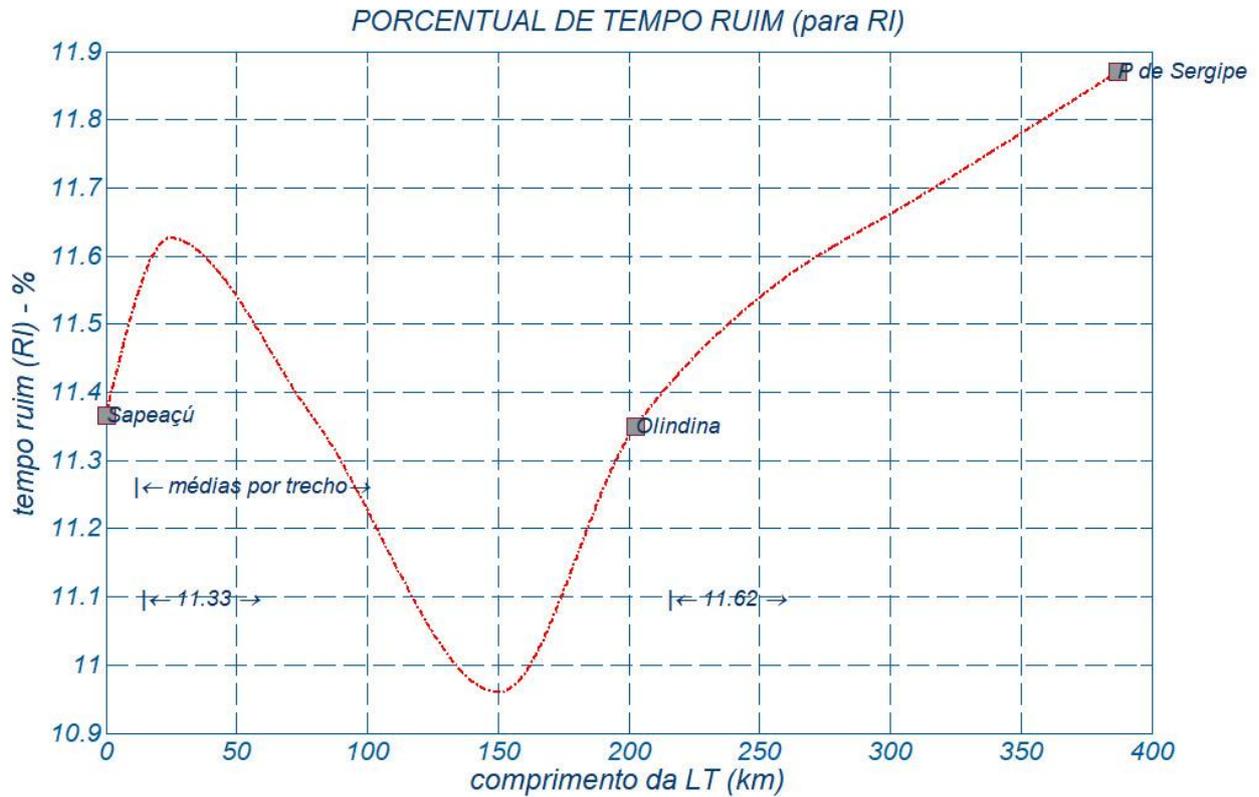


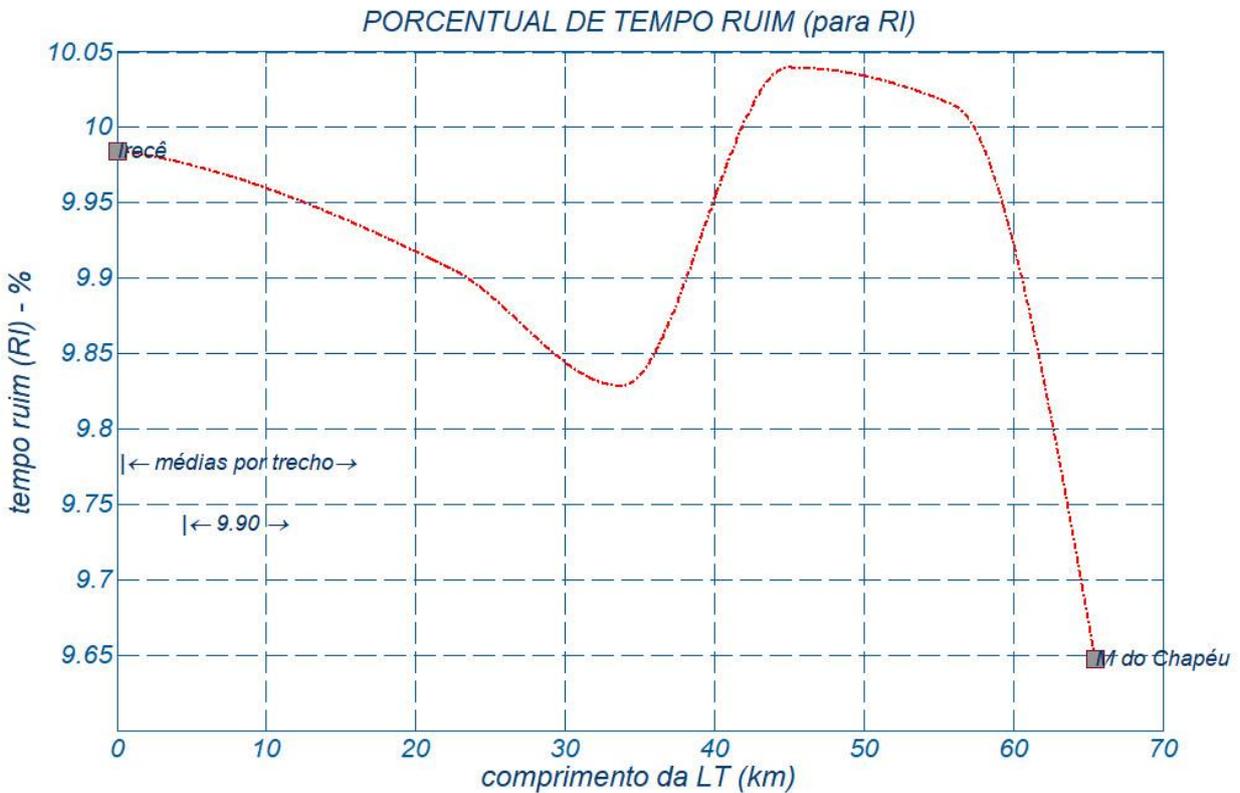
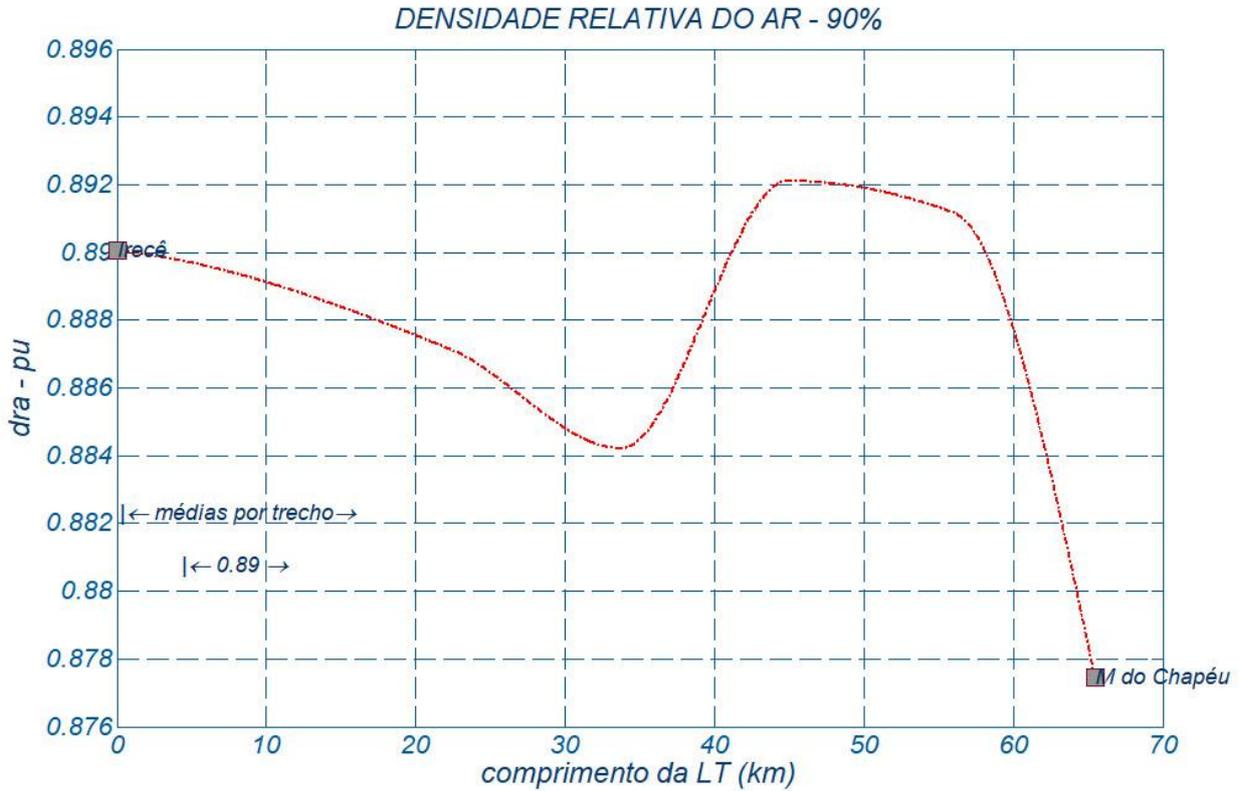




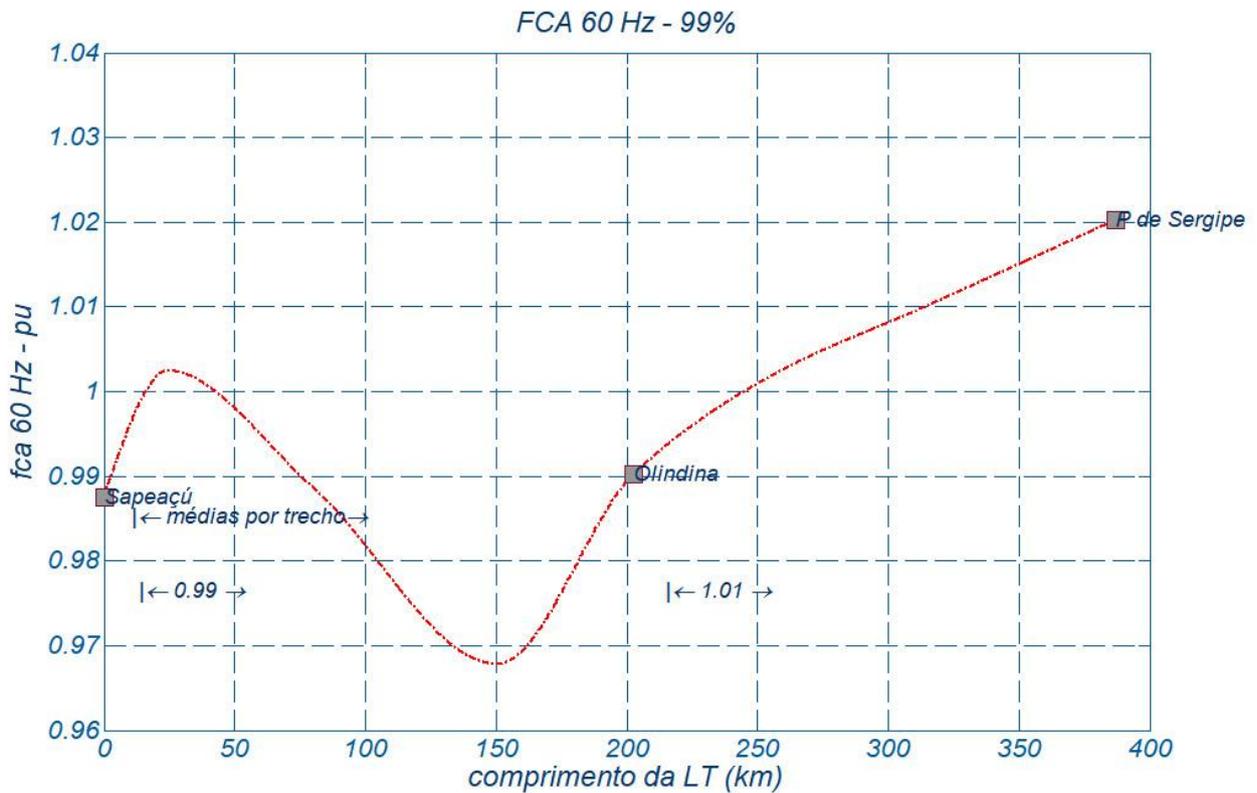
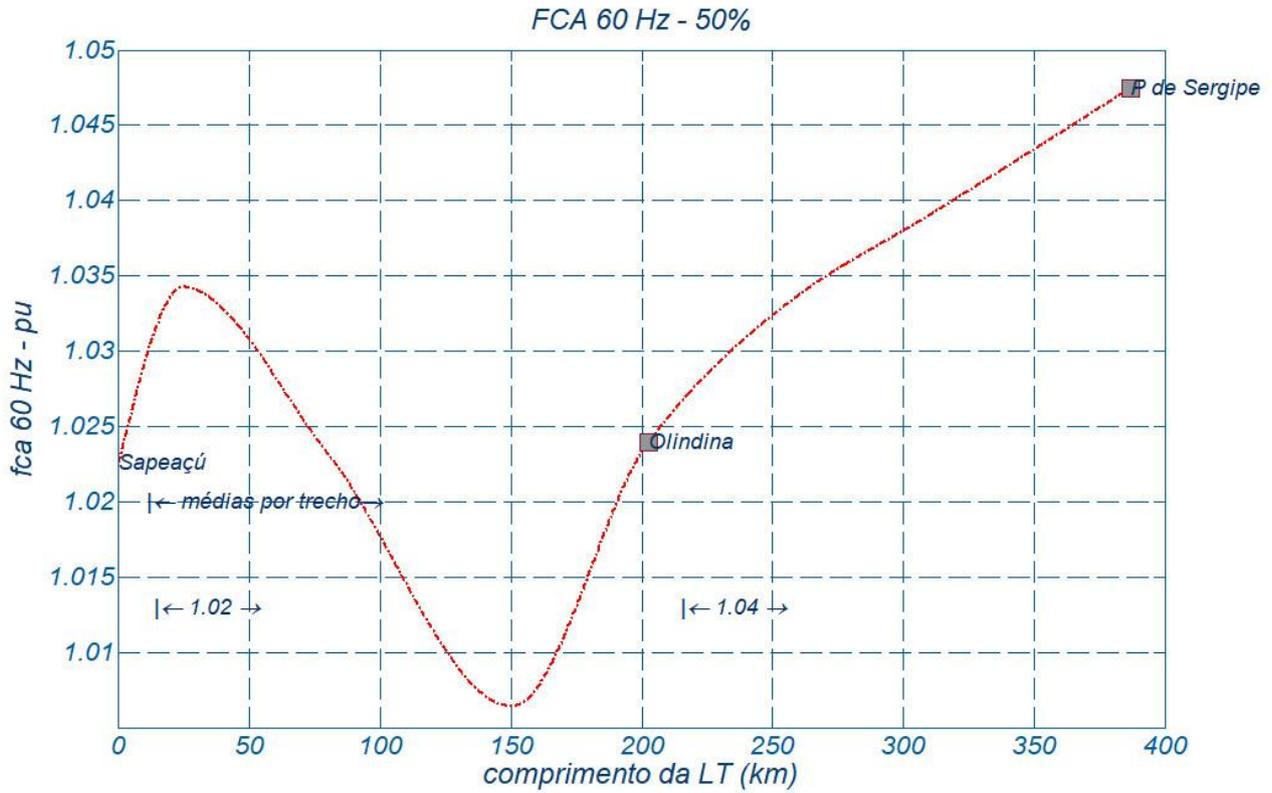
Anexo 6 Mapas das densidades relativas do ar e de “tempo - ruim”

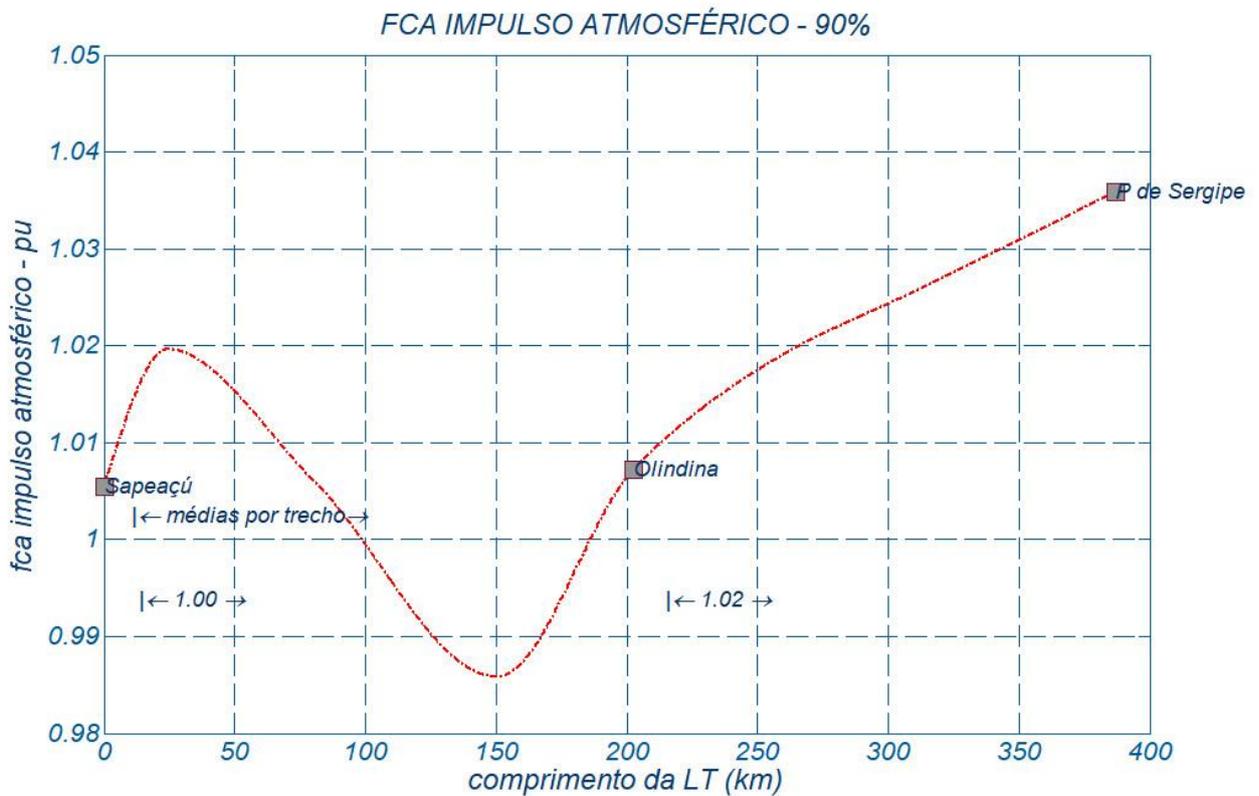
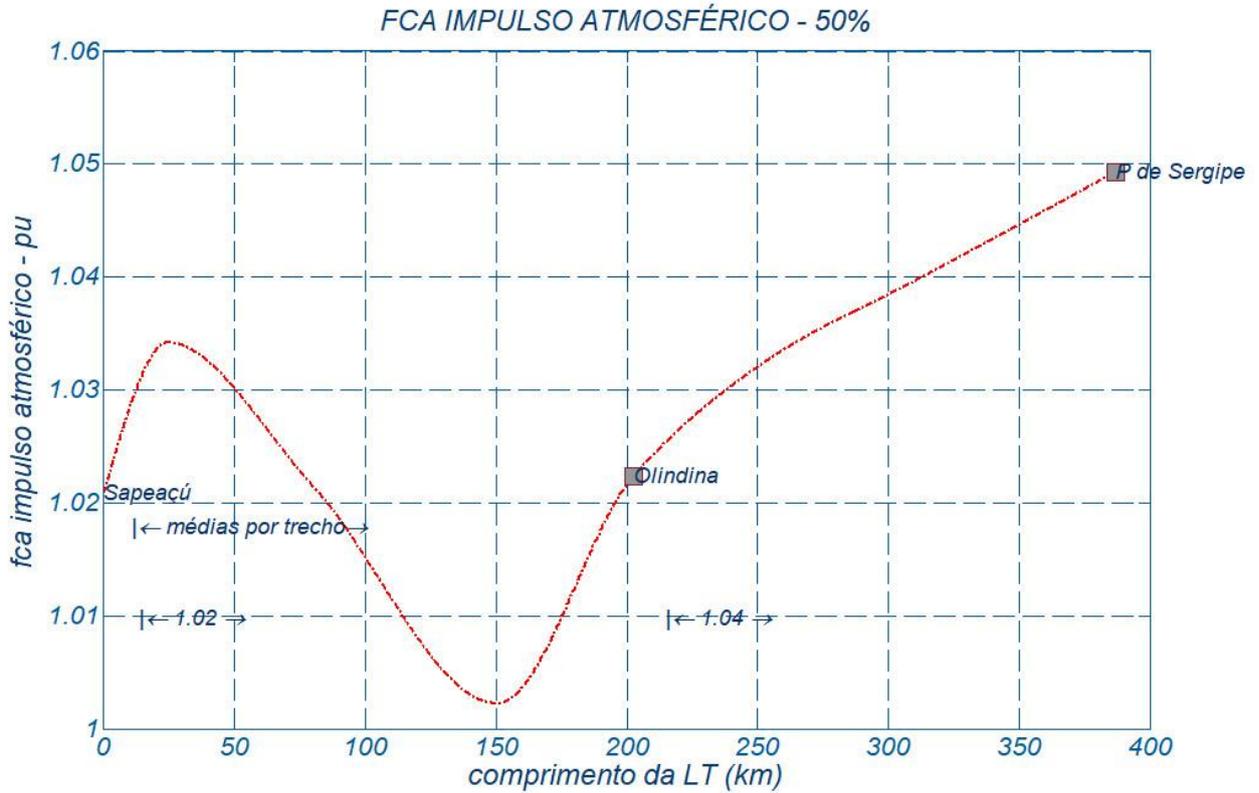


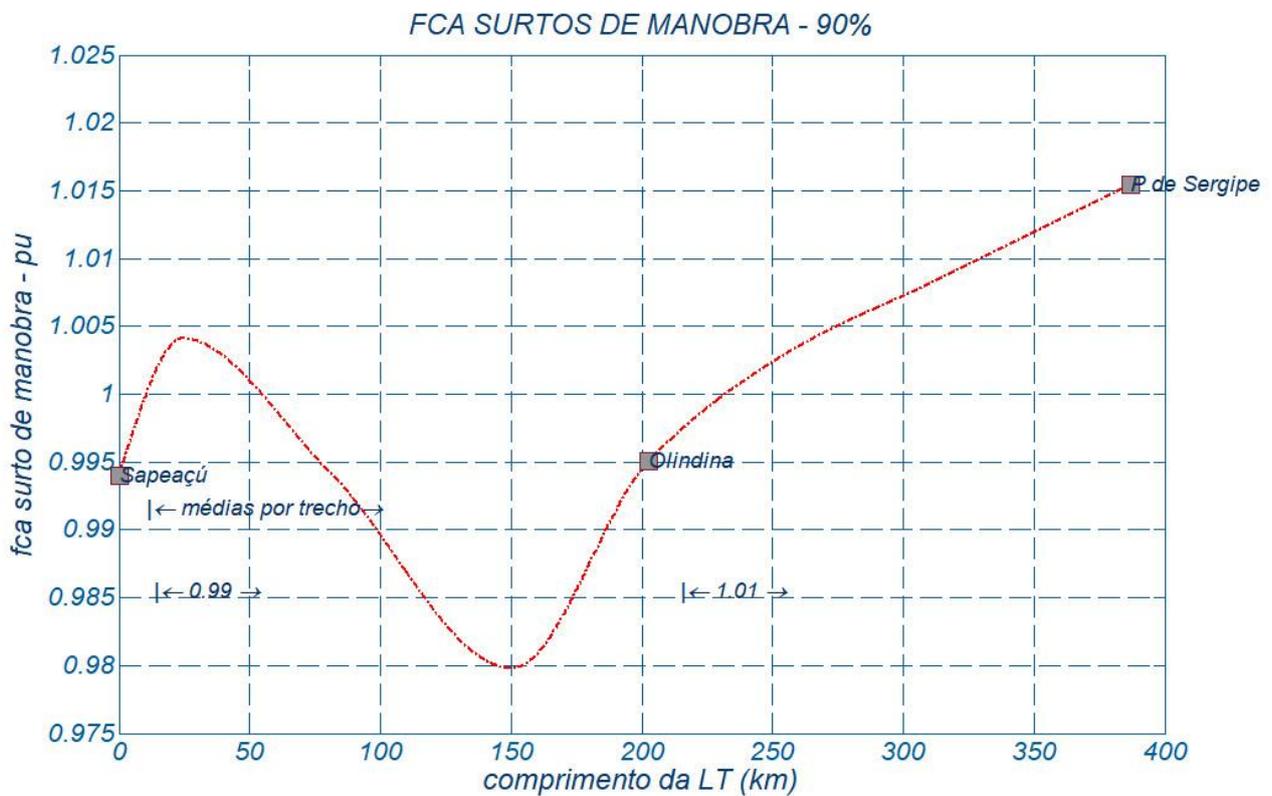
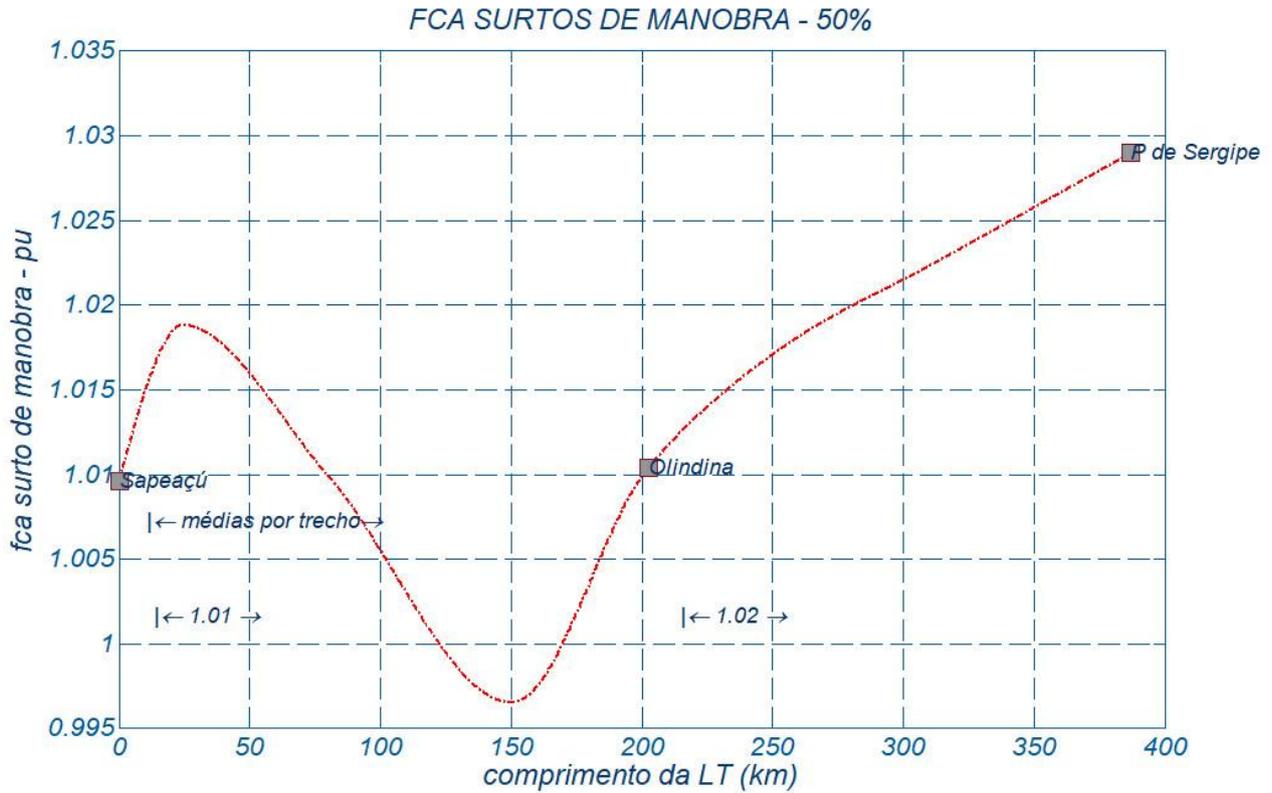


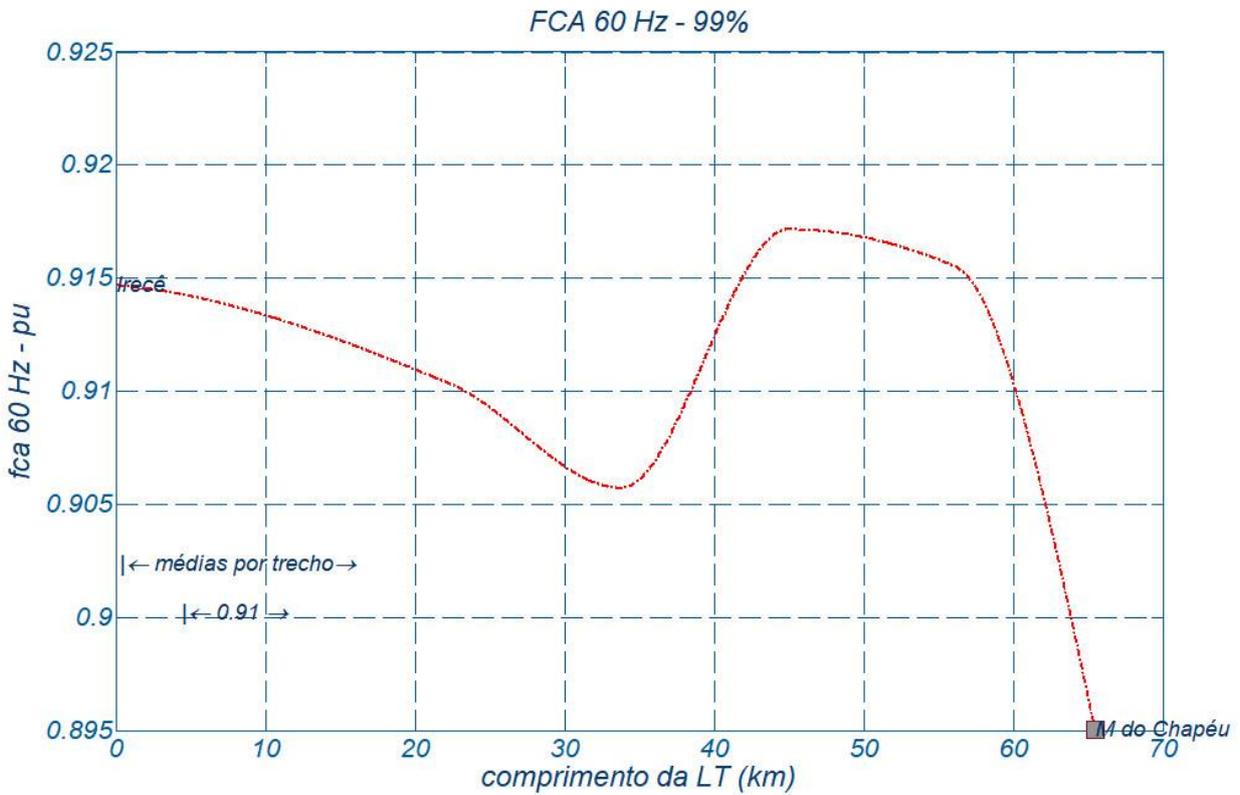
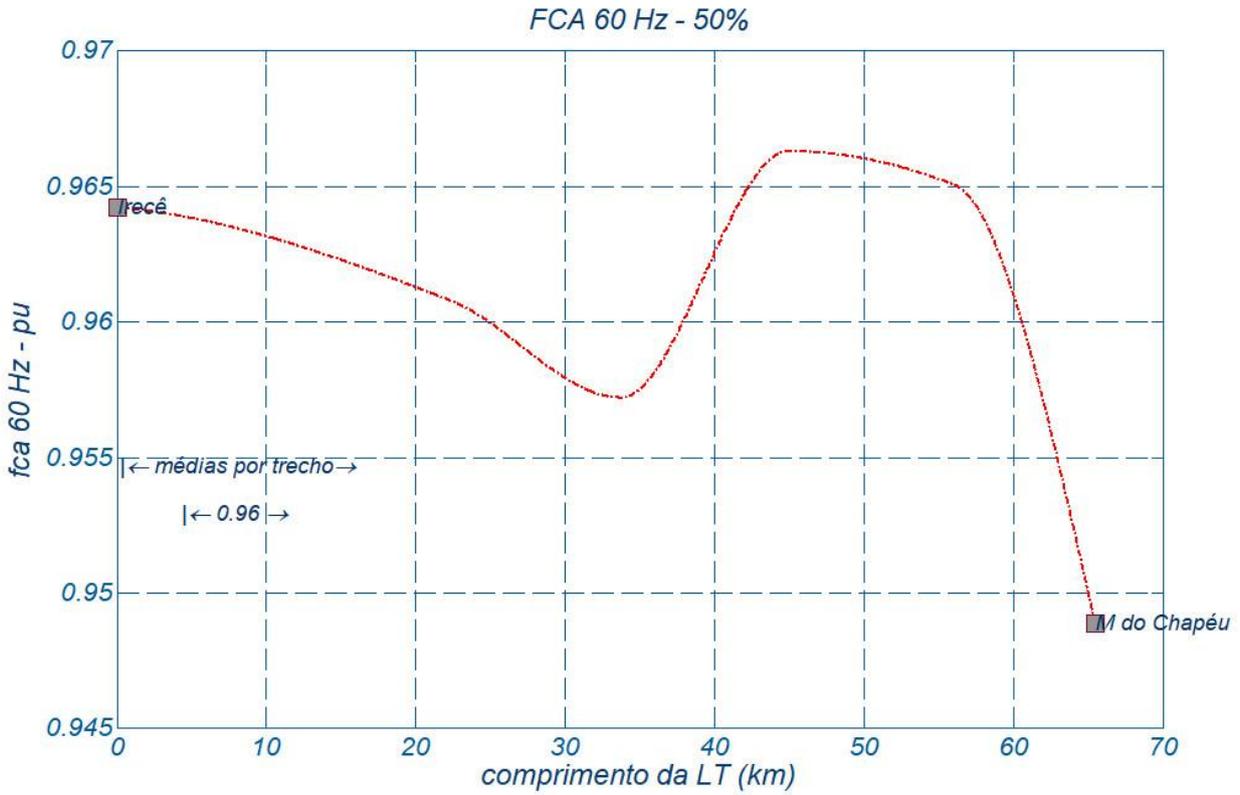


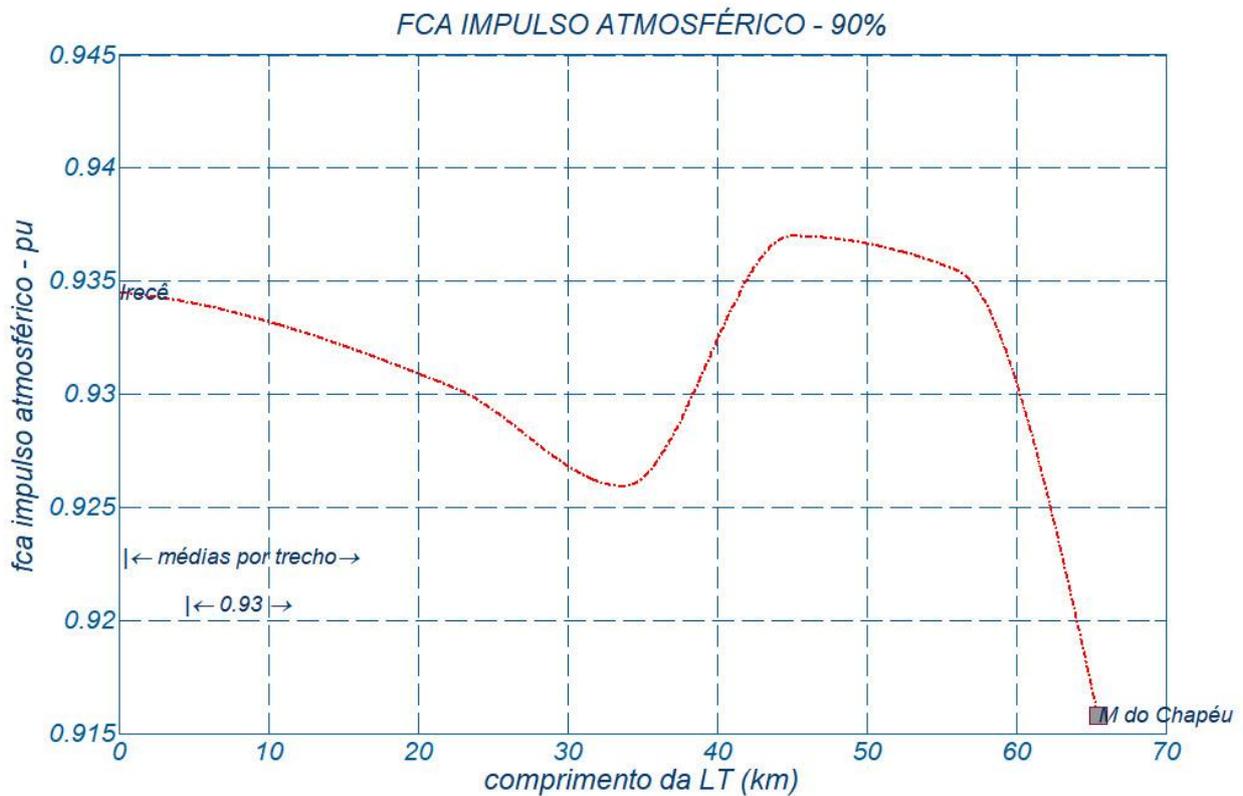
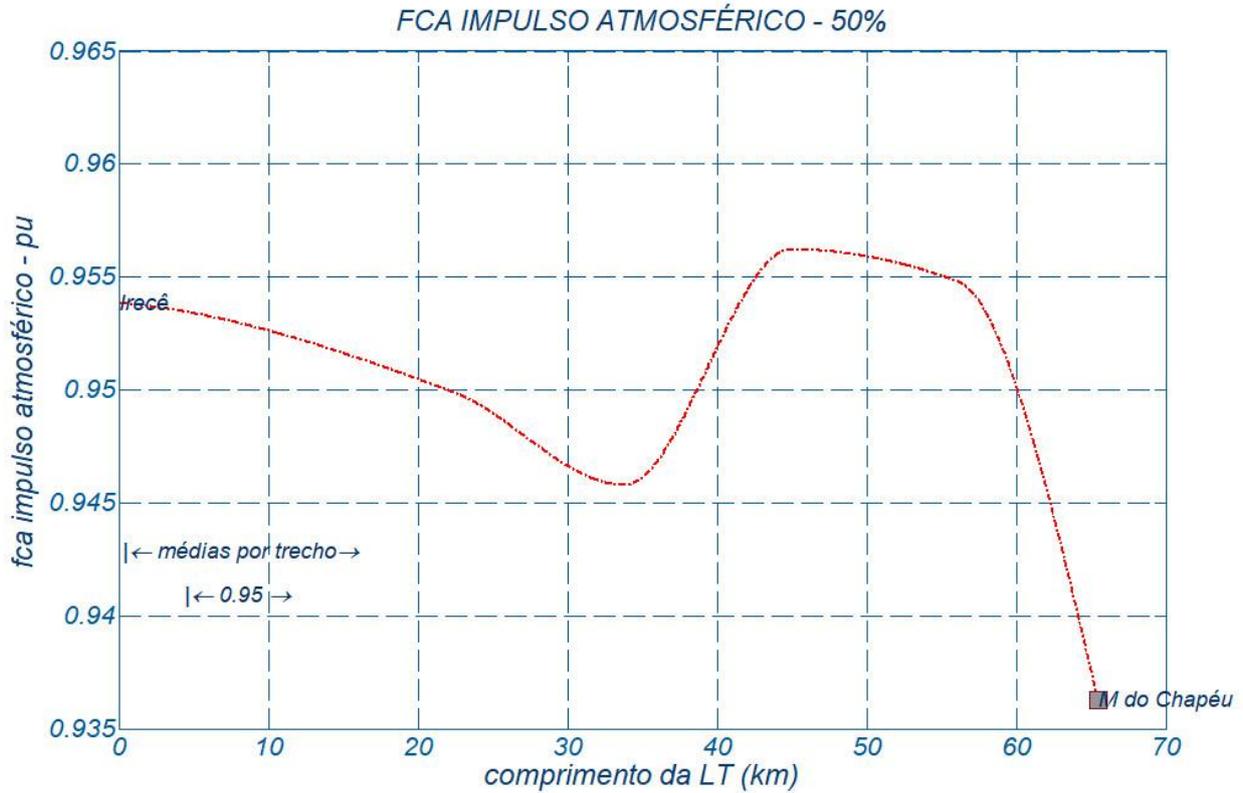
Anexo 7 Mapas dos fatores de correção atmosféricos

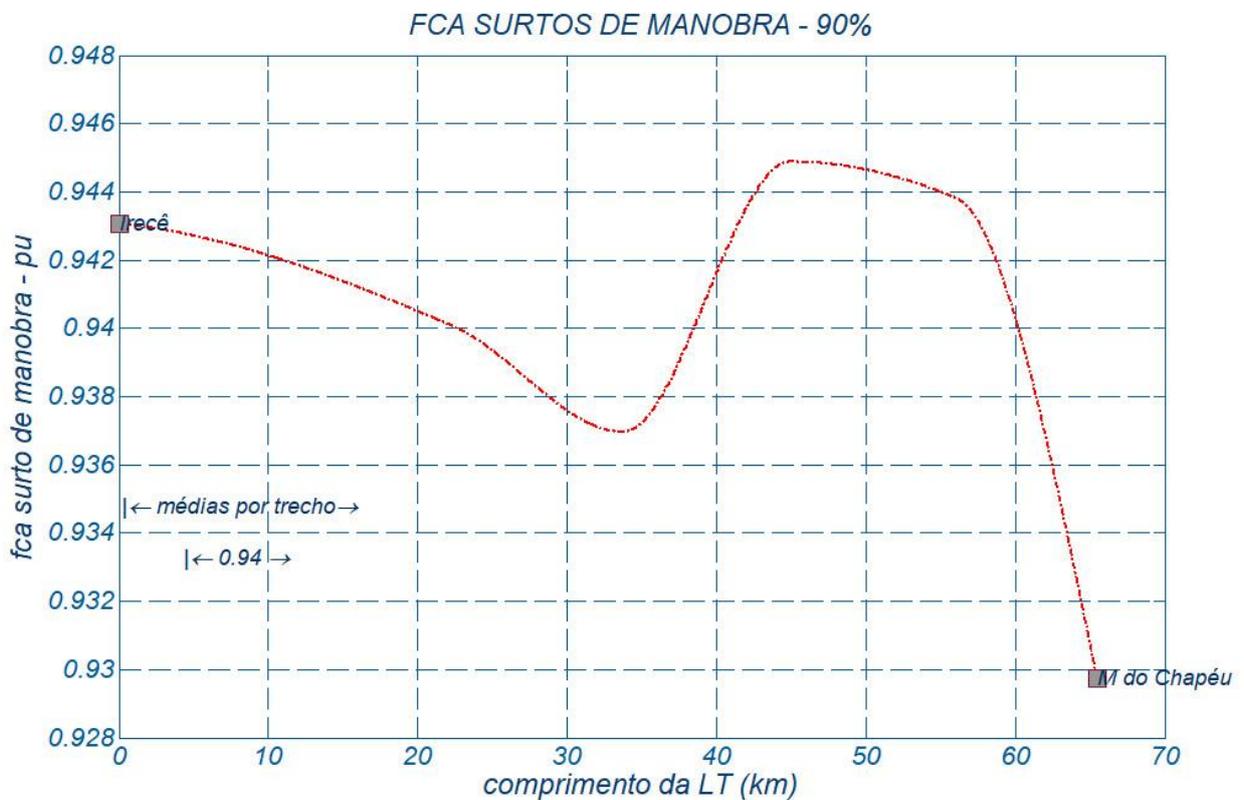




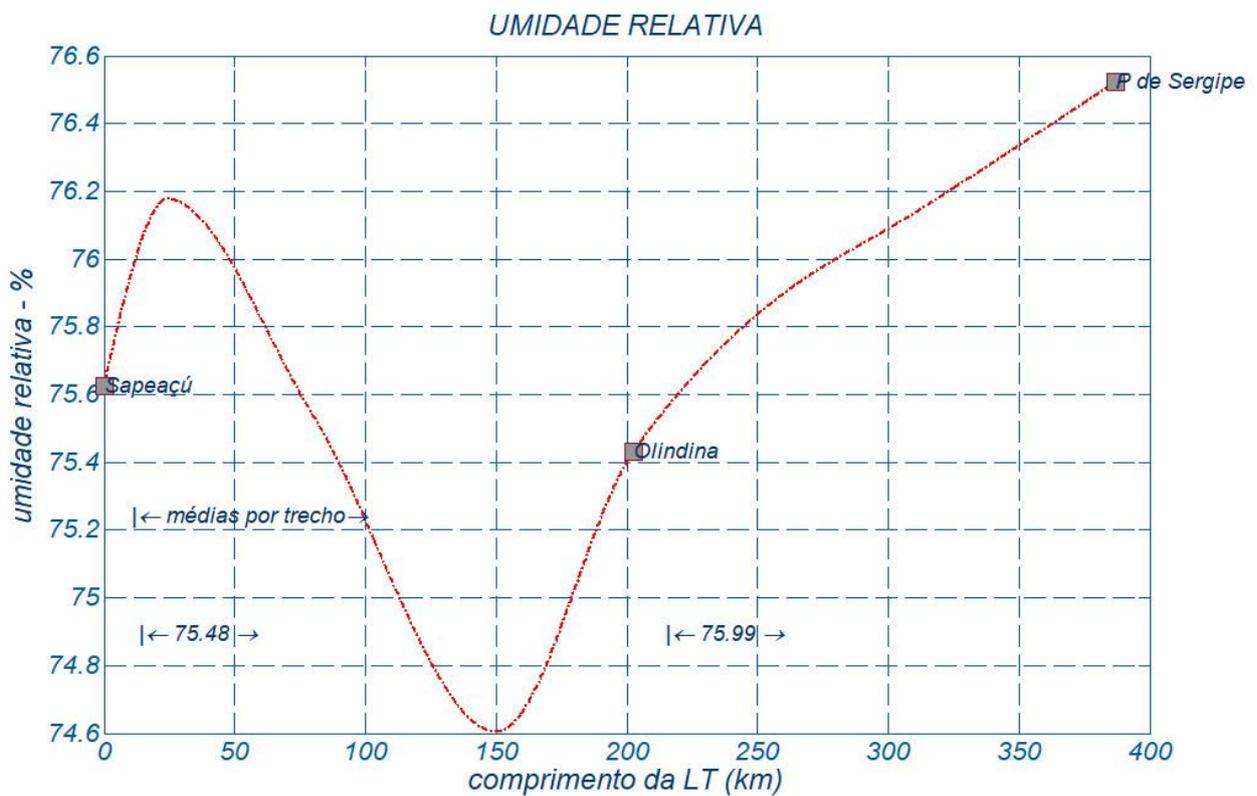
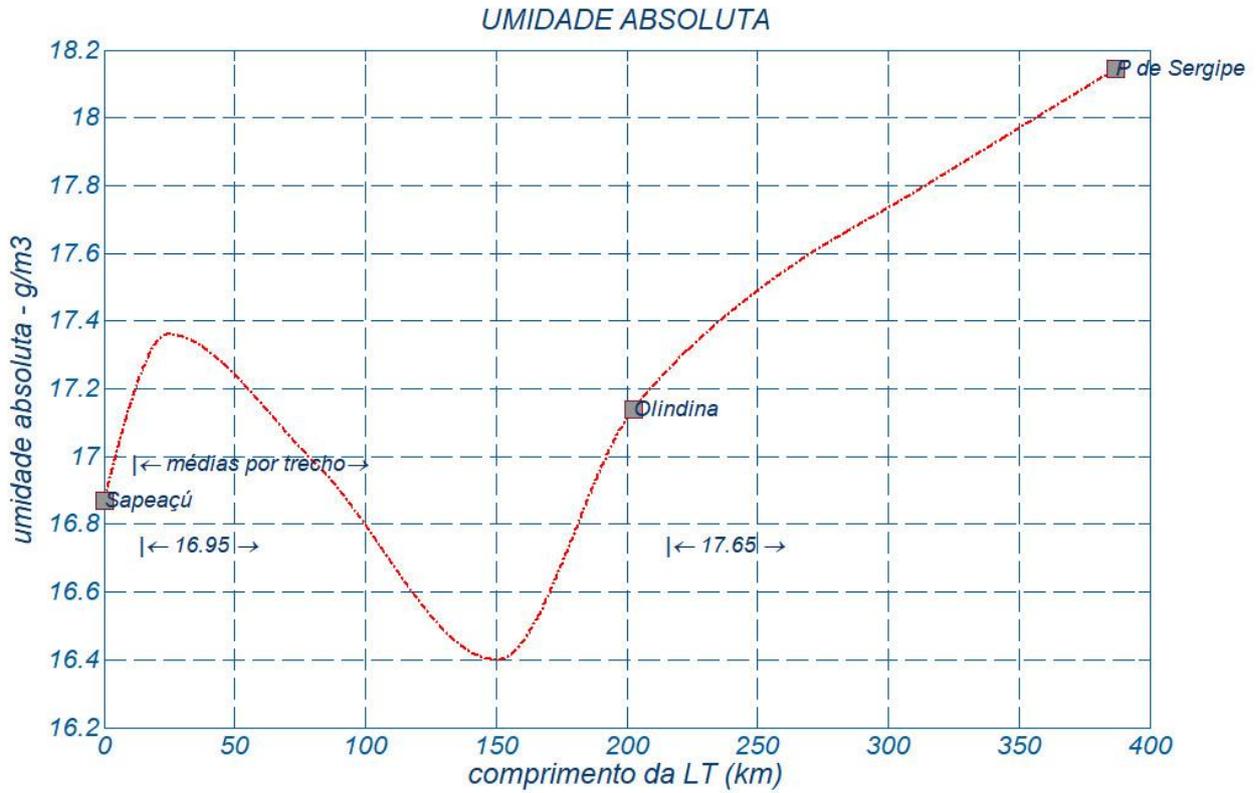


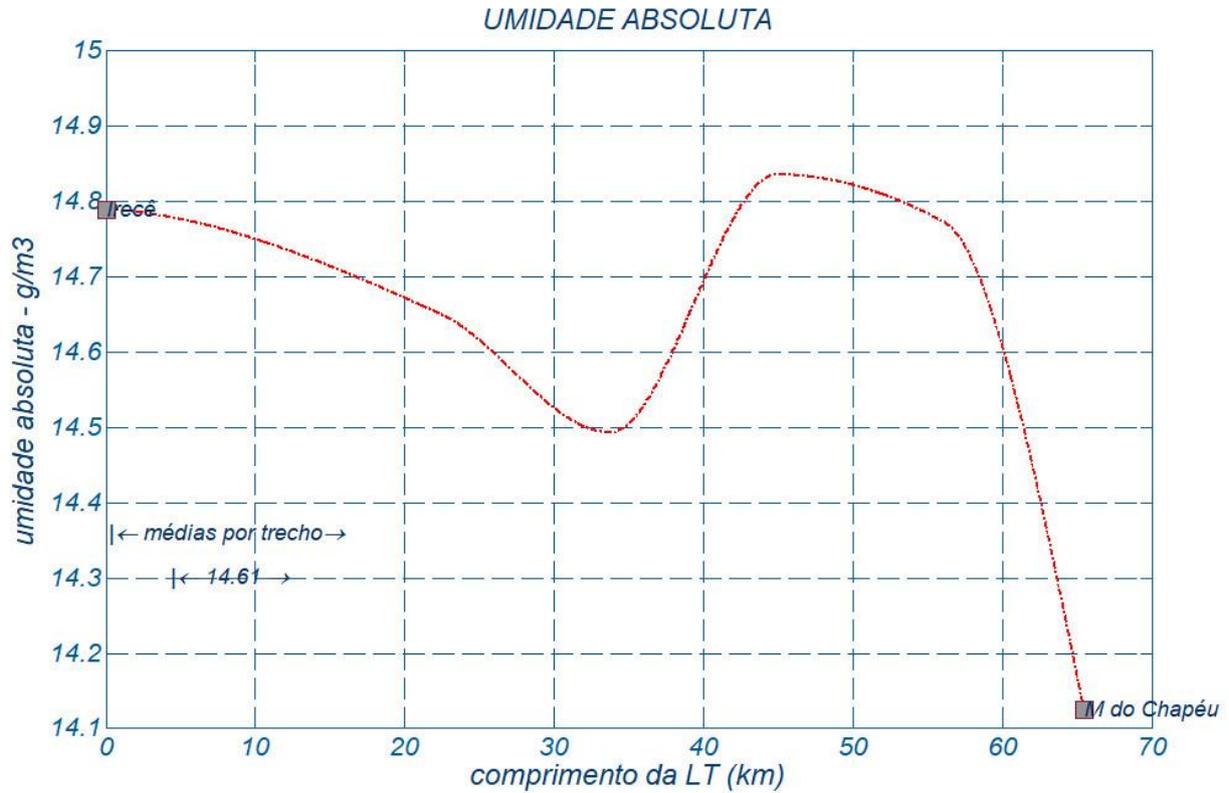






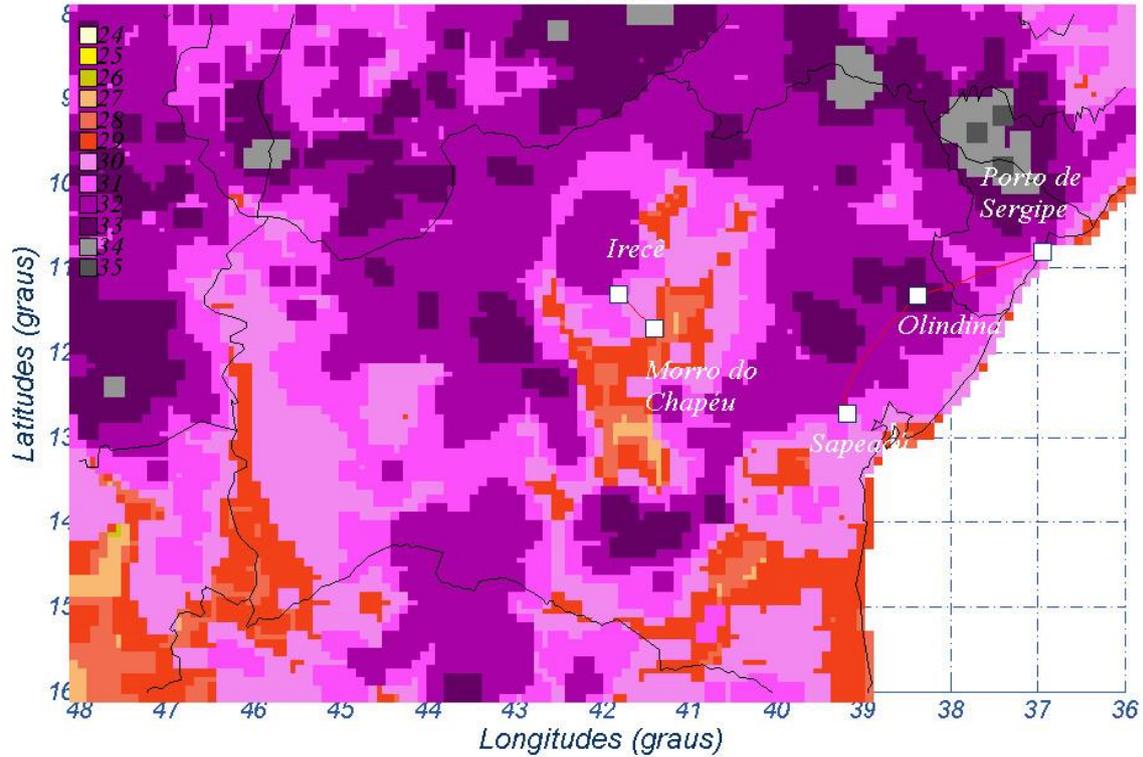
Anexo 8 Mapas das umidades do ar



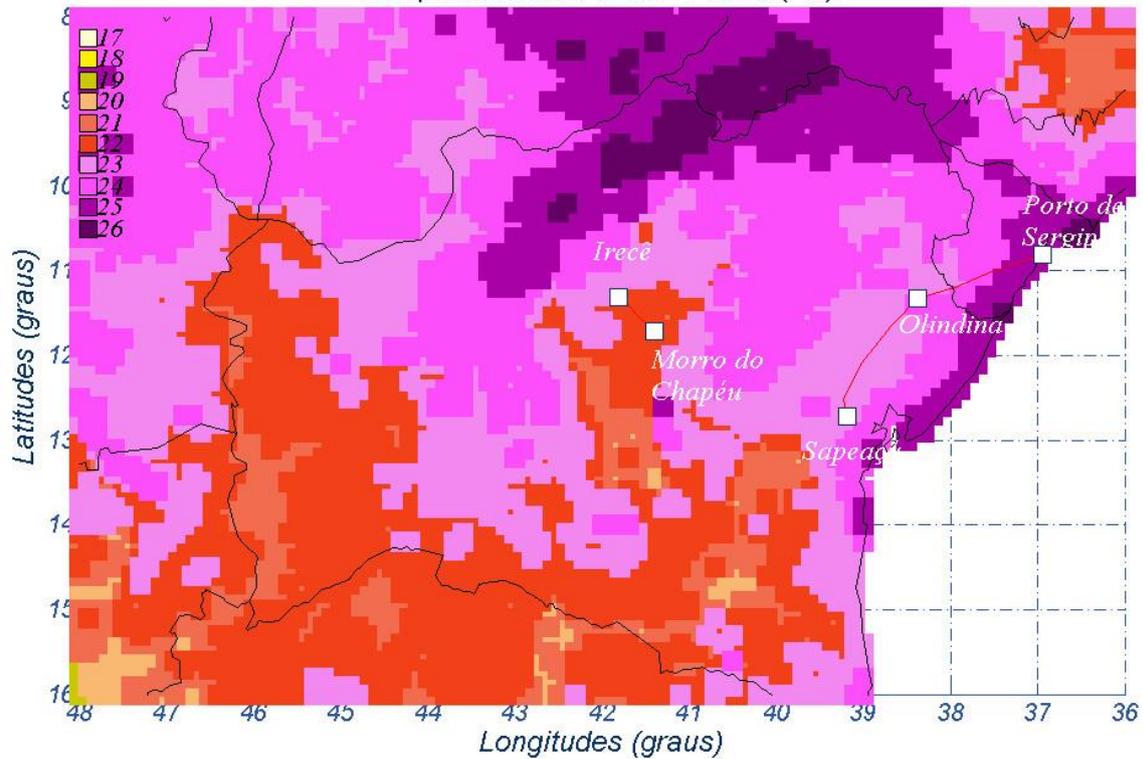


Anexo 9 Mapas das temperaturas para ampacidade sazonal

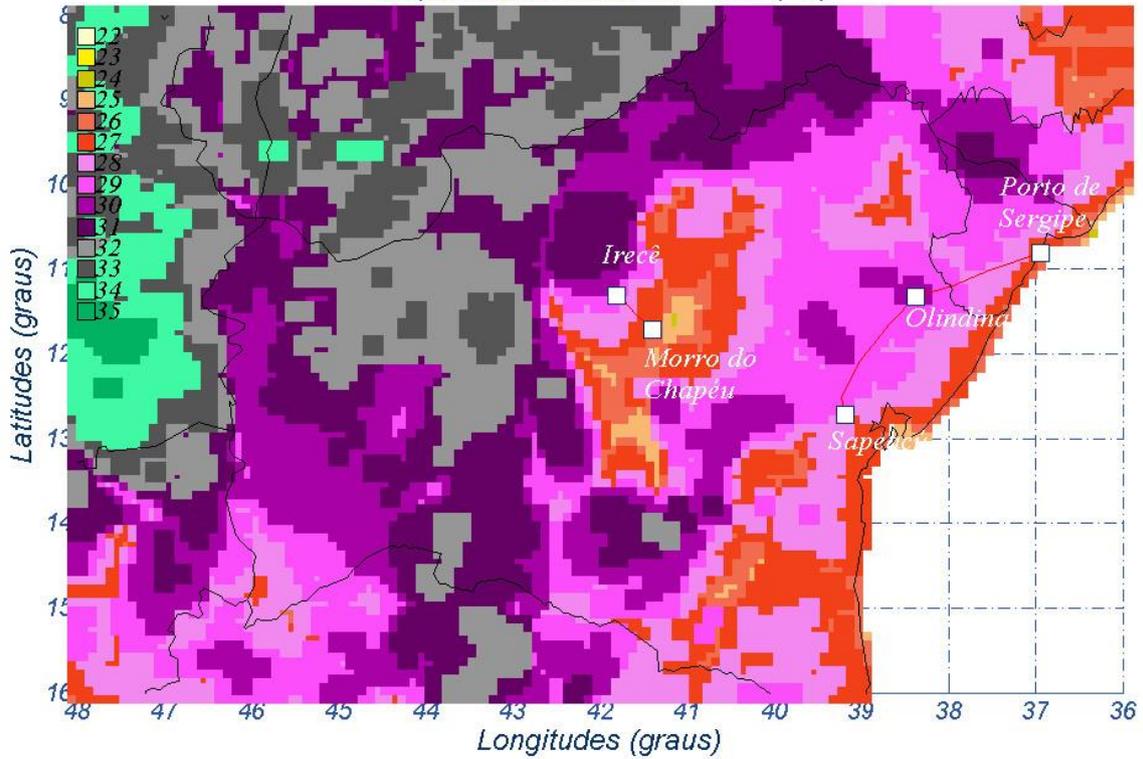
Temperaturas Verão - Dia (°C)



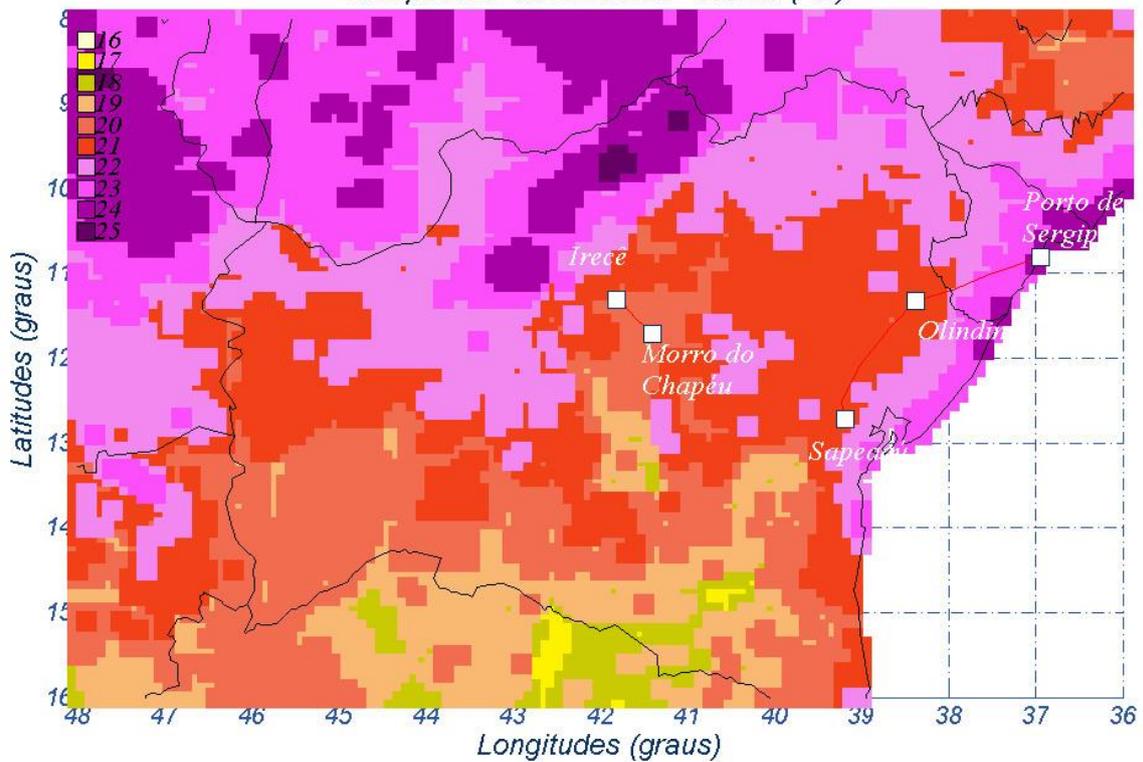
Temperaturas Verão - Noite (°C)



Temperaturas Inverno - Dia (°C)



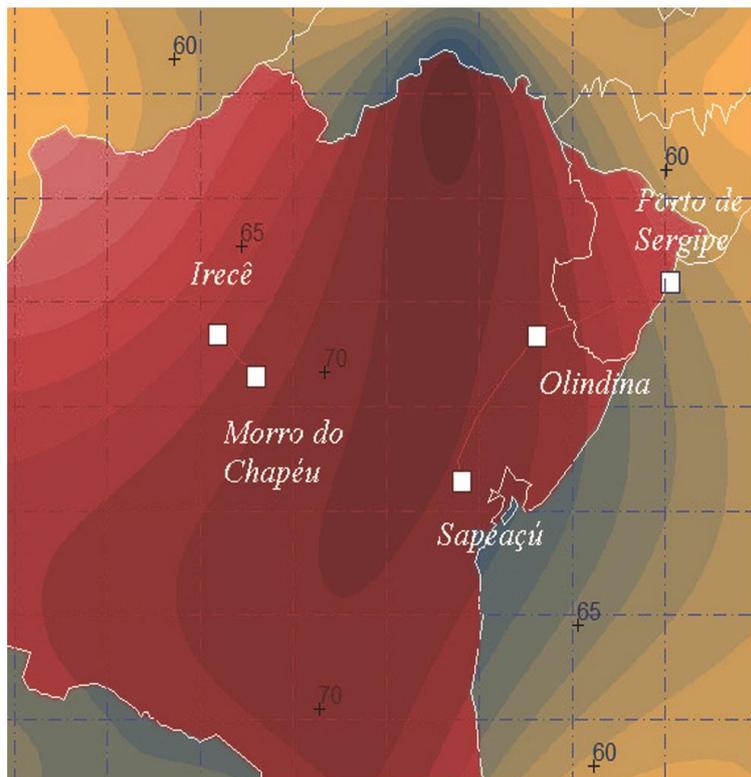
Temperaturas Inverno - Noite (°C)



ANEXO 2 – ISÓTACAS MÁXIMAS PARA A LT 500 KV PORTO SERGIPE – OLINDINA – SAPEAÇU

Relatório Técnico

***Isótacas Máximas para as LTs
500 kV P Sergipe - Olindina - Sapeaçu
e 230 kV Morro do Chapéu - Irecê***



Preparado por Amauri A Menezes em 10/2018

Este Relatório Técnico apresenta o memorial descritivo para a determinação das isótacas máximas previstas para a LT acima citada. A reprodução parcial ou total deste documento só deve ser feita com a permissão da BATÁVIA Engenharia

1	Objetivo.....	3
2	Introdução.....	3
3	Características das estações.....	4
3.1	Critérios de regionalização	4
3.2	Rugosidade dos terrenos.....	6
4	Os mapeamentos.....	6
5	Ventos básicos de projeto	7
	Anexo I Critérios a serem atendidos (sic).....	11
	Anexo II Distribuição de Gumbel e velocidades máximas de vento	12
	Anexo III Os ajustes da distribuição de Gumbel às amostras.....	13
	Anexo IV Os mapeamentos de isótacas da região.....	16
	Anexo V O problema da turbulência dos ventos no Brasil	24
	Anexo VI Regionalização dos CVs das séries históricas	25
	Critérios de regionalização dos coeficientes de variação.....	25
	AVI.1 Para as séries de 10 minutos.....	25
	AVI.2 Para as séries de 3 segundos.....	26
	AVI.3 Para as séries de 30 segundos.....	26
	Anexo VII Mitigação da Ação dos Ventos sobre LTs Aéreas.....	27
	AVII.1 O desempenho esperado das LTs aéreas	27
	AVII.2 E quando um revés inesperado acontecer?	27
	AVII.3 As formas de aprimoramento contínuo	29
	AVII.4 A distribuição de GUMBEL como alternativa isolada.....	30
	AVII.5 Ventos determinísticos - quais são?.....	31

1 Objetivo

Este relatório apresenta os cálculos das velocidades elevadas de vento a serem esperadas para a região de implantação das LTs

*Porto Sergipe - Olindina - Sapeaçu, C1, 500 kV, 387 km e
Morro do Chapéu - Irecê, C2 e C3, 230 kV, 67 km*

O objetivo deste relatório é o de prover os setores de projeto com velocidades de vento máximas prospectivas e seguras que atendam às exigências técnicas constantes dos mais recentes Editais da ANEEL, relativo ao sistema de transmissão aéreo nacional.

2 Introdução

O estudo admitirá a região de localização da linha de transmissão citada, tal como indicada nos mapas de isótopas e será subsidiado pelas estações abaixo indicadas (veja também a Tabela 3.1.1). Às séries de dados de velocidades máximas anuais, coletados nas estações localizadas nas vizinhanças do empreendimento, será aplicado o conceito da distribuição estatística de extremos de Gumbel. O Anexo II apresenta uma descrição dos métodos usuais mencionados para a determinação dos ajustes de Gumbel do Anexo III.

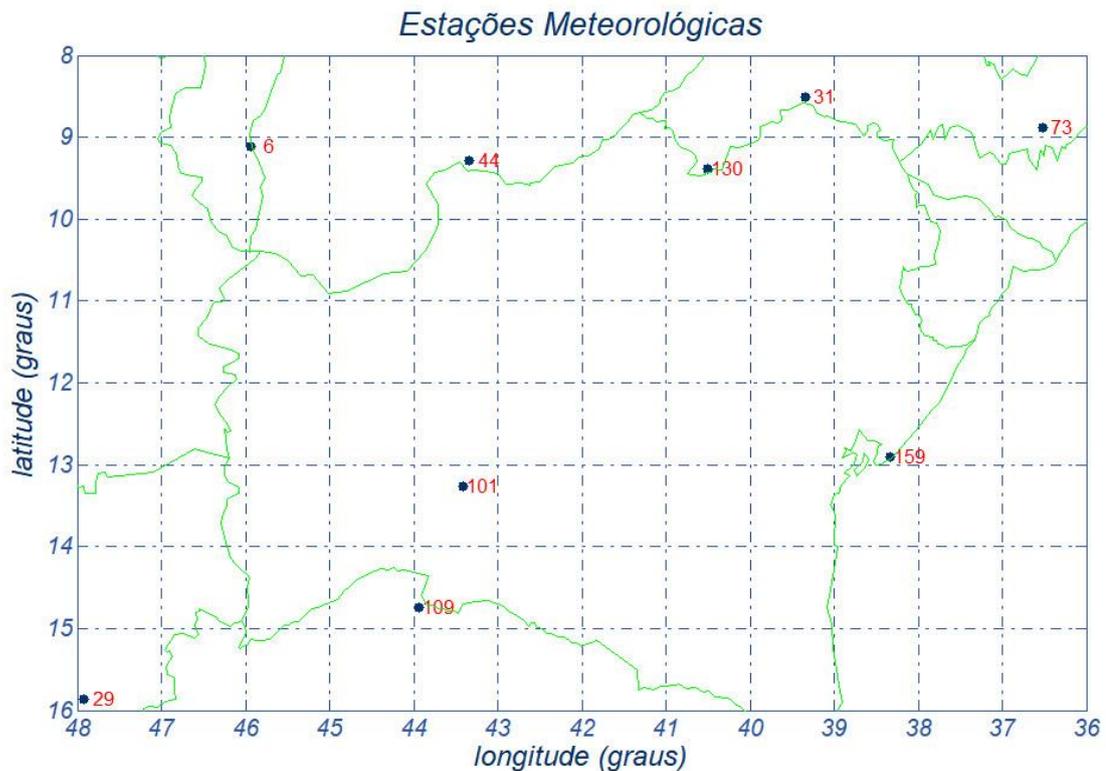


Figura 2.1 - Região de implantação do sistema elétrico de transmissão em foco

De particular importância reveste-se a escolha das estações meteorológicas que constituirão o fundamento do cálculo. A região em questão não é particularmente nem densa e nem esparsa no que tange a anemometria.

Os cálculos que se seguem fundamentam, portanto, seu escopo nas estações mais próximas do empreendimento mencionado, a fim de subsidiar as determinações paramétricas necessárias à consecução do estudo. O item seguinte apresenta alguns detalhes sobre os dados aqui usados e sobre os tratamentos estatísticos a que foram submetidos.

3 Características das estações

Para dar maior confiabilidade nos resultados, foram utilizadas as estações mais próximas do empreendimento em questão, pois é senso comum que os resultados de uma rede mais completa são mais sólidos do que aqueles relacionados com esquemas muito dispersos e escassos. A distribuição espacial das estações encontra-se caracterizada na Figura 2.1, apresentada anteriormente, enquanto as suas características geográficas e paramétricas relevantes constam das Tabelas 3.1.1 e 3.1.2.

3.1 Critérios de regionalização

O processo de determinação de médias regionais para os CVs (coeficientes de variação)¹ e os FRs (fatores de rajada)² seguem prática comum em meteorologia, já que parâmetros médios são mais representativos e mais confiáveis do que os de estações tomadas isoladamente, com variados tempos de coleta.

Há diversos critérios para se proceder a uma homogeneização regional de parâmetros climáticos, tal como adotar-se a média dos valores paramétricos determinados nas estações mais próximas, ou média ponderada, em função dos anos de coleta, de tal sorte que estações com mais tempo de coleta tenham uma influência majorada no fenômeno espacial em questão. Pode-se recorrer, ainda, a um valor médio acrescido de um determinado número de desvios-padrão, dependendo do grau de confiabilidade que se deseja conferir ao estudo.

¹ CV = (média) / (desvio padrão)

² FR = (velocidade de 3 s) / (velocidade de 10 min)

Este estudo adota os critérios de regionalização dos CVs descritos no Anexo VI. Além disso, as velocidades médias do vento com tempo de média de 10 minutos encontram-se corrigidas, como justificado e sugerido³ em [6 e 7].

Tabela 3.1.1 - Características gerais das estações anemométricas

<i>número no mapa</i>	<i>nome da estação</i>
6	<i>Alto Parnaíba</i>
29	<i>Brasília</i>
31	<i>Cabrobó</i>
44	<i>Caracol</i>
73	<i>Garanhuns</i>
101	<i>Lapa (B Jesus)</i>
109	<i>Manga</i>
130	<i>Petrolina</i>
159	<i>Salvador</i>

Tabela 3.1.2 - Características paramétricas das estações anemométricas

<i>nome</i>	<i>latitude (graus)</i>	<i>longitude (graus)</i>	<i>anos</i>	<i>V_{médio} 10 min (km/h)</i>	<i>CV 10 min (%)</i>	<i>V_{médio} 3 seg (km/h)</i>	<i>CV 3 seg (%)</i>	<i>FR3s (pu)</i>	<i>FR30s (pu)</i>
<i>Alto Parnaíba</i>	9.12	45.93	6	39.56	16	67.25	16	1.70	1.35
<i>Brasília</i>	15.87	47.92	15	51.08	19	81.73	19	1.60	1.30
<i>Cabrobó</i>	8.52	39.33	7	54.06	16	91.90	16	1.70	1.35
<i>Caracol</i>	9.28	43.33	8	42.80	16	72.77	16	1.70	1.35
<i>Garanhuns</i>	8.88	36.52	7	38.28	16	65.08	16	1.70	1.35
<i>Lapa (B Jesus)</i>	13.27	43.42	8	51.00	16	86.70	16	1.70	1.35
<i>Manga</i>	14.75	43.93	6	50.00	13	85.00	13	1.70	1.35
<i>Petrolina</i>	9.38	40.50	6	50.23	13	85.39	13	1.70	1.35
<i>Salvador</i>	12.90	38.33	25	52.00	16	88.40	16	1.70	1.35

³ para compensar o excesso de turbulência verificado nos ventos que ocorrem no Brasil

nomenclatura:

CV	coeficiente de variação (%) regionalizado (10 min e 3 s)
FR3s	fator de rajada de 3 segundos (pu) regionalizado
FR30s	fator de rajada de 30 segundos (pu) regionalizado

3.2 Rugosidade dos terrenos

Quanto à rugosidade do terreno no entorno das estações consideradas nesse estudo, admitiu-se que as velocidades medidas nas estações estão associadas a terrenos com grau de rugosidade B, tal como classificado pelas Normas IEC 60826 e NBR 5422, significando terrenos planos com poucos obstáculos. A escolha se deve ao fato de que as estações meteorológicas normalmente se encontram em regiões de rugosidade B, por imposições naturais das redes meteorológicas que, grosso modo, requerem localizações em terrenos desprovidos de obstáculos para evitar distorções nas medições.

4 Os mapeamentos

Considerados os valores paramétricos constantes das Tabelas 3.1.1 e 3.1.2, as exigências do Anexo I, a metodologia estatística descrita no Anexo II e, ainda, os ajustes das amostras à estatística de Gumbel, foram elaborados os mapeamentos de isótopas apresentados no Anexo IV. Quanto ao modelo matemático de ajuste utilizado neste estudo, há algumas ponderações a serem feitas.

O ajuste mais conservador é o dos mínimos quadrados, pois, tal como pode ser visto no Anexo II, possui uma correção de majoração do ajuste em função do número de anos de coleta, ou seja, quanto menor a amostra, maior será a correção ou majoração no valor do ajuste. Esse método tem sido extensivamente usado no Brasil, por ser mais seguro e por assim compensar em parte as incertezas e imprecisões advindas da dispersa rede de medição eólica nacional.

Este estudo faz as regionalizações amostrais sugeridas nos editais da ANEEL, estabelecendo critérios para inferir valores esperados para os coeficientes de variação (Anexo VI). Adota ainda as correções das médias em função do exposto em [6 e 7], e define o método dos mínimos quadrados como adotado, para produzir valores mais conservadores que façam face à baixa densidade de estações.

5 Ventos básicos de projeto

Dos mapeamentos obtidos, podem ser recomendadas as velocidades de vento constantes da Tabela 5.1, de forma a subsidiarem as hipóteses de carga normalmente utilizadas no dimensionamento de estruturas aéreas de transmissão. Os cálculos das velocidades foram feitos seguindo a formulação do Anexo II.

*Tabela 5.1 - Velocidades de projeto (km/h),
terrenos tipo B, medições feitas a 10 m de altura*

<i>período de retorno (anos) / tempo de média</i>	<i>Porto Sergipe Olindina 500 kV</i>	<i>Olindina Sapeaçú 500 kV</i>	<i>M. do Chapéu Irecê 230 kV</i>
<i>250 / 10 minutos</i>	<i>95</i>	<i>95</i>	<i>-</i>
<i>250 / 3 segundos</i>	<i>165</i>	<i>165</i>	<i>-</i>
<i>150 / 10 minutos</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>90</i>
<i>150 / 3 segundos</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>155</i>
<i>50 / 10 minutos</i>	<i>80</i>	<i>80</i>	<i>80</i>
<i>50 / 30 segundos</i>	<i>110</i>	<i>110</i>	<i>110</i>
<i>2 / 30 segundos</i>	<i>70</i>	<i>70</i>	<i>70</i>

Nota 1 A velocidade de vento assinalada como sendo a de 3 segundos (valor instantâneo ou de rajada) já retrata a real relação entre as séries históricas de 10 minutos e as de 3 segundos. Vale esclarecer, que essas duas séries (10 minutos e 3 segundos) são independentes entre si, e não são produzidas por indevidas mesclas entre leituras isoladas de 10 minutos e de 3 segundos. A relação entre as duas séries, que pode ser denominada de "fator de rajada", objetiva atender às exigências de projeto constantes dos leilões, em

suas variadas versões. Esses objetivos podem ser enumerados como, por exemplo:

- 1) Permitir a homogeneização das séries, quando se constatarem os vários períodos de coleta que as constituem,*
- 2) Dar meios de se inferir os valores de uma série, qualquer que seja, quando a outra não for disponível nas mesmas estações de coleta.*
- 3) Definir espacialmente valores de ventos máximos prospectivos para as hipóteses de carga baseadas em leituras de 10 minutos e naquelas de 3 segundos, em toda a rede de coleta do estudo.*

Esses objetivos encontram-se consentâneos com a apropriada exigência da ANELL, quando evoca uma regionalização de dados de diferentes procedências e com variados graus de precisão (entenda-se: tempo de coleta)

O seu valor numérico entre essas séries citadas já se traduz num fator de rajada realista e não requer necessariamente correção adicional - e nem a impede - pois segue as indicações corretas de que as séries, quaisquer que sejam, devem passar por homogeneizações que compensem os diferentes períodos de coleta que são particulares de cada uma série e em cada estação.

Nota 2 Como fator de rajada, é também comum a adoção do fator de 1.4 pu, proveniente do que a Norma IEC 60826 apresenta como "média mundial" para terrenos B, acrescido de 15 ou 20%, dependendo de se tratar das regiões norte e nordeste, ou do resto do país (centro-oeste, sudeste e sul). Essa abordagem para representar os esforços decorrentes das solicitações exercidas pelas tempestades (ou tormentas elétricas - sic) não necessariamente está em aderência com o banco de dados geralmente em uso no Brasil, mas há essa coincidência numérica evidente. Os citados 15 % ou 20 % multiplicados pelo fator de rajada da IEC (1.4 pu) dão respectivamente: 1.61 e 1.68 pu como

fatores de rajadas entre as séries de 10 minutos e de 3 segundos. Portanto, os valores adotados nos relatórios em análise, que são 1.6 pu (sul, sudeste) e 1.7 pu (demais) estão em plena concordância com a outra metodologia, com a acurácia de se basearem nas reais relações que as duas séries (10 minutos e de 3 segundos) apresentam pelos respectivos valores dos bancos de dados que os contêm. Vale lembrar que essas relações não são "fatores de rajada" de leituras isoladas quaisquer, mas, sim, a média entre as suas respectivas séries históricas.

Nota 3 As velocidades indicadas na tabela acima são o resultado de uma avaliação espacial das figuras do Anexo IV, feitas como médias mentais das leituras dos mapas. Nos mapas de isolinhas, as velocidades múltiplas de 5 são indicadas pelos seus valores modais, enquanto que os demais "dégradés" servem como ferramentas de interpolação. O traçado das isótopas usa um modelo clássico para a determinação de isolinhas, modelo esse que parte do princípio de que "a influência de cada estação em qualquer ponto da rede se faz inversamente proporcional à sua distância a esse ponto".

Nota 4 As velocidades em cada estação, indicadas nos mapas respectivos, evitam que eventuais extrapolações do modelo matemático das distâncias sejam escolhidas como "velocidades de projeto". Como qualquer estudo estatístico que envolve avaliações espaciais, há sempre um subjetivismo nas operações de arredondamentos e de interpolações, o que impede que haja sempre uma unanimidade nas escolhas.

Nota 5 Em termos ideais, os mapas de isótopas, propriamente ditos, e os das velocidades em cada estação (no final do Anexo IV) deveriam ser usados simultaneamente, visto que promovem vistas espaciais diferenciadas da região em apreço. Fato é, que as isótopas contêm, na sua elaboração, um modelo de transferência espacial de valores (velocidades em km/h) que é sempre subjetiva e dinâmica no tempo.

Por exemplo: a aludida transferência pode ser modelada tal como se a influência das estações em qualquer ponto da rede se faça inversamente

proporcional à distância a esse ponto; ou pode ser inversamente proporcional ao quadrado da distância; ou pode seguir outra regra qualquer normalmente usada em mapeamentos. Portanto, o conhecimento prévio que o projetista da LT possa ter sobre a região da LT deve ter, pelo menos, o mesmo peso do que qualquer modelo matemático usado no traçado das isótas, por mais clássico e lógico que seja. Modelo matemático é sempre um modelo, às vezes, de vida curta. Por outro lado, não há substituto para o conhecimento e a sua prática honesta. Em outras palavras, mapeamentos de isótas, tais como os aqui apresentados, devem subsidiar e liberar o projetista de LTs no âmbito do seu conhecimento e das suas boas práticas.

Bibliografia

- [1] Kendall, G.R. – *Statistical Analysis of Extreme Values – First Canadian Hydrology Conference, July 1959.*
- [2] IEC – *International Electrotechnical Commission, “IEC 60826 - Design Criteria of Overhead Transmission Lines”, Technical Committee n^o 11, Secretariats 27 & 28, Recommendations for Overhead Lines, Ed. 3, 2000.*
- [3] Cigré Working Group 22.06, *“Probabilistic Design of Overhead Transmission (CIGRÉ Brochure 109 - 22-00 (WG-06)01, 1996*
- [4] Silva Filho, J. I., Menezes Jr, A. A. – *Mapeamento de Isótas do Brasil, Relatório Técnico Cepel 851/82.*
- [5] Menezes Jr, A. A., Tan A. L., Fernandes D. - *Velocidades de vento de elevada intensidade ocorridas em Florianópolis e Passo Fundo - Um enfoque metodológico estatístico - XVII SNPTEE, Uberlândia, 2003*
- [6] Silva Filho, J. I., Alves Menezes Jr, A., et alli, *Esforços devidos ao vento sobre componentes de LTs e fatores de correção normativos compatíveis com a realidade brasileira - XVIII SNPTEE, Curitiba 2005*
- [7] Silva Filho, J. I., Alves Menezes Jr, A., et alli, *“Assessment of Environmental Statistics as an Accessible Breakthrough to Improve OHTLs Design”, Bienal CIGRÉ, 2006*

Anexo I Critérios a serem atendidos (sic)

8.1 Confiabilidade

8.1.1 O projeto mecânico de uma LT aérea deve ser desenvolvido segundo a IEC 60826.

8.1.2 O período de retorno do vento extremo, que caracteriza o nível de confiabilidade do projeto eletromecânico da LT aérea, deve ser igual ou superior a 150 anos, que corresponde ao nível 2 da IEC 60826, para LT com tensão nominal igual ou inferior a 230 kV e igual ou superior a 250 anos, que corresponde a um nível intermediário entre os níveis 2 e 3 da IEC 60826, para LT com tensão nominal superior a 230 kV.

8.2 Parâmetros de vento

8.2.1 Para o projeto mecânico de uma LT aérea, os carregamentos oriundos da ação do vento nos componentes físicos dessa LT devem ser estabelecidos a partir da caracterização probabilística das velocidades de vento da região, com tratamento para fenômenos meteorológicos severos, tais como, sistemas frontais, tempestades, tornados, furacões etc.

8.2.2 Os parâmetros explicitados a seguir devem ser obtidos a partir de dados fornecidos por estações anemométricas selecionadas adequadamente para caracterizar a região atravessada pela LT aérea:

(a) média e coeficiente de variação (em porcentagem) das séries de velocidades máximas anuais de vento a 10 m de altura, com tempos de integração da média de 3 (três) segundos (rajada) e 10 (dez) minutos (vento médio);

(b) velocidade máxima anual de vento a 10 m de altura, com período de retorno correspondente ao vento extremo, como definido no item 8.1.2 deste submódulo, e tempos de integração para o cálculo da média de 3 (três) segundos e 10 (dez) minutos. Se o número de anos da série de dados de velocidade for pequeno, na estimativa da velocidade máxima anual deve ser adotado, no mínimo, um coeficiente de variação compatível com as séries mais longas de dados de velocidades de ventos medidas na região;

(c) coeficiente de rajada para a velocidade do vento a 10 m de altura, referenciado ao tempo de integração da média de 10 (dez) minutos;

(d) velocidade máxima anual de vento a 10 m de altura, com período de retorno de 50 anos e tempo de integração para o cálculo da média de 10 (dez) minutos;

(e) categoria do terreno adotada para o local das medições.

8.2.3 No tratamento das velocidades de vento, para fins de dimensionamento, deve ser considerada a categoria de terreno, conforme definida na IEC 60826, que melhor se ajuste à topologia do corredor da LT aérea.

Anexo II Distribuição de Gumbel⁴ e velocidades máximas de vento

A distribuição de valores máximos de Gumbel culminou por se constituir numa unanimidade para explicar os eventos de velocidades máximas anuais de vento no setor elétrico mundial, o brasileiro aí incluído. Os esforços atuais convergem no sentido de otimizar a aplicação da distribuição de Gumbel com base em dados coletados no próprio país e colocá-los em consonância com os protocolos normativos de outros países, tal como é o caso da IEC 60826 e da NBR - 5422. De uma forma genérica, a referida distribuição pode ser definida por [2]:

$$V_T = V_m + s (Y - C_2) / C_1 \qquad Y = - \ln [- \ln (1 - 1 / T)]$$

V_m	velocidade média da amostra de máximos anuais	(km/h)
s	desvio-padrão da amostra de máximos anuais	(km/h)
V_T	velocidade de vento, período de retorno T	(anos)
C_1 e C_2	coeficientes da distribuição de Gumbel	(ver Tabela A1)

Os citados coeficientes são calculados pelas equações:

$$Z_i = - \ln [- \ln(1 - i/(n + 1))] \qquad i \text{ variando de } 1 \text{ até } n$$

C_2 valor médio de Z_i
 C_1 desvio-padrão de Z_i

Como os valores de C_1 e de C_2 só dependem do tamanho da mostra, os seus respectivos valores encontram-se definidos na Tabela A1.

⁴ Emil Julius Gumbel, nascido a 18 de julho de 1891, em Munique. Estatístico de origem judia, era considerado pela República de Weimar como um dos seus maiores inimigos, pelos seus discursos pacifistas e socialistas.

Tabela A1 - Valores dos coeficientes C_1 e C_2

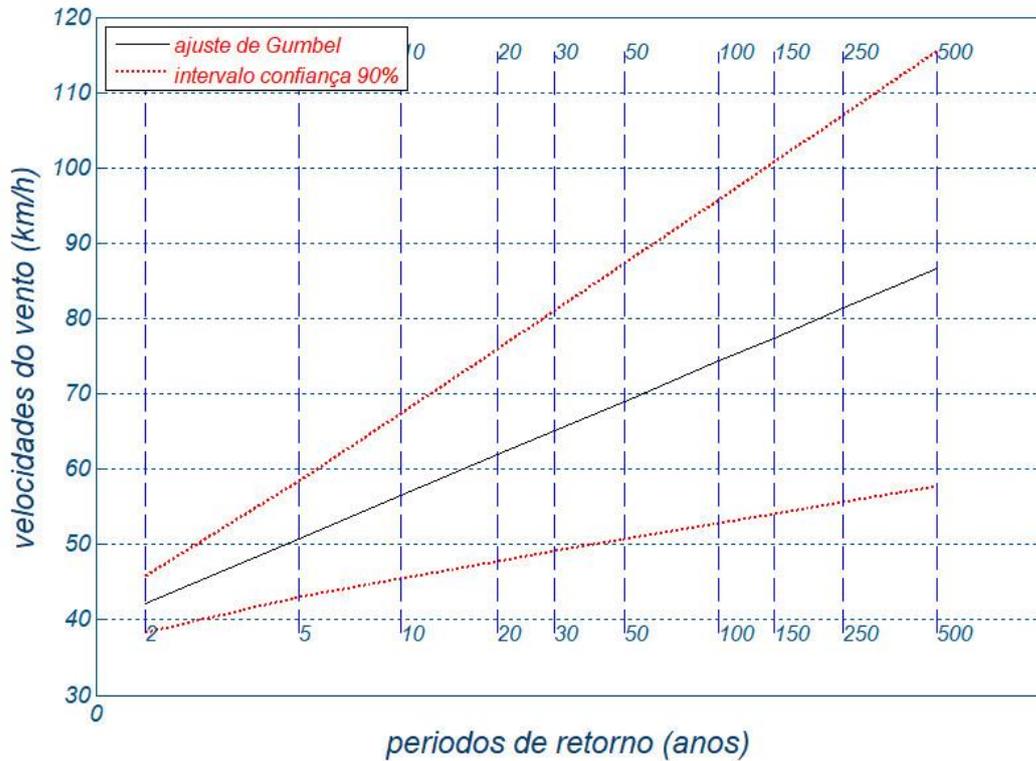
n	C_1			n	C_2		
2	0.49838	17	1.03970	2	0.40434	17	0.51768
3	0.64348	18	1.04810	3	0.42859	18	0.51980
4	0.73147	19	1.05570	4	0.44580	19	0.52175
5	0.79278	20	1.06280	5	0.45879	20	0.52355
6	0.83877	21	1.06940	6	0.46903	21	0.52522
7	0.87493	22	1.07550	7	0.47735	22	0.52678
8	0.90432	23	1.08120	8	0.48428	23	0.52823
9	0.92882	24	1.08650	9	0.49015	24	0.52959
10	0.94963	25	1.09140	10	0.49521	25	0.53086
11	0.96758	26	1.09610	11	0.49961	26	0.53206
12	0.98327	27	1.10050	12	0.50350	27	0.53319
13	0.99713	28	1.10470	13	0.50695	28	0.53426
14	1.00950	29	1.10860	14	0.51004	29	0.53527
15	1.02060	30	1.11240	15	0.51284	30	0.53622
16	1.03060	∞	1.28255	16	0.51537	∞	0.57722

No caso dos valores de C_1 e C_2 serem assumidos para $n = \infty$, o método acima se identifica com o método dos momentos, que é menos conservador e raramente usado.

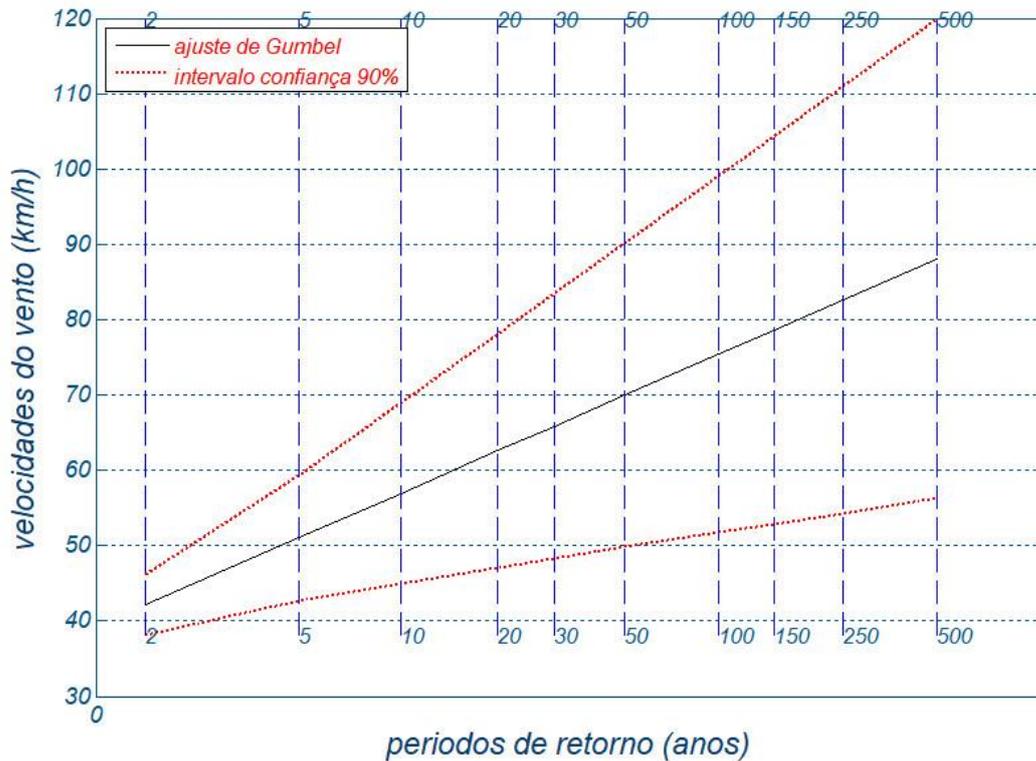
Anexo III Os ajustes da distribuição de Gumbel às amostras

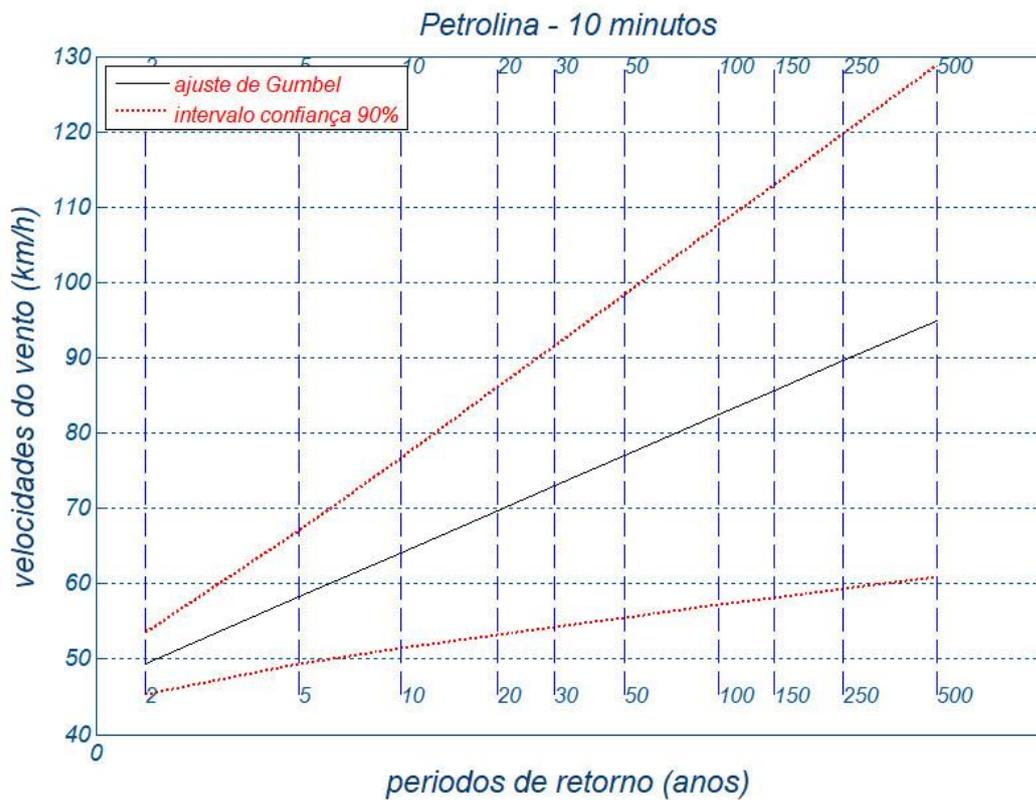
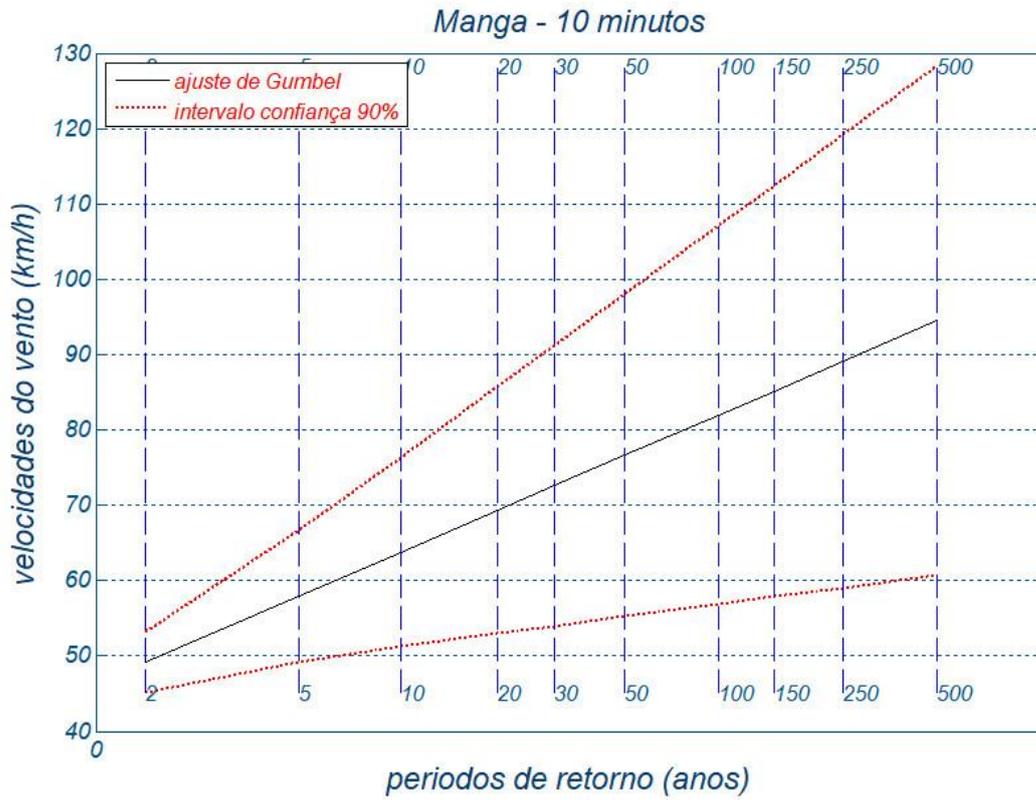
As figuras seguintes ilustram os ajustes de Gumbel em cada estação, tempo de média de 10 minutos. Para os demais tempos de média, os coeficientes da Tabela 3 podem ser usados.

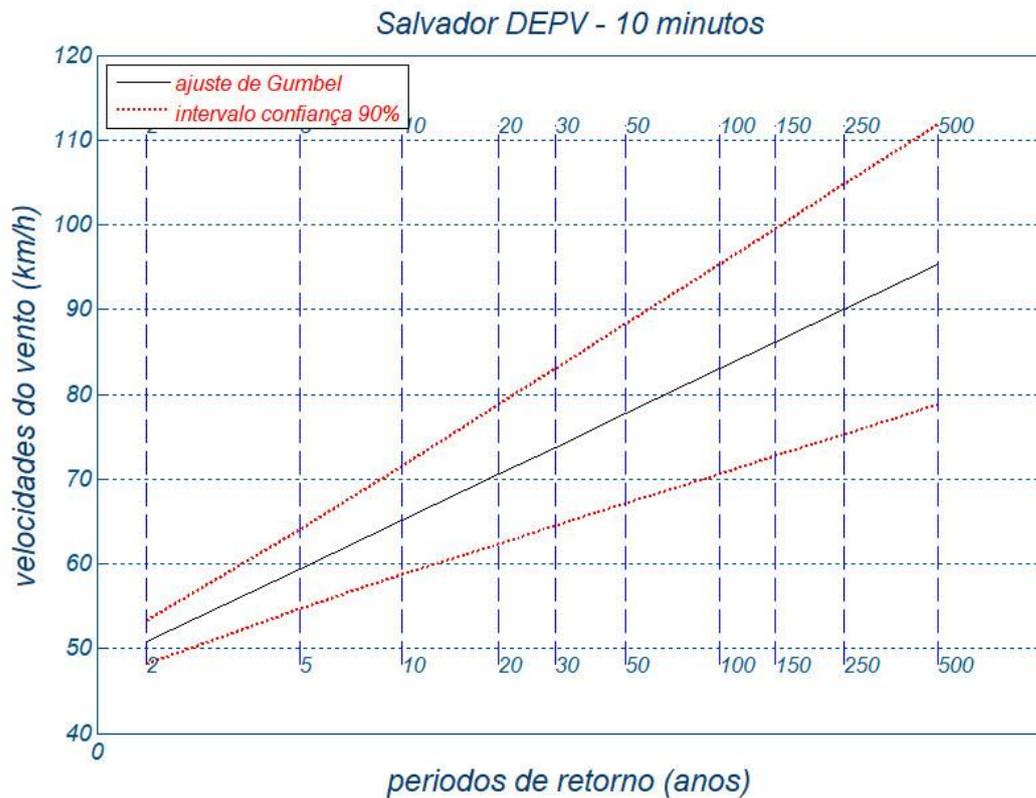
Caracol - 10 minutos



Garanhuns - 10 minutos



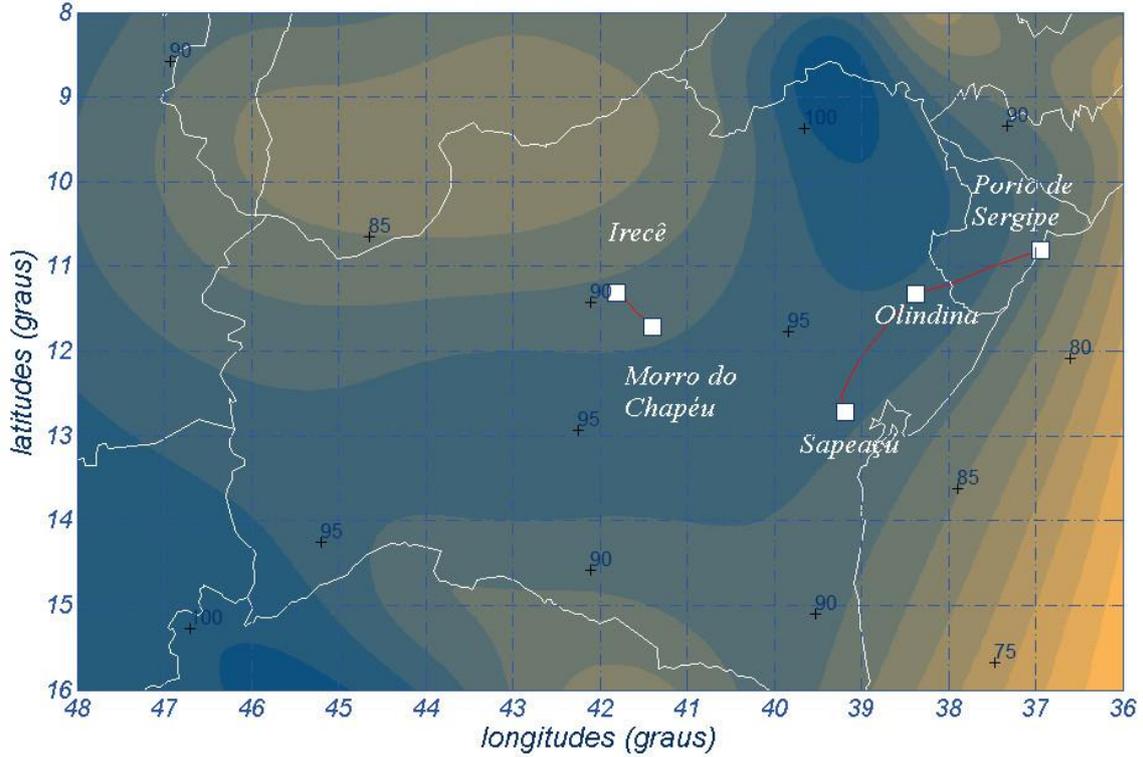




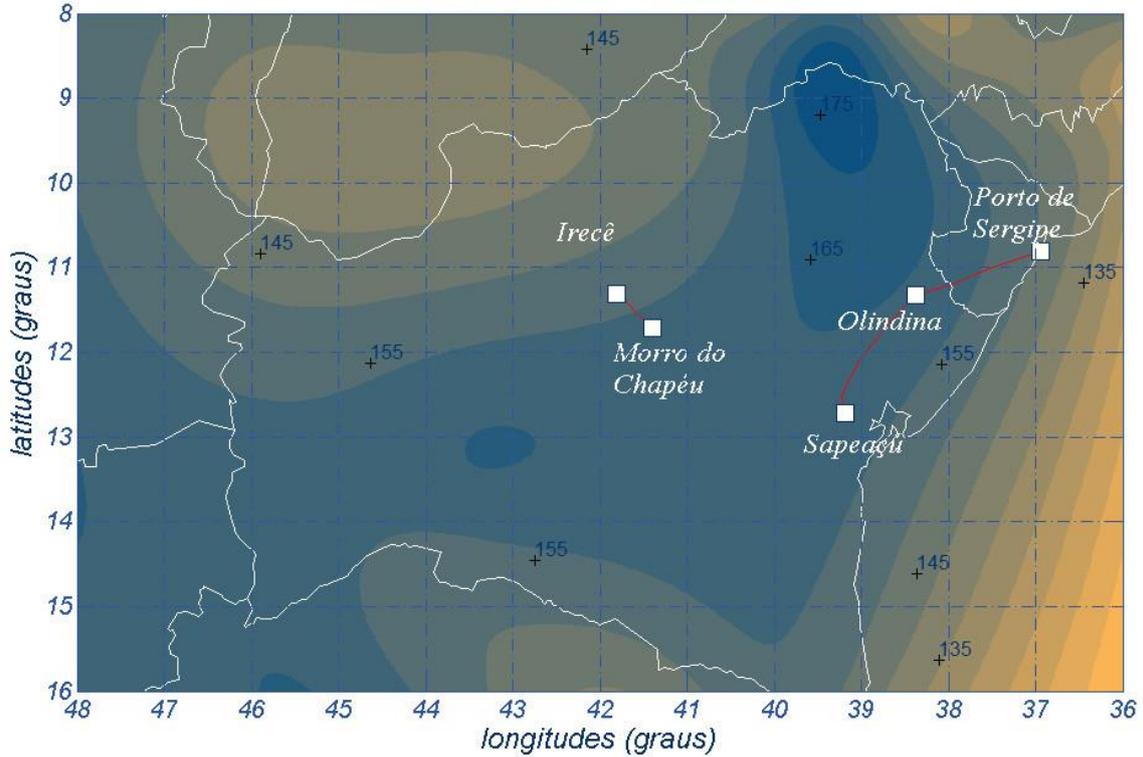
Anexo IV Os mapeamentos de isótasas da região

Seguem os mapas de isótasas, períodos de retorno, tempos de média e também mapas com as velocidades de vento nas estações, a 10 m de altura, terreno B.

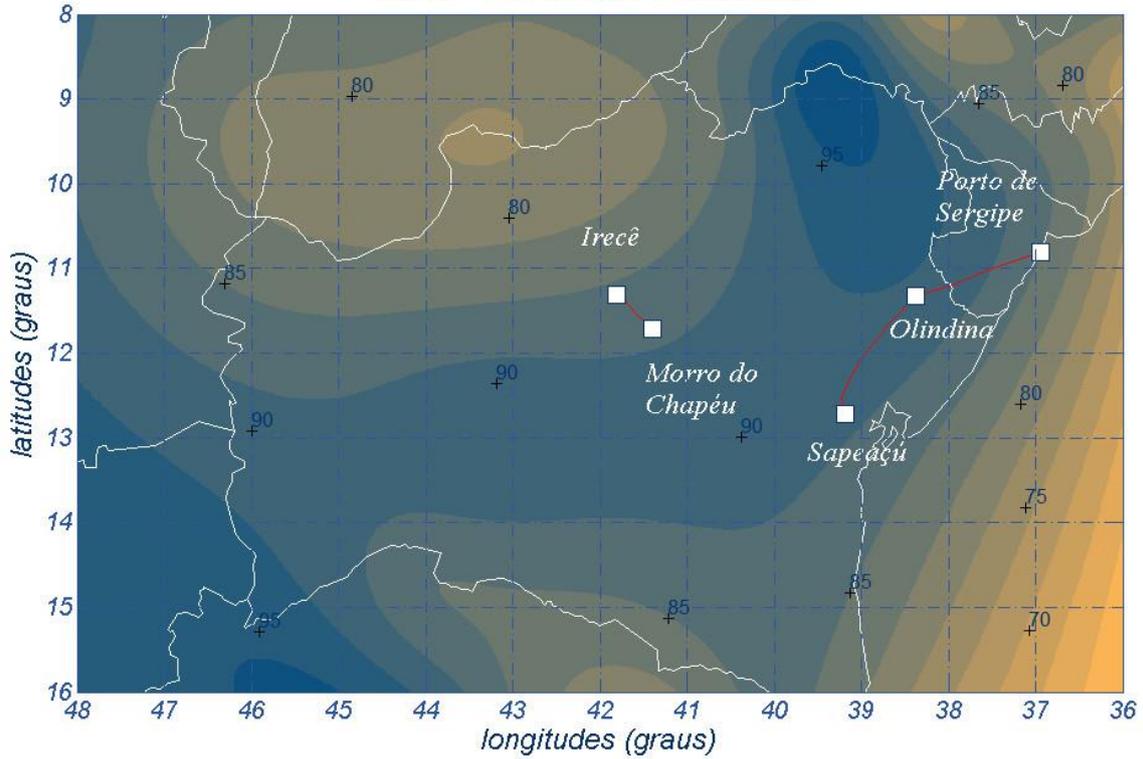
km/h - 250 anos / 10 minutos



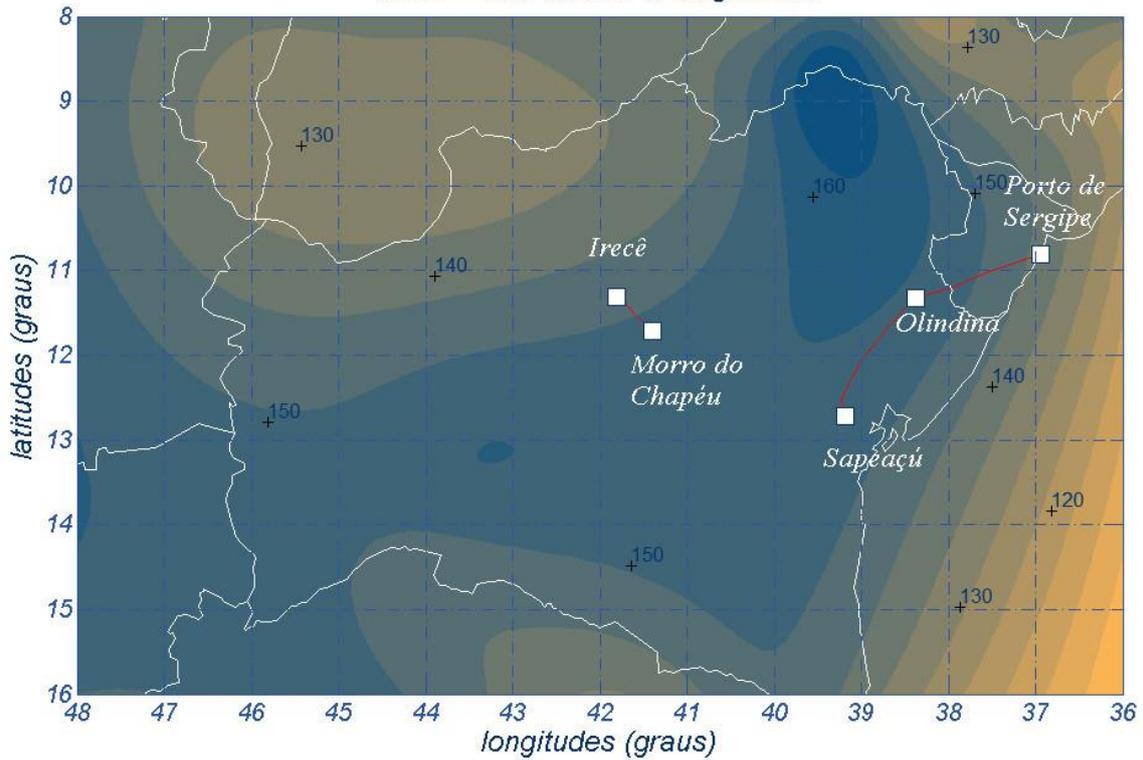
km/h - 250 anos / 3 segundos



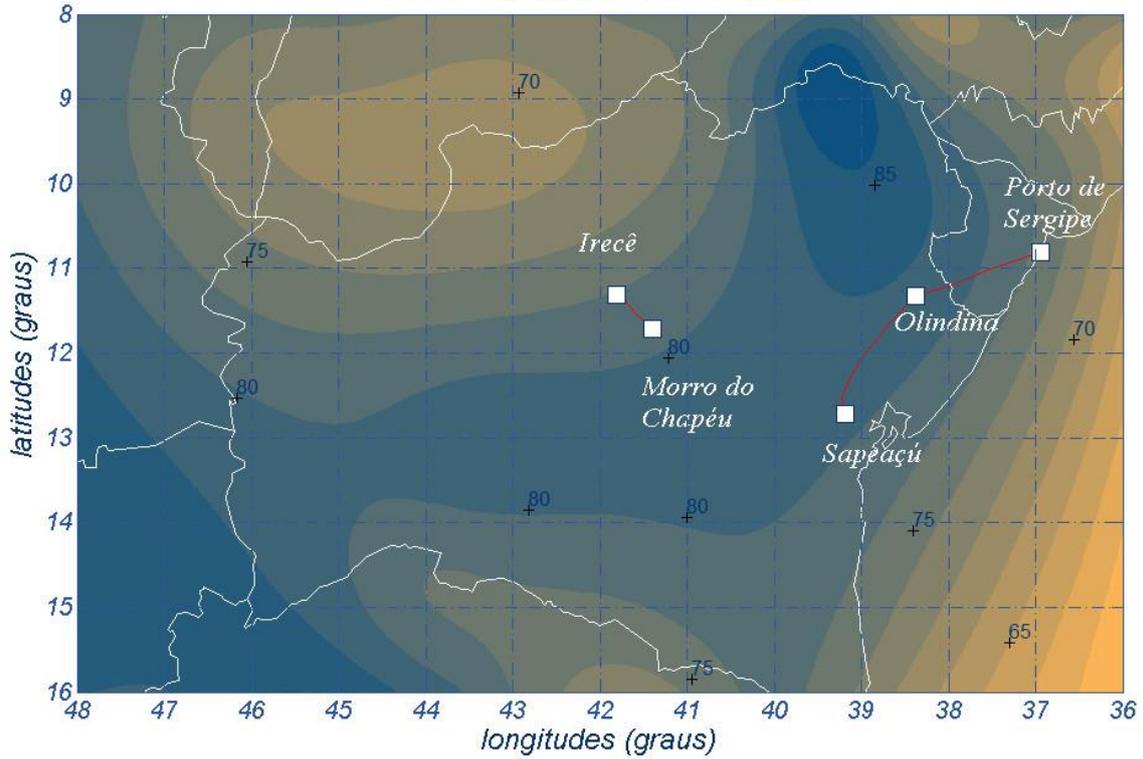
km/h - 150 anos / 10 minutos



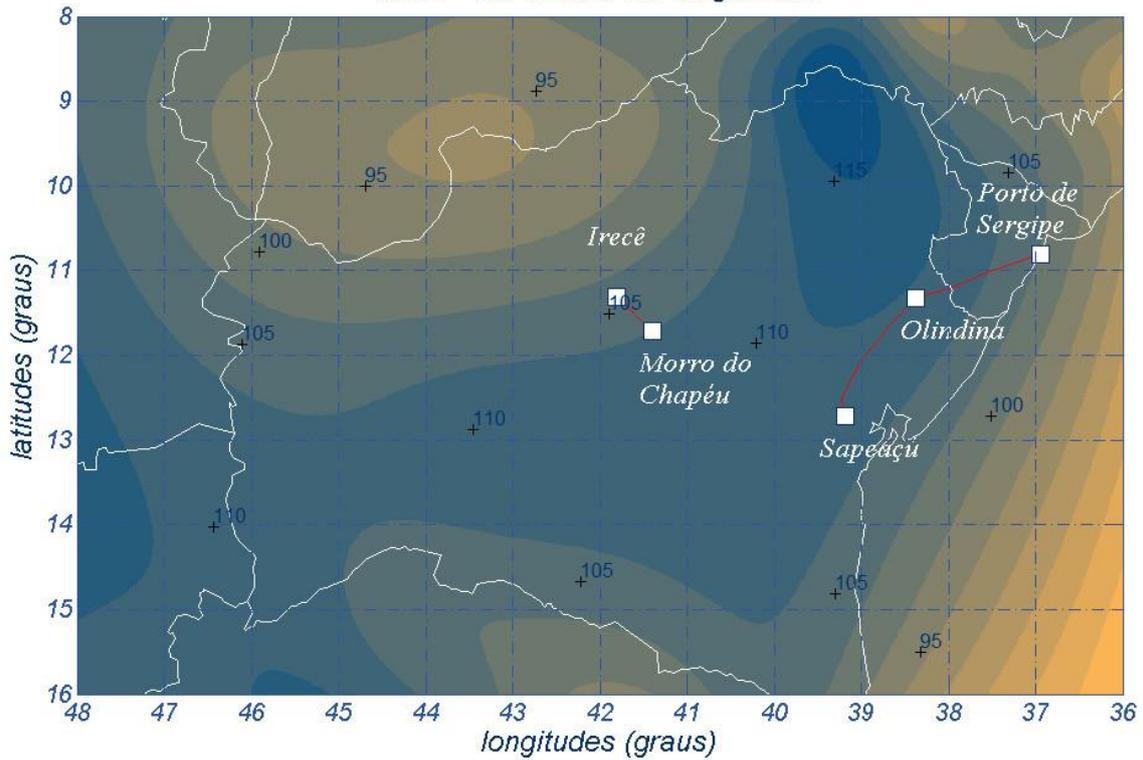
km/h - 150 anos / 3 segundos



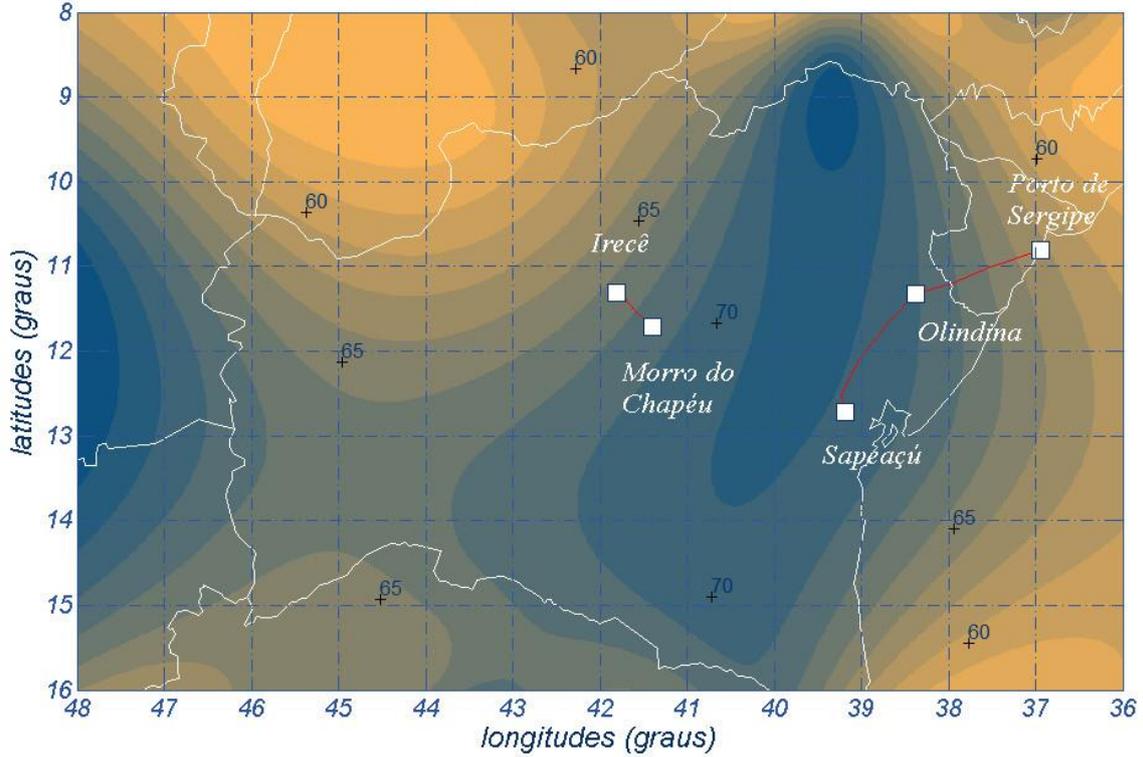
km/h - 50 anos / 10 minutos



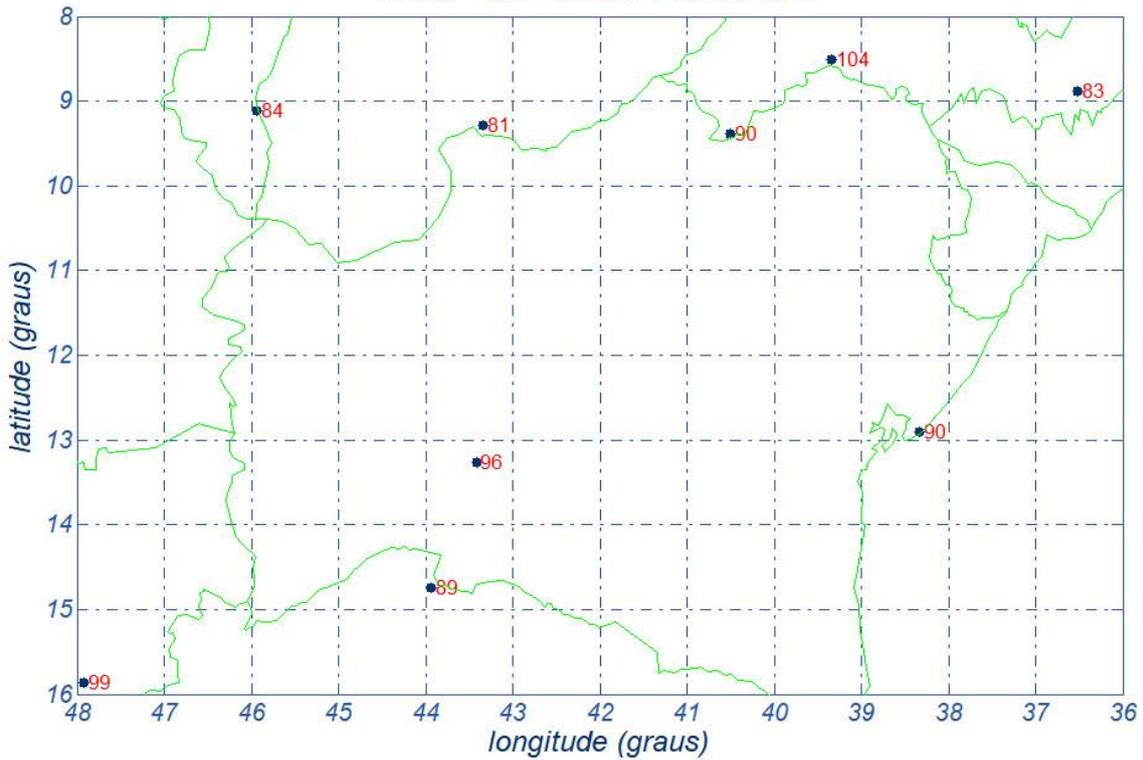
km/h - 50 anos / 30 segundos



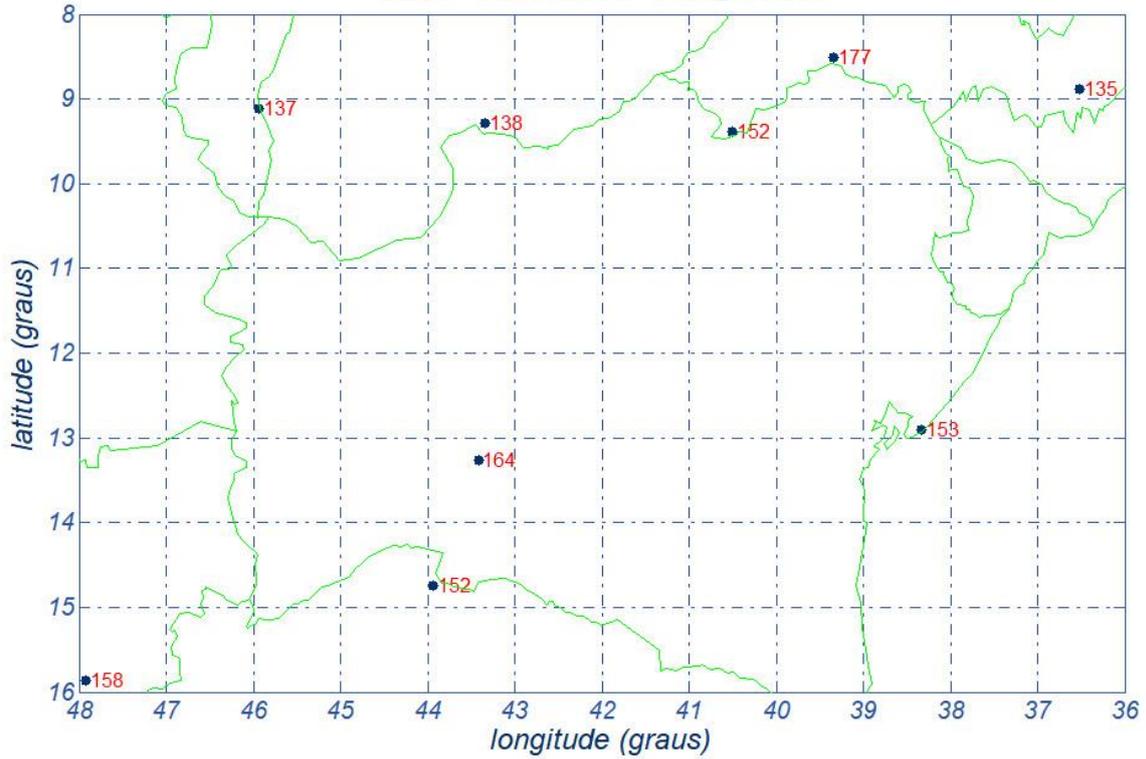
km/h - 2 anos / 30 segundos



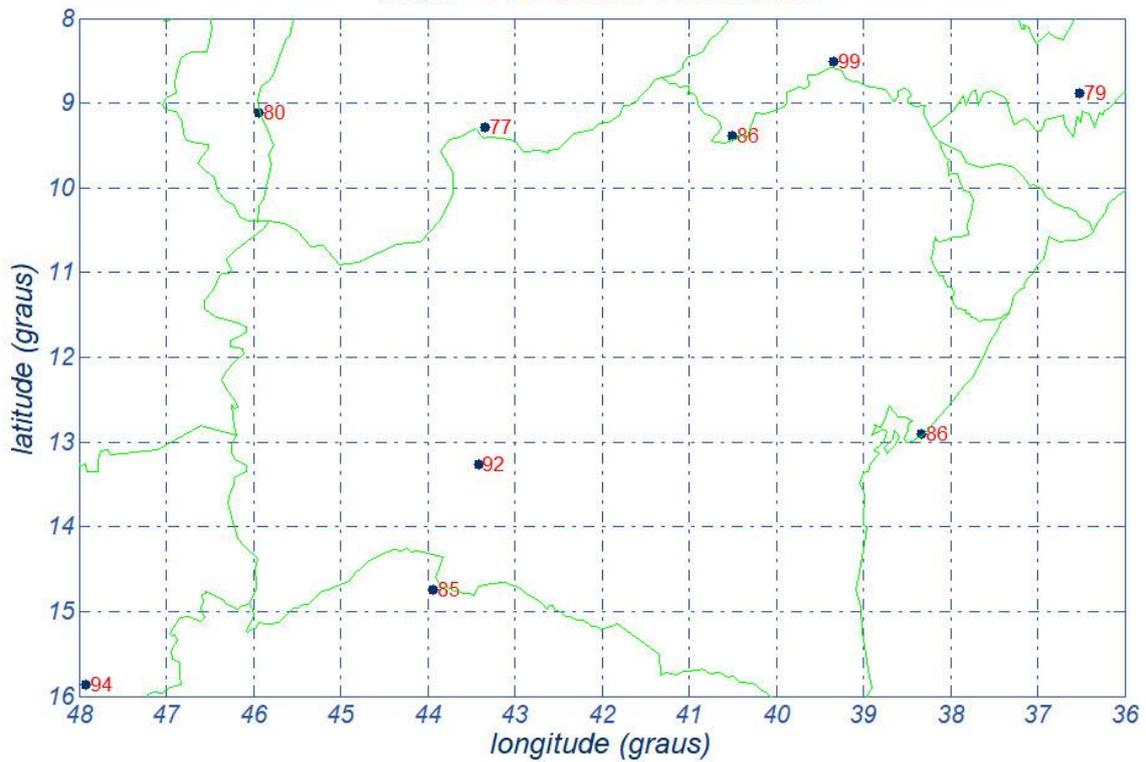
km/h - 250 anos / 10 minutos

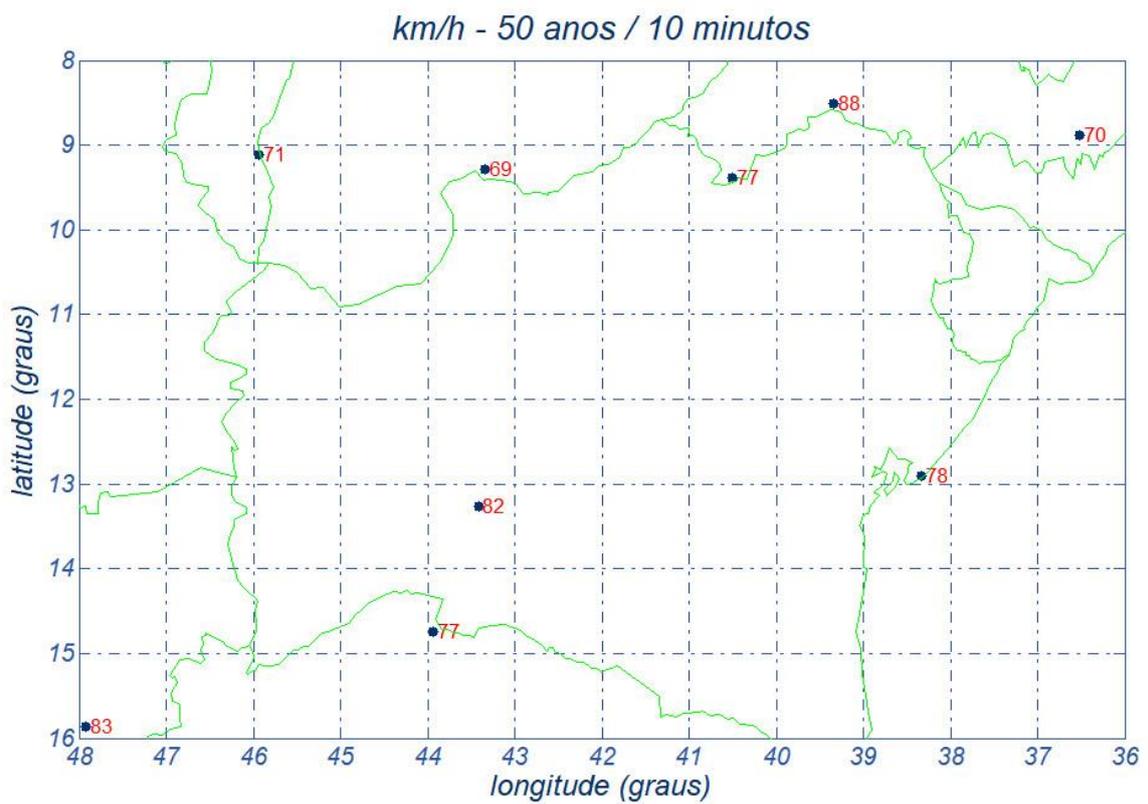
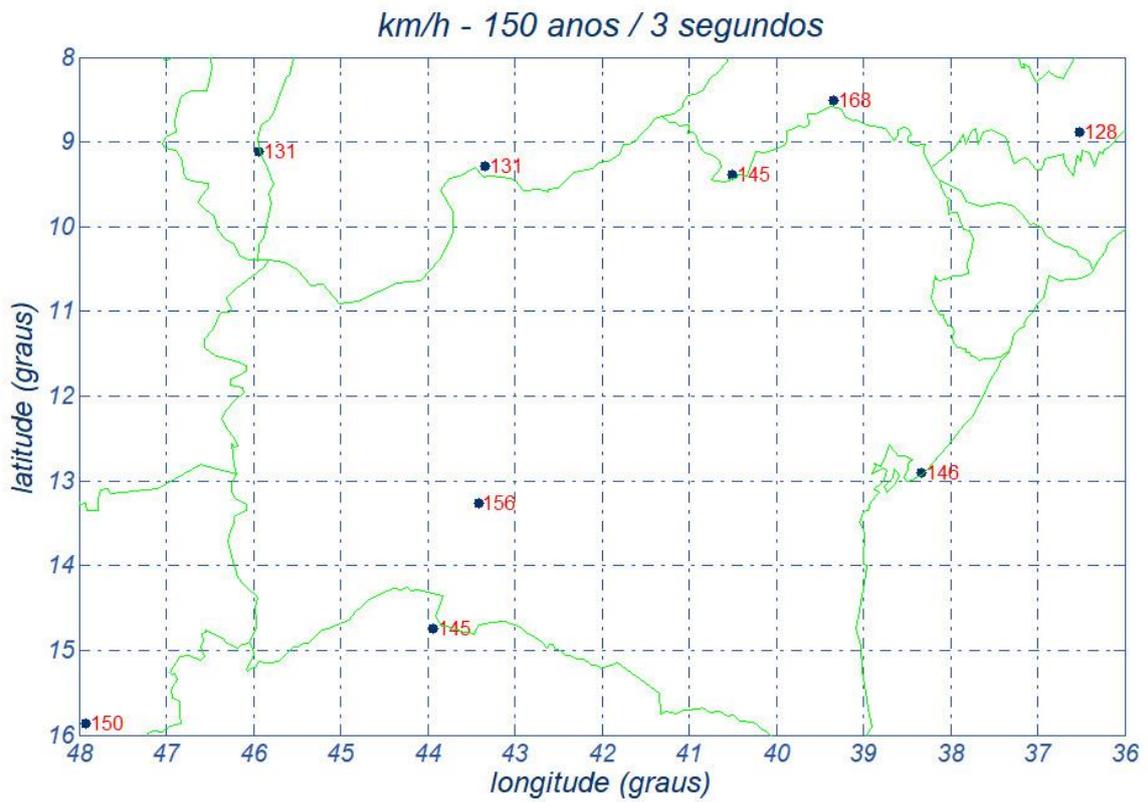


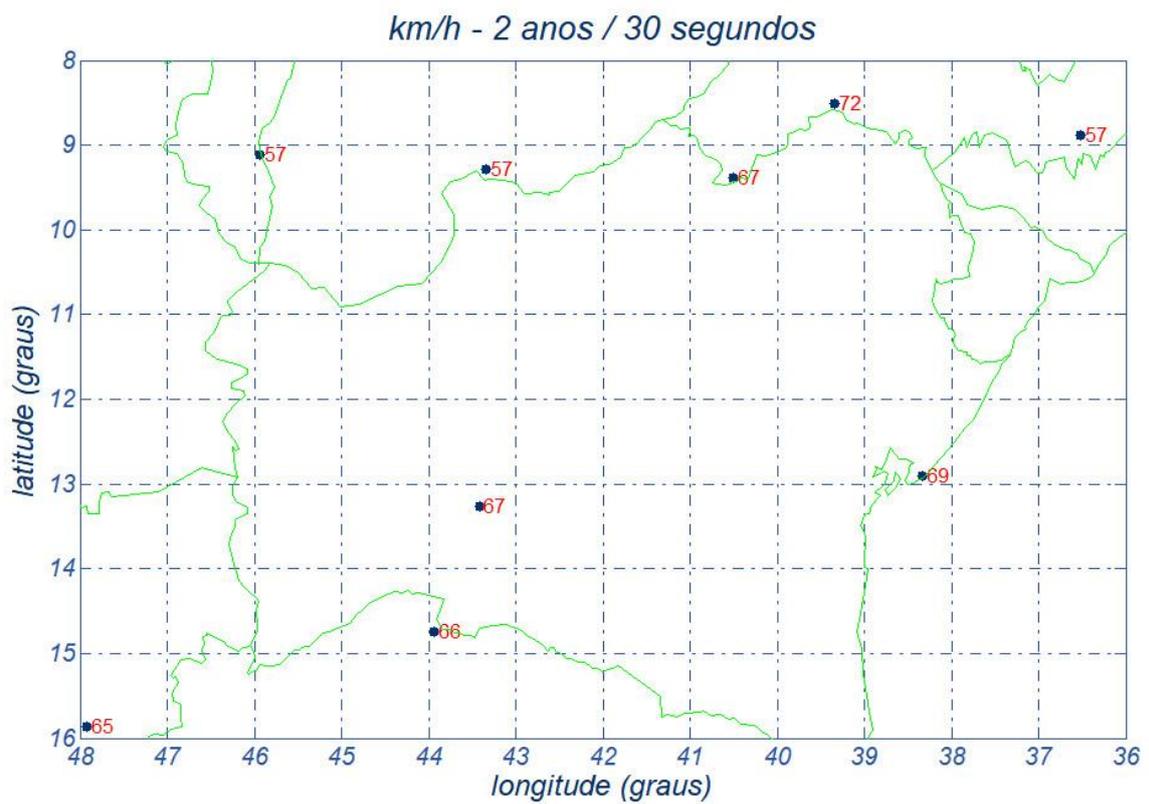
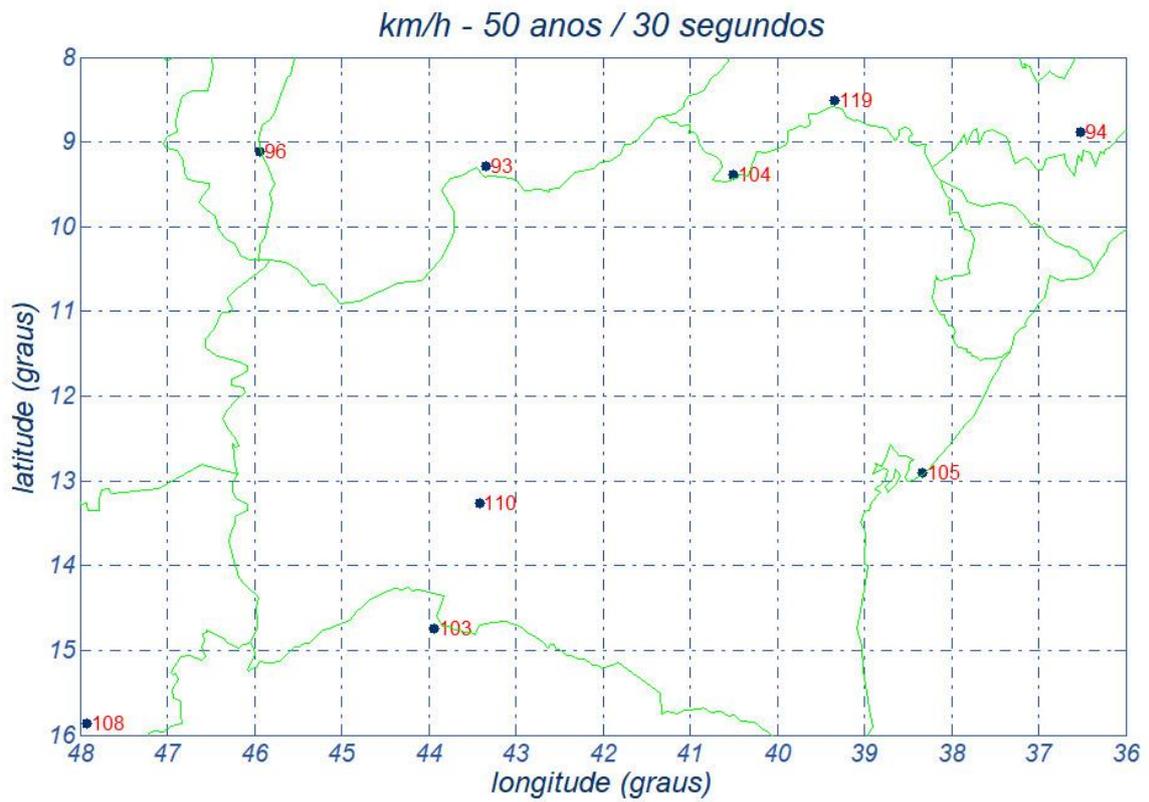
km/h - 250 anos / 3 segundos



km/h - 150 anos / 10 minutos







Anexo V O problema da turbulência dos ventos no Brasil

As preocupações relativas aos esforços resultantes da ação do vento sobre componentes de linhas aéreas de transmissão vêm se avolumando no Brasil, como em outros países. As ocorrências de quedas de estruturas tomam a sua devida importância num sistema de fornecimento de energia elétrica cada vez mais interligado e mais dependente de uma uniformidade de parâmetros de projeto capazes de estabelecer uma base uniforme e comparativa.

Pelas suas características aleatórias, a ação do vento em LTs aéreas é sempre polêmica e sujeita a enfoques nacionais que possam introduzir alternativas sobre fenômenos típicos de cada região. Isto implica um esforço de procura de medições e modelagens próprias por parte da engenharia nacional, tal como vem se verificando no Brasil. De uma forma geral, a norma brasileira que rege o assunto em muito se serve da experiência continental adquirida ao longo de décadas e também do acervo publicado em normas internacionais (IEC, por exemplo).

Essa simbiose produz naturalmente alguns elementos que podem gerar certa dualidade conceitual no que trata do conhecimento estatístico que embasa o estudo, no seu todo, e nas aplicações dos seus resultados. Em poucas palavras, as análises de velocidades de vento de elevada intensidade no Brasil vêm sistematicamente revelando uma falta de aderência entre os valores locais e os divulgados como básicos para adoção internacional.

Com base nos elementos já colocados, o CEPTEL e a BATÁVIA apresentaram um artigo técnico no XVII SNTPEE (Uberlândia) [6], no sentido de alertar que as velocidades de vento de elevada intensidade, e características próprias do território brasileiro, implicam uma necessidade de repensar (ou mesmo majorar) os resultados preconizados pela IEC, quando se segue sem alterações, os atuais cálculos de cargas mecânicas devidas ao vento. Posteriormente, o mesmo assunto foi aprofundado e apresentado na bienal do CIGRÉ - Paris de 2006. É bastante realístico admitir que dados locais analisados segundo a ótica de qualquer procedimento estatístico, não raro, conduzem a valores numéricos ou a decisões práticas que diferem do que é publicado para uso generalizado, nos casos em que não se dispõe de coleta específica de dados. Esse polêmico e estimulante assunto pode ser avaliado nos seus detalhes de forma e de mérito em [7].

De forma resumida, os estudos supracitados concluíram pela necessidade de majorar as velocidades médias de 10 minutos em 8% (região sul), 12% (regiões centro-oeste e sudeste) e 16% (regiões norte e nordeste), para fazer face à maior turbulência constatada nas velocidades de vento registradas no Brasil. Com a aludida correção, a metodologia da Norma IEC 60826 pode ser usada com maior segurança. Esse estudo já incorpora tal modificação paramétrica.

Anexo VI Regionalização dos CVs das séries históricas

Critérios de regionalização dos coeficientes de variação

A regionalização dos coeficientes de variação das séries de máximos anuais de velocidades de vento tem sido recomendada e utilizada como forma de compensar o fato de que as séries de valores disponíveis em cada estação têm variações entre limites afastados (4-5 anos até 20-25 anos) e têm, em consequência, precisão diferenciada. Os procedimentos de regionalização são, no entanto, muito variados e subjetivos, dependendo dos critérios mais afeitos ou preferidos, por parte de quem realiza essas determinações. Médias lineares, ou ponderadas pelos tempos de coleta, médias móveis, extremos de distribuições são algumas das possibilidades, aqui citadas para exemplificar.

AVI.1 Para as séries de 10 minutos

Para fins de regionalização dos valores dos coeficientes de variação das séries de velocidades máximas anuais, referidas ao tempo de média de 10 minutos, hajam vista as inúmeras tentativas isoladas feitas aqui no Brasil, levam às seguintes conclusões que se encontram ora em prática:

- 1 O valor mínimo genérico será de 13% (CV = 13%), válido para qualquer estação coletora.*
- 2 As estações que eventualmente apresentem valores superiores a 13% e inferiores a 16%, no estágio de medição em que se encontram, quanto aos períodos de coleta, serão consideradas como típicas de 16% (CV=16%). Este mesmo valor será adotado nas estações do DEPV, face às conhecidas incertezas tanto no que se refere aos valores médios das séries como quanto aos respectivos desvios-padrão.*

- 3 *As estações que eventualmente apresentem valores superiores a 16%, no estágio de medição em que se encontrem, quanto aos períodos de coleta, serão consideradas como típicas de 19% (CV = 19%).*

AVI.2 Para as séries de 3 segundos

Quanto aos valores da regionalização paramétrica das séries de 3 s, as seguintes ponderações são aplicáveis:

- a) *Para se proceder a uma regionalização paramétrica das séries de 3 s, pode-se fazer uso dos conceitos de uma análise exploratória de dados envolvendo as duas séries em questão: as de 10 minutos e as de 3 segundos, esta última também dita de valores instantâneos.*

Assim é que há uma relação média entre os valores médios de 3 segundos e os de 10 minutos, ~1,70 para as regiões NORTE e NORDESTE, e ~1,60 para as regiões SUDESTE, CENTRO-OESTE e SUL, valores esses obtidos por média ponderada pelos anos de coleta.

- b) *Além disso, verifica-se para as regiões NORTE e NORDESTE que o coeficiente de variação médio ponderado das séries de 3 s é ligeiramente inferior ao médio atualmente praticado no Brasil (12% contra 16%). Nas demais regiões, constata-se que o CV médio ponderado para 3 s é muito próximo ao que se pratica com as séries de 10 minutos (16,5% contra 16,0%). Portanto, os coeficientes de variação das séries de 3 s serão mantidos os mesmos ora praticados no Brasil, como medida conservadora.*

AVI.3 Para as séries de 30 segundos

Para as séries de 30 segundos, os fatores de rajada são os obtidos por interpolação entre os de 3 s e de 10 minutos, ou seja, 1,35 para as regiões NORTE e NORDESTE e 1,30 para as regiões SUDESTE, CENTRO-OESTE e SUL, respectivamente.

As regiões NORTE e NORDESTE devem ser entendidas como a parte do território brasileiro situada até o paralelo 15° sul; as regiões SUDESTE e CENTRO-OESTE se estendem de mais de 15° sul até 23° sul (próximo ao trópico do Capricórnio) e a região SUL segue daí até o limite extremo do Rio Grande do Sul.

Anexo VII Mitigação da Ação dos Ventos sobre LTs Aéreas

AVII.1 O desempenho esperado das LTs aéreas

De uma forma geral e até intuitiva, os projetistas de LTs e a sociedade esperam que as LTs cumpram permanente e indefinidamente o seu relevante papel de transportar a energia elétrica gerada em distantes sítios até os grandes ou pequenos centros de consumo. Essa qualificação na qualidade de suprimento eletro-energético está intimamente ligada a exigências mais atuais que estabelecem patamares econômicos (suprimento por expandidos períodos de tempo - décadas), e ainda patamares de conforto e de segurança (serviço contínuo). Conforto e segurança são sempre sinônimos de: lazer, produtividade, PIB, iluminação, alegria, atividades culturais, prazer, e os demais.

Deixando os patamares econômicos por conta dos variados cotejamentos e das decisões mercantilistas e mercadológicas - sem dúvida necessárias - as exigências de conforto/segurança vêm se avolumando, particularmente aquelas relacionadas à segurança (seja pessoal, seja de bens materiais). As causas correriam por conta dos sociólogos e das autoridades, fugindo, portanto, do objetivo aqui traçado. Já as consequências urge que os projetos das LTs sejam os melhores possíveis. "Otimizados" é o jargão do cotidiano no segmento cognitivo referente a projetos de LTs aéreas. Portanto, assumindo a evidente importância estratégica das LTs na sociedade, há ainda um reclamo, que até pode ser avaliado como sendo secundário - a inserção da LT no seu meio ambiente deve ser feita com harmonia e sensibilidade. Traduzindo em miúdos - as LTs devem ser também "atraentes ao olhar - bonitas". Sem dúvida, sempre que possível e ambientalmente correto, correndo o assunto por conta dos paisagistas e dos estetas. Ao final das contas, a beleza está nos olhos de quem contempla.

AVII.2 E quando um revés inesperado acontecer?

No caso em pauta, o inesperado pode ser representado por desligamentos intempestivos e por colapsos estruturais altamente indesejáveis das LTs. Tais eventos ocorrem com relativamente alta frequência, espalhados pelos 8.500.000 km² do território brasileiro... e em todos os outros países, igualmente, desigualmente. Qualquer que seja o evento de falha, destaca-se o do colapso estrutural, ou queda de torre, quando os custos de reposição dos elementos perdidos, da mão de obra necessária para reparar os danos, lucro cessante da empresa responsável... tudo isso sem mencionar os

desproporcionais óbices ao conforto e ao mínimo pelo que o consumidor pode clamar, e ainda a perda da credibilidade na qualidade de suprimento. Ações enérgicas se impõem, sempre! Nesse aspecto, é notável o esforço desenvolvido com o objetivo de melhor conhecer o fenômeno - ou fenômenos, de tal sorte a se poder classificá-los e modelá-los - sistemas frontais, tempestades, esses se prestando a abordagens estatísticas, e outros - todos os outros - que, na ausência de medições sistemáticas, requerem enfoques determinísticos.

Mesmo nessa sujeição aos reveses da ação destrutiva do vento, pode-se afirmar que, ainda assim, o Brasil se encontra em situação privilegiada, pois, considerados os 4 elementos - água, terra, fogo e ar - somente este último constitui-se em ameaça a ser modelada pela engenharia de sistemas elétricos aéreos. Terremotos, vulcões e "tsunamis" podem ser descartados, e os incêndios geralmente são criminosos (queima em canaviais, por exemplo) e, portanto, não serão, aqui, objeto de considerações.

Tem-se boas notícias de que os casos de quedas estruturais já são foco de investigações do nexo causal, de modo a estabelecer os parâmetros corretos para o projeto da torre substituta. Há também indícios de que uma uniformização nos protocolos de reparo venha a ser materializada, de modo a formar um banco de dados homogêneo e propiciar ações mais simples e pré-concebidas. Todos esses esforços são dignos de mérito e de menção especial. Quanto à matéria, vale ainda sugerir que torres de reposição, que certamente já terão um reforço estrutural projetado, sejam equipadas com um sistema de monitoração tal como: anemômetro sônico, painel solar, bateria e os acessórios para gravação e transmissão dos dados. Os locais onde ocorrem danos desse tipo são, necessariamente, potenciais sítios de ventos elevados e as coletas decorrentes enriqueceriam o banco de dados nacional, além de promoverem um permanente mapeamento atualizado das ocorrências danosas. Evidentemente, a sugestão pode ser aprimorada ou simplificada segundo regramentos técnico-econômicos.

E ainda, uma palavra sobre "tornados". Esse tipo de manifestação vem sendo cogitado cada vez mais frequentemente, na medida em que a realidade brasileira os inclui, mas nem tanto como na Flórida, para citar um exemplo muito bem conhecido. De toda e qualquer forma, eles podem ser ou ter sido causadores de variados acidentes em LTs, nos quais os danos certamente foram relevantes e preocupantes. Os tornados são objeto direto da classificação que o professor Dr. Fugita (Escala Fugita, Universidade de Chicago) produziu e que

se baseia no estrago que causam e não pelas suas dimensões físicas. Das cinco categorias (de F1 a F5) que o professor estabelece, logo a primeira pode ser evocada como simples exemplo:

Tornado F1: Velocidades de vento entre 117 e 180 km/h. Até mesmo estes tornados podem levantar telhas e mover carros em movimento para fora da estrada. Trailers podem ser tombados e barracos podem desmoronar.

Portanto, somente considerando "velocidades" dos mais fracos dos tornados, tais manifestações eólicas são capazes de se confrontar com os atuais parâmetros de qualquer projeto de LT. Como são turbilhonares e com altíssimos índices de turbulência, ensaios mecânicos estáticos não serão capazes de certificar estruturas a eles submetidos.

AVII.3 As formas de aprimoramento contínuo

O estudo aprofundado das células convectivas propriamente ditas já foi mencionado como item prevalente nessas ações de otimização de desempenho mecânico. Todavia, é necessário que se deem outros passos. Por exemplo: ao final das contas, não é a velocidade de um vento qualquer que causa danos variados. Mais precisamente analisando, são as forças resultantes da ação do vento sobre obstáculos que causam os eventos nocivos de quedas. Fato é que não há novidade nenhuma nessa assertiva - sabe-se bem - mas o polo aqui é o de enfatizar com clareza a importância do governante papel que as Normas Técnicas desempenham na preservação da integridade física dos suportes e demais componentes dos sistemas aéreos. Servem, portanto, de interface decisiva entre as velocidades do vento e as forças de deformação nos componentes aéreos.

Dentre três conhecidas Normas Internacionais, IEC 60826, EN 50341 e ASCE - Manual 74, há diferenças perceptíveis nas suas abordagens - ou modelos analíticos - e nos seus resultados. As duas primeiras baseiam-se em leituras ao longo de 10 minutos e adotam "fatores de rajadas" (> 1.0 pu), enquanto que a ASCE se fundamenta em leituras de 3 segundos, adotando "fatores de resposta a rajadas" (< 1.0 pu).

Tradicionalmente, a normalização brasileira vem se orientando muito mais nas Normas IEC do que em qualquer outra direção. No entanto, pode ser produtivo que as demais vertentes normativas não sejam descartadas, de forma a permitir

uma análise de sensibilidade nas respostas dessas Normas (e de outras julgadas como promissoras) nas determinações das pressões (ou forças) exercidas pelo vento sobre os componentes de uma LT. Essa sugerida abertura de escopo pode permitir, tempestivamente, que a revisão da NBR-5422, ora em curso, se pautar nas mais modernas e adequadas soluções visando a otimização do binômio "meio-ambiente x LTs aéreas" do ponto de vista técnico-econômico.

AVII.4 A distribuição de GUMBEL como alternativa isolada

Quando do projeto pioneiro de Itaipu, o MRI (Metheorological Research Inc.) introduziu os elementos básicos para a estatística de máximos anuais da distribuição de Gumbel. A abordagem conquistou o segmento pelos seus variados méritos e tornou-se uma unanimidade nacional para fazer inferências estatísticas quanto às velocidades do vento para fins de projeto de LTs. Vale lembrar, no entanto, que a estatística de séries de máximos anuais teve a sua gênese para avaliações de cheias prospectivas, quando a quantidade de elementos (5 - 10 décadas) permite inferências mais plausíveis, particularmente quando o período de retorno se afasta muito do período de coleta.

Fácil de se explicar o fato, já que a facilidade de se medir a vazão de um rio (régua na margem) é incomparavelmente mais simples do que se medir a velocidade do vento. As séries eólicas são geralmente mais curtas (1-2 décadas, ou bem menores). Mesmo que o método de ajuste dos mínimos quadrados permita uma correção que penaliza séries mais curtas de ventos (veja os fatores C_1 e C_2 , da IEC 60826, por exemplo), tal correção é matemática e não impede que os intervalos de confiança das avaliações (para 250 anos, por exemplo) sejam substancialmente dilatados (cerca de ± 20 a 30 km/h).

Um evento a ser destacado: Na passagem 1999-2000, todo o território francês e parte do alemão foram assolados por fortíssimos ventos que destruíram enorme parte do sistema aéreo francês e substantiva parte do alemão, nas proximidades da Floresta Negra. Na época, a rede de coleta eólica francesa já era 30 vezes mais densa do que a brasileira. Os custos de reposição e aprumo foram avassaladores, sem menção aos problemas diretamente ligados à ausência/acionamento de energia elétrica.

Como consequência, nos anos subsequentes ocorreram variados foros internacionais onde inúmeros trabalhos em que a modelagem da atividade eólica intensa se valia, não mais de um máximo anual, mas, sim, de todos os valores superiores a um patamar pré-estabelecido. Tudo isso, para expor que

as abordagens de forças naturais com tamanho potencial, deve ser objeto de contínuos aprimoramentos. Descarta também qualquer veleidade de que o elemento "ar" seja matemática e permanentemente modelado e subjugado.

AVII.5 Ventos determinísticos - quais são?

São aqueles que não possuem medições sistemáticas, seja porque destroem tanto que incluem a estação de medição, seja porque têm atuação territorialmente reduzida, escapando da rede nacional, seja por outra motivação qualquer. As suas respectivas velocidades são geralmente estimadas pelos danos locais que causam, ou por inferências indiretas através de imagens de satélites, ... outros.

Diz-se que são responsáveis pela maioria dos grandes desastres eólicos, quedas de torres, grande destruição, óbitos majoritários, etc. Não se sabe ao certo. Muita pesquisa deve anteceder afirmações mais sólidas. Enquanto isso vai avançando, uma forma nítida de abordá-los é a de fazer avaliações conservadoras dos ventos estatísticos e, caso necessário, ainda incluir fatores de segurança locais.

Justifica-se a singeleza e despretensão desse item - esse assunto ainda exige avaliações e decisões colegiadas com relação às hipóteses de carregamento necessárias, para que haja um máximo de benefícios ao setor interessado.