



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GLT - 21
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO III
GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

**PARÂMETROS METEOROLÓGICOS APLICÁVEIS PARA O PROJETO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO NO
PARANÁ**

Alexandre K. Guetter *

João N. Hoffmann

João L. S. Mello

SIMEPAR

COPEL

COPEL

RESUMO

Os dados de temperatura e vento das estações meteorológicas das redes do IAPAR e SIMEPAR foram analisados para produzir o mapeamento dessas variáveis para o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica no Paraná. Este mapeamento complementa os procedimentos especificados na norma NBR-5422 da ABNT. Os registros horários de 33 estações do IAPAR e 37 do SIMEPAR, para períodos distintos, foram consistidos para produzir as séries conjugadas de máximos anuais. As séries consistidas de temperatura e vento foram submetidas à análise estatística para estimar a variável em acordo com o grau de risco do projeto.

PALAVRAS-CHAVE

Meteorologia, Velocidade do vento, Temperatura, Linhas de Transmissão, Gumbel

1.0 - INTRODUÇÃO

Segundo a norma NBR-5422 (1) da ABNT, para projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, a obtenção dos parâmetros meteorológicos da região atravessada pela linha podem ser estabelecidos através de medições específicas para a região em questão, desde que a rede de medições local forneça dados confiáveis, com um bom sistema de instrumentos de medida, razoável período de registros e adequada densidade de estações. Os dados de duas redes de estações meteorológicas no Paraná (IAPAR e SIMEPAR) foram consistidos e analisados para produzir os parâmetros meteorológicos relevantes para o projeto de linhas de transmissão. O objetivo do projeto é detalhar a variação espacial, no Estado do Paraná, das estatísticas das variáveis meteorológicas: temperaturas média, mínima e máxima e intensidade e direção do vento e da rajada. Os dados usados para a obtenção das estatísticas foram provenientes das 33 estações meteorológicas convencionais do IAPAR (com início de operação variando entre 1954 e o final da década de 1970) e 37 estações telemétricas meteorológicas do SIMEPAR (com início de operação a partir de 1996. Para cada variável meteorológica analisada os 1.300.000 registros dos estações do SIMEPAR e os 800.000 registros das estações do IAPAR foram submetidos a um procedimento de controle de qualidade que excluiu os dados suspeitos da análise estatística e identificou os máximos e mínimos anuais. As séries consistidas das estações do IAPAR e do SIMEPAR foram analisadas para produzir as estatísticas das variáveis meteorológicas representativas para o projeto de linhas de transmissão.

A metodologia para análise dos dados e cálculo das estatísticas foi organizada em quatro fases: (1) análise das séries para cada estação do IAPAR e do SIMEPAR, com identificação e remoção dos dados suspeitos; (2) análise da compatibilidade entre os dados coletados três vezes ao dia nas estações do IAPAR e os dados horários das estações do SIMEPAR, de forma a produzir uma série única de estatísticas diárias para cada local que possuía

sensores e procedimentos de coleta de dados distintos; (3) intercomparação regional das estatísticas das estações, excluindo-se as estações com atributos significativamente diferentes das estações vizinhas e com características climáticas e fisiográficas semelhantes, (4) geração dos mapas das estatísticas de temperatura e vento com o uso de métodos geoestatísticos para interpolação espacial dos dados.

Os produtos do projeto de análise dos dados meteorológicos foram: (1) bases de dados consistidos das estações meteorológicas do IAPAR e do SIMEPAR; (2) análise climatológica dos dados com produção de estatísticas climatológicas; e (3) mapas da variação espacial das temperaturas média, máxima e mínima, mapas de vento e rajada, detalhando os mapas existentes na NBR-5422 para o Paraná. Este artigo resume o conteúdo do atlas das variáveis meteorológicas relevantes para o projeto de linhas de transmissão no Paraná, abordando o mapeamento da temperatura máxima e vento.

2.0 - ÁREA DE ESTUDO E DADOS

Os dados usados para a obtenção das estatísticas foram provenientes das 33 estações meteorológicas convencionais do IAPAR (com início de operação variando entre 1954 e o final da década de 1970) e 37 estações telemétricas meteorológicas do SIMEPAR (com início de operação a partir de 1996). O conjunto de 70 estações está distribuído em 50 localidades, das quais em 20 localidades há sensores do SIMEPAR e IAPAR na mesma estação. Os atributos das estações meteorológicas estão listados na Tabela 1 e suas localização estão ilustradas no mapa da Figura 1.

TABELA 1 – Atributos das estações meteorológicas do IAPAR e SIMEPAR

Região	Nome	Entidade	Latitude	Longitude	IAPAR		SIMEPAR	
					Início	Fim	Início	Fim
Capital	Cerro Azul	IAPAR/SIMEPAR	-24,8166	-49,2500	1986	1997	1998	2003
Capital	Curitiba	SIMEPAR	-25,4333	-49,2666	-	-	1998	2003
Capital	Lapa	IAPAR/SIMEPAR	-25,7833	-49,7666	1989	2002	1998	2003
Capital	Pinhais	IAPAR/SIMEPAR	-25,4167	-49,1333	1986	1997	1999	2003
Centro	Cândido de Abreu	IAPAR/SIMEPAR	-24,6333	-51,2500	1989	1998	1998	2003
Centro	Entre Rios	SIMEPAR	-25,5500	-51,4833	-	-	2001	2003
Centro	Fernandes Pinheiro	IAPAR/SIMEPAR	-25,4500	-50,5833	1986	2002	1999	2003
Centro	Foz do Areia	SIMEPAR	-26,0833	-51,6500	-	-	1998	2003
Centro	Guarapuava	IAPAR/SIMEPAR	-25,3500	-51,5000	1986	2002	1998	2003
Centro	Jaguariaíva	SIMEPAR	-24,2269	-49,6670	-	-	2001	2003
Centro	Laranjeiras do Sul	IAPAR	-25,4167	-52,4167	1986	2002	-	-
Centro	Palmital	SIMEPAR	-24,8833	-52,2166	-	-	1998	2003
Centro	Ponta Grossa	IAPAR/SIMEPAR	-25,2166	-50,0166	1986	2001	1998	2003
Centro	Telêmaco Borba	IAPAR/SIMEPAR	-24,3333	-50,6166	1986	2002	1998	2003
Centro	União da Vitória	SIMEPAR	-26,2333	-51,0666	-	-	1998	2003
Litoral	Antonina	IAPAR/SIMEPAR	-25,2200	-48,8000	1986	1999	1999	2003
Litoral	Guaraqueçaba	IAPAR	-25,3000	-48,3333	1986	2002	-	-
Litoral	Guaratuba	SIMEPAR	-25,8666	-48,5667	-	-	1999	2003
Litoral	Morretes	IAPAR	-25,5000	-48,8167	1986	2002	-	-
Noroeste	Campo Mourão	SIMEPAR	-24,0500	-52,3666	-	-	1998	2003
Noroeste	Cianorte	IAPAR/SIMEPAR	-23,6578	-52,5476	1986	2001	2003	2003
Noroeste	Paranavaí	IAPAR/SIMEPAR	-23,0833	-52,4333	1986	2002	1998	2003
Noroeste	Umuarama	IAPAR/SIMEPAR	-23,7333	-53,2833	1986	2002	1998	2003
Norte	Apucarana	IAPAR/SIMEPAR	-23,5075	-51,5447	1986	2002	2000	2003
Norte	Bela Vista do Paraíso	IAPAR	-22,9500	-51,2000	1986	2002	-	-
Norte	Ibiporã	IAPAR	-23,2667	-51,0167	1986	2002	-	-
Norte	Londrina	IAPAR/SIMEPAR	-23,3000	-51,1500	1986	2002	1998	2003
Norte	Maringá	SIMEPAR	-23,4500	-51,9833	-	-	1999	2003
Norte Pioneiro	Bandeirantes	IAPAR	-23,1000	-50,3500	1986	2002	-	-
Norte Pioneiro	Cambará	IAPAR/SIMEPAR	-23,0000	-50,0333	1986	2002	1998	2003
Norte Pioneiro	Joaquim Távora	IAPAR	-23,5000	-49,8700	1986	2002	-	-

Região	Nome	Entidade	Latitude	Longitude	IAPAR		SIMEPAR	
					Início	Fim	Início	Fim
Oeste	Assis Chateaubriand	SIMEPAR	-24,3886	-53,5411	-	-	1999	2003
Oeste	Cascavel	IAPAR/SIMEPAR	-24,8833	-53,5500	1986	1998	1998	2003
Oeste	Foz do Iguaçu	SIMEPAR	-25,4000	-54,6167	-	-	1998	2003
Oeste	Guaira	SIMEPAR	-24,0667	-54,2500	-	-	1998	2003
Oeste	Nova Cantu	IAPAR	-24,6667	-52,5667	1986	2002	-	-
Oeste	Palotina	IAPAR/SIMEPAR	-24,3000	-53,9166	1986	2002	1998	2003
Oeste	Quedas do Iguaçu	IAPAR	-25,5167	-53,0167	1986	1998	-	-
Oeste	Santa Helena	SIMEPAR	-24,9168	-54,3103	-	-	1998	2003
Oeste	São Miguel do Iguaçu	IAPAR/SIMEPAR	-25,3528	-54,2546	1986	1996	1998	2003
Oeste	Toledo	SIMEPAR	-24,7833	-53,7167	-	-	1998	2003
Oeste	Salto Caxias	SIMEPAR	-25,5166	-53,4833	-	-	1999	2003
Oeste	Salto Osório	SIMEPAR	-25,5167	-53,0167	-	-	2000	2003
Sudoeste	Clevelândia	IAPAR	-26,4167	-52,3500	1986	2002	-	-
Sudoeste	Francisco Beltrão	IAPAR	-26,0833	-53,0500	1986	2002	-	-
Sudoeste	Nova Prata do Iguaçu	SIMEPAR	-25,5666	-53,5166	-	-	1998	2003
Sudoeste	Palmas	IAPAR/SIMEPAR	-26,4667	-51,9667	1986	2002	1998	2003
Sudoeste	Pato Branco	IAPAR/SIMEPAR	-26,1166	-52,6833	1986	2002	1998	2003
Sudoeste	Planalto	IAPAR	-25,7000	-53,7667	1986	2002	-	-

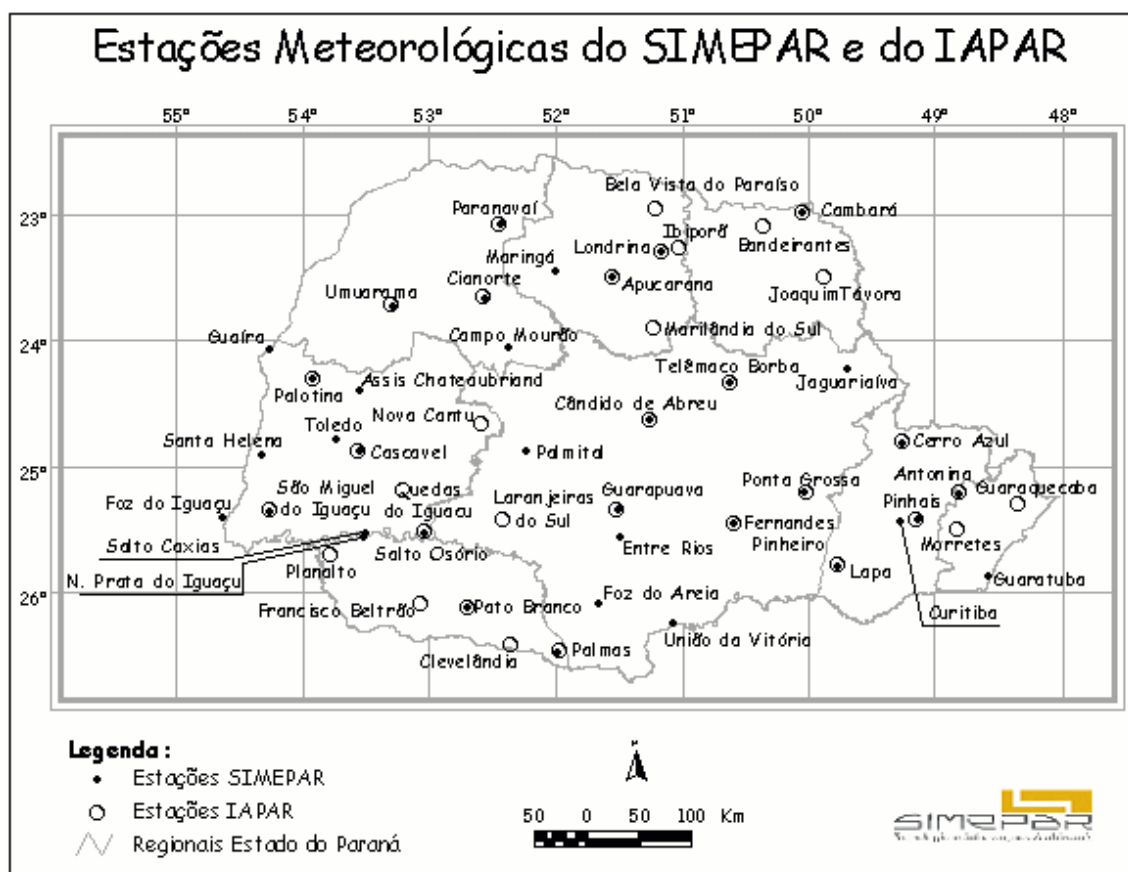


FIGURA 1 – Localização das estações meteorológicas do IAPAR e SIMEPAR

Os dados do IAPAR são coletados nos horários das 9h00, 15h00 e 21h00. Os dados do SIMEPAR são coletados de forma automática, com elevado número de amostras registradas pelo sensor em cada hora, porém o data-

logger armazena apenas três estatísticas para cada hora (máximo, mínimo, e o valor instantâneo no final da hora), que são transmitidas pelo satélite GOES e armazenadas no banco de dados do SIMEPAR.

A temperatura média diária corresponde à média dos registros de temperatura horária coletados no início de cada hora. A temperatura máxima (mínima) diária é o maior (menor) valor dos registros máximos horários. As variáveis vento e direção correspondem aos registros coletados no final de cada hora. O vento máximo diário é definido como o maior valor dos 24 registros instantâneos coletados no final de cada hora, sendo que direção do vento máximo diário corresponde à direção daquele registro. A variável rajada é o maior registro do vento amostrado pelo anemômetro no transcorrer da hora, sendo que o data-logger registra a rajada e sua direção e transmite o par de dados ao final de cada hora. A rajada é registrada no banco de dados ao final de cada hora, mas não significa que tenha sido observada instantaneamente naquela hora, uma vez que a rajada é o maior registro amostrado em qualquer intervalo de 30 s entre o início e o final da hora. A rajada máxima diária é o maior dos 24 registros de rajada horários.

O ciclo de transmissão dos dados das estações meteorológicas do SIMEPAR é de 3 horas. Sendo que em cada ciclo de transmissão o banco de dados assimila um grupo de 3 valores horários para cada variável, sendo um para cada hora.

As características dos sensores de temperatura e vento das estações do SIMEPAR estão resumidas na Tabela 2. As rotações das hélices do anemômetro é proporcional à velocidade do vento, sendo que cada revolução completa da hélice induz três ciclos da onda senoidal que corresponde a $0,0980 \text{ ms}^{-1} \text{ Hz}$. O anemômetro é instalado a 10 metros de altura. Os anemômetros são mantidos e recalibrados segundo um programa pré-estabelecido de manutenção preventiva.

TABELA 2 – Especificações dos sensores de temperatura e vento das estações do SIMEPAR

Instrumento	Parâmetro	Especificação
Anemômetro - SIMEPAR	Modelo	05103-11A: YOUNG
	Banda de medição	$0,0 \text{ ms}^{-1}$ a 60 ms^{-1}
	Rajada máxima (sem danificar o equipamento)	100 ms^{-1}
	Erro	0.3 ms^{-1}
Termômetro - SIMEPAR	Velocidade mínima para medição da direção	1.1 ms^{-1}
	Modelo	5600-0025: SUTRON Air Temperature
	Banda de medição	-80° C a $+75^{\circ} \text{ C}$
	Erro	0.1° C
	Tempo de resposta	2.5 s

3.0 - CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS

Os dados das estações do SIMEPAR e do IAPAR foram submetidos a um procedimento de controle de qualidade que excluiu os dados suspeitos (2). As estatísticas das variáveis meteorológicas representativas para o projeto de linhas de transmissão estão associadas com eventos severos e com a identificação de valores máximos anuais. Este requisito representa um grande desafio para o projeto do controle de qualidade, pois muitas vezes o registro suspeito, decorrente de uma transmissão de dados espúria tem magnitude comensurável com as possíveis ocorrências de eventos severos e sua exclusão só é possível com análises espaciais e através de análises de variáveis múltiplas. O controle de qualidade deve excluir registros espúrios, que se mantidos aumentariam a frequência de casos extremos, distorcendo a estimativa de parâmetros que produzem a função de probabilidade de extremos e os tempos de retorno. O controle de qualidade não pode, em nenhum de seus testes, excluir registros extremos reais.

O controle de qualidade foi implementado em três fases, sendo a primeira automática e a segunda e terceira com interferência "manual" do analista. A Fase 1 correspondeu à análise individual da série para uma variável, na qual foi aplicado um teste de extremos, parametrizado para cada região e estação do ano. O registro que estiver fora do intervalo entre os limites inferior e superior do teste de extremos é indexado como valor suspeito. Na Fase 2 se aplicam testes sobre variáveis múltiplas para uma mesma estação, por exemplo, vento e rajada e suas direções, se o valor do registro suspeito de vento exceder ao da rajada, então o registro é excluído da série. Na Fase 3 se aplica a análise espacial da série, inspecionando os registros suspeitos com os registros simultâneos das estações mais próximas que estejam na mesma região fisiográfica; se as demais estações também não tiverem nenhum sinal de evento extremo então o registro suspeito é excluído da série. O percentual de falhas e dados espúrios das estações do SIMEPAR variou entre 1% e 3% dos registros para o período entre 1998 e 2003.

O maior desafio deste projeto foi o desenvolvimento dos procedimentos de controle de qualidade para que os valores máximos anuais de temperatura e vento efetivamente refletissem a ocorrência de eventos extremos. Portanto, o objetivo do controle de qualidade foi o de analisar 15.000.000 de registros para identificar aproximadamente 1.000 casos de valores máximos anuais. O controle de qualidade identificou cerca de 300.000

casos de falhas e dados suspeitos, sendo que o número de dados suspeitos foi da ordem de 30.000 registros. Da amostra de dados suspeitos, cerca de 10.000 registros tinham magnitude probabilisticamente aceitável, mas 90% deles não eram consistentes com a seqüência de dados do evento e com os padrões espaciais, tendo sido excluídos das séries consistidas.

4.0 - ESTATÍSTICA DAS SÉRIES DE VENTO

As séries de velocidades máximas anuais das estações do IAPAR foram analisadas para o mesmo período comum de 17 anos entre 1986 a 2002 e as séries provenientes das estações do SIMEPAR para o período de 6 anos entre 1998 e 2003. O período 1998-2002 apresentou registros simultâneos do IAPAR e SIMEPAR para a maioria das estações, embora algumas estações do IAPAR estejam sendo gradativamente desativadas de forma que nesses casos não há observações simultâneas.

As séries de variáveis meteorológicas diárias consistidas foram analisadas para se conjugar as séries do IAPAR entre 1986-1997 e as séries do SIMEPAR entre 1998-2003. Os mapas da Figura 2 ilustram as médias da velocidade máxima de vento diário resultantes das redes do IAPAR e SIMEPAR.

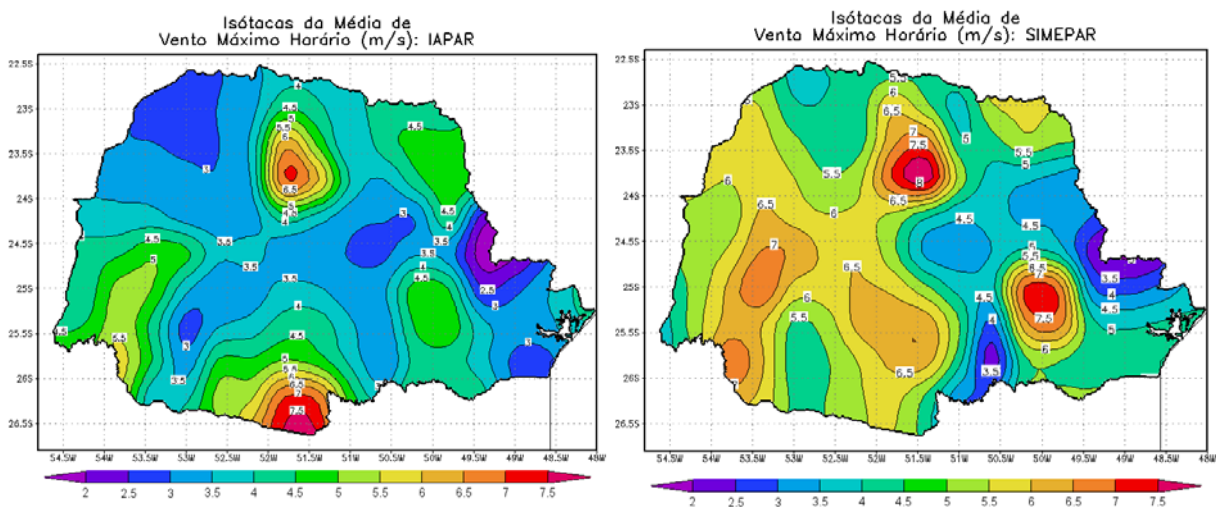


FIGURA 2 – Média da velocidade máxima diária do vento das redes do IAPAR (esquerda) e SIMEPAR (direita)

As médias de longo termo das velocidades máximas diárias do vento de IAPAR e SIMEPAR apresentam os mesmos padrões espaciais. Ambas redes indicam maior frequência de vento na região de Ponta Grossa (50.0 W, 25.2 S), Apucarana (51.5 W, 23.5 S), e Palmas (52.0 W, 26.5 S). Todavia, a velocidade máxima diária do vento do SIMEPAR, obtida de 24 observações horárias, é sempre maior que a velocidade máxima diária derivada dos dados do IAPAR com 3 registros diários (9h00, 15h00 e 21h00). Para a análise conjunta dos dados do IAPAR e SIMEPAR é necessário computar um fator de ajuste para majorar as estatísticas dos registros de vento do IAPAR, durante o período 1986-1997, para que reproduzam as mesmas propriedades das séries do SIMEPAR.

5.0 - ANÁLISE DAS VELOCIDADES MÁXIMAS ANUAIS DO VENTO

Para a conjugação das séries de velocidades máximas anuais das estações do IAPAR e SIMEPAR, se computou um fator de ajuste derivado da média das razões entre velocidades máximas anuais do IAPAR e SIMEPAR para o período de cinco anos com dados comuns entre 1998 e 2002. O fator de ajuste médio foi de 1.55, isto é, a velocidade máxima anual do IAPAR para o período entre 1986-1997 foi majorada em 55% na média das estações analisadas.

5.1 Fator de Rajada

Usaram-se as séries consistidas de vento e rajada para se calcular o fator de rajada, a partir dos registros horários da rede do SIMEPAR, para o período de 1998 a 2003. O fator de rajada foi calculado para cada uma das 37 estações do SIMEPAR, como sendo a média das razões entre os registros horários simultâneos de vento e rajada, sujeita às condições que o valor da rajada fosse maior do que 15 ms^{-1} e que o vento horário fosse maior do que 10 ms^{-1} . A Tabela 3 resume o fator de rajada para o subconjunto de 14 estações selecionadas para a análise da velocidade máxima do vento.

TABELA 3 – Fator de Rajada

Região	Estação	Numero de Casos	Fator de Rajada
Capital	Lapa	55	1,49
Capital	Pinhais	14	1,51
Centro	Cândido de Abreu	17	1,51
Centro	Fernandes Pinheiro	7	1,59
Centro	Guarapuava	111	1,41
Centro	Palmital	159	1,46
Centro	Ponta Grossa	234	1,40
Centro	Telêmaco Borba	34	1,53
Noroeste	Paranavaí	19	1,39
Noroeste	Umuarama	80	1,50
Norte	Apucarana	85	1,42
Norte	Londrina	10	1,47
Oeste	Palotina	18	1,47
Sudoeste	Pato Branco	13	1,47

5.2 Série de Velocidade Máxima Anual

Selecionou-se o período comum de 15 anos, entre 1989 e 2003 para a construção das séries de vento máximo anual. As velocidades máximas anuais para os primeiros 9 anos, entre 1989 e 1997, foram obtidas da análise dos dados de vento do IAPAR, majorados pelo fator de ajuste e pelo fator de rajada. As velocidades máximas anuais para os últimos 6 anos, entre 1998 e 2003, foram obtidas diretamente das séries de rajada consistidas do SIMEPAR. Descartou-se o período de 1986-1988 da análise para se reduzir o impacto de eventuais incertezas na construção das séries de velocidades máximas anuais proveniente dos registros do IAPAR. A Figura 3 ilustra as isotacas da média das velocidades máximas anuais para o período 1989-2003.

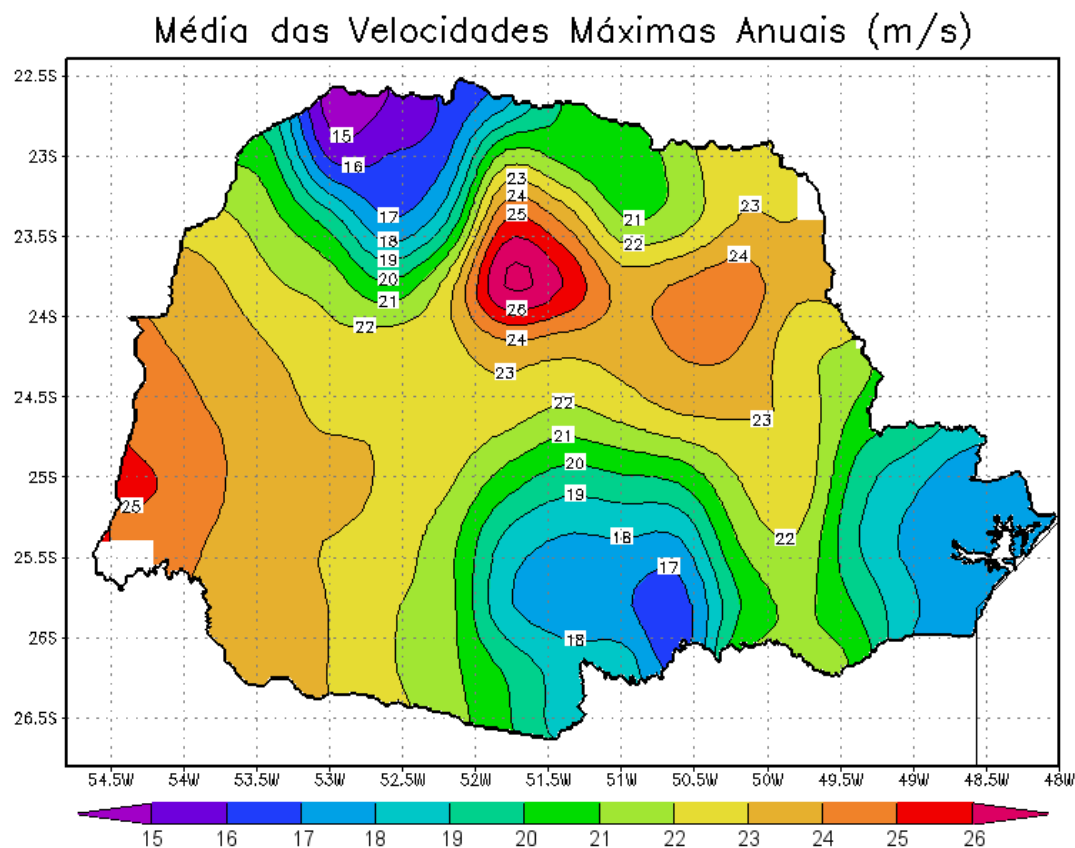


FIGURA 3 – Isótacas da média das velocidades máximas anuais para o período 1989-2003

5.3 Distribuição de Extremos de Gumbel

As séries de velocidade máxima anual entre 1989-2003 foram usadas para estimar os parâmetros da distribuição estatística de extremos de Gumbel, denominados de “Alfa” e “Beta” na NBR-5422 da ABNT. A Figura 4 ilustra a distribuição espacial dos parâmetros da distribuição de Gumbel para o vento de 30 s, medido a 10 m de altura e em terreno com rugosidade tipo B.

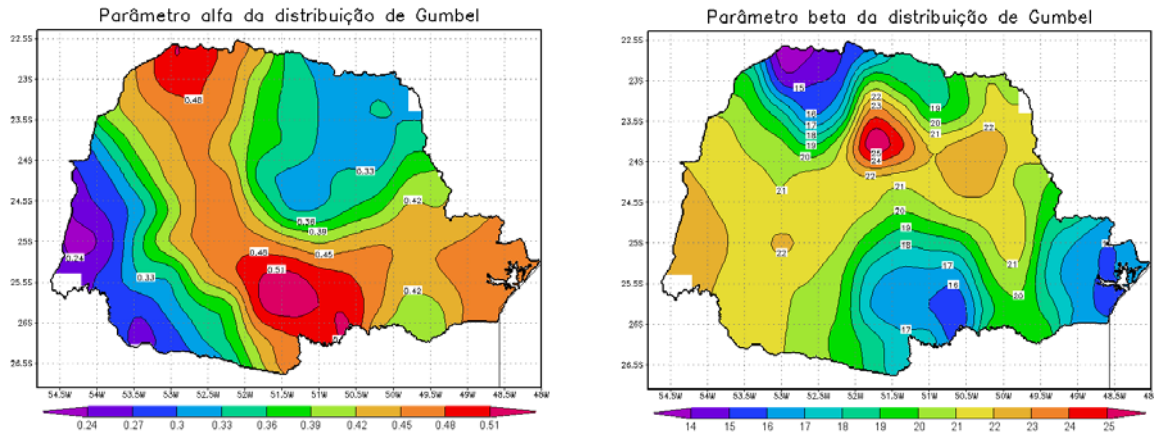


FIGURA 4 – Parâmetros alfa, em $m^{-1}s$, (esquerda) e beta (direita), ms^{-1} , da distribuição estatística de Gumbel

6.0 - MAPEAMENTO DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

A Figura 5 ilustra o mapa das isotermas da média anual de temperatura máxima e as isolinhas da média do número de dias por anos com temperatura máxima diária maior do que $30^{\circ}C$. A interpolação espacial dos dados de temperatura máxima usou os dados de elevação do terreno, com resolução de 90 m, para incluir o efeito do relevo sobre as temperaturas. As maiores temperaturas são registradas no litoral, na região oeste ao longo do vale do Rio Paraná, e na região noroeste. As maiores freqüências de temperaturas elevadas ocorrem nas regiões oeste e noroeste, com quase metade do ano caracterizado por temperaturas máximas diárias superiores a $30^{\circ}C$.

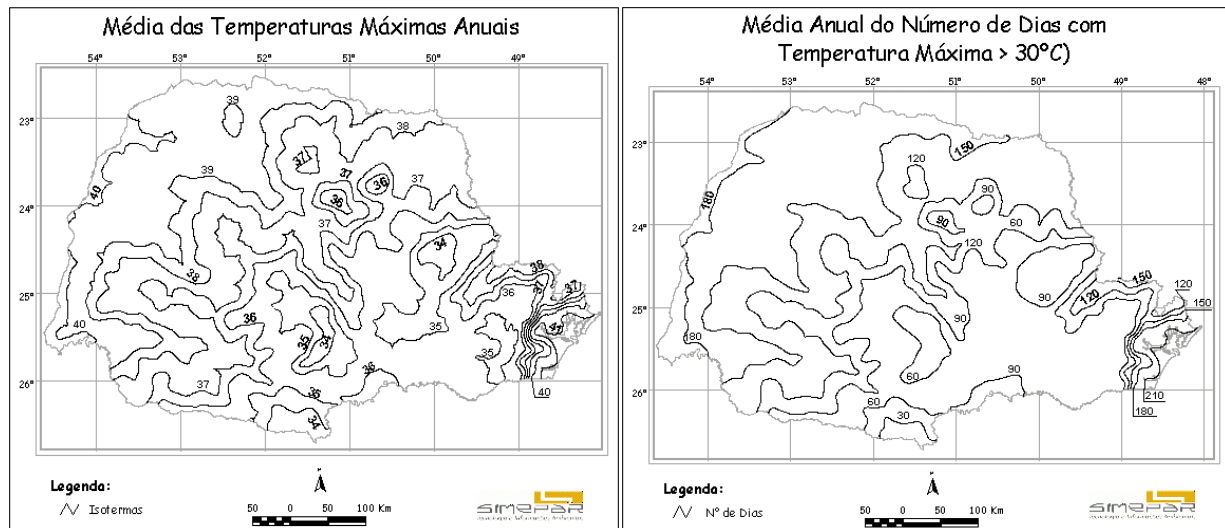


FIGURA 5 – Isotermas da média anual de temperatura máxima ($^{\circ}C$)

A Figura 6 ilustra as isotacas da velocidade básica do vento para o tempo de retorno de 50 anos, sendo que o vento tem resolução de 30s e a rugosidade do terreno é tipo B. As isotacas foram mapeadas a partir da seleção de 14 estações que amostraram as regiões Capital, Centro, Norte, Noroeste, Oeste e Sudoeste do Paraná. As

regiões do Litoral e Norte Pioneiro (nordeste) não foram amostradas porque os procedimentos de controle de qualidade e análise estatística dos dados indicaram a sua exclusão do mapeamento.

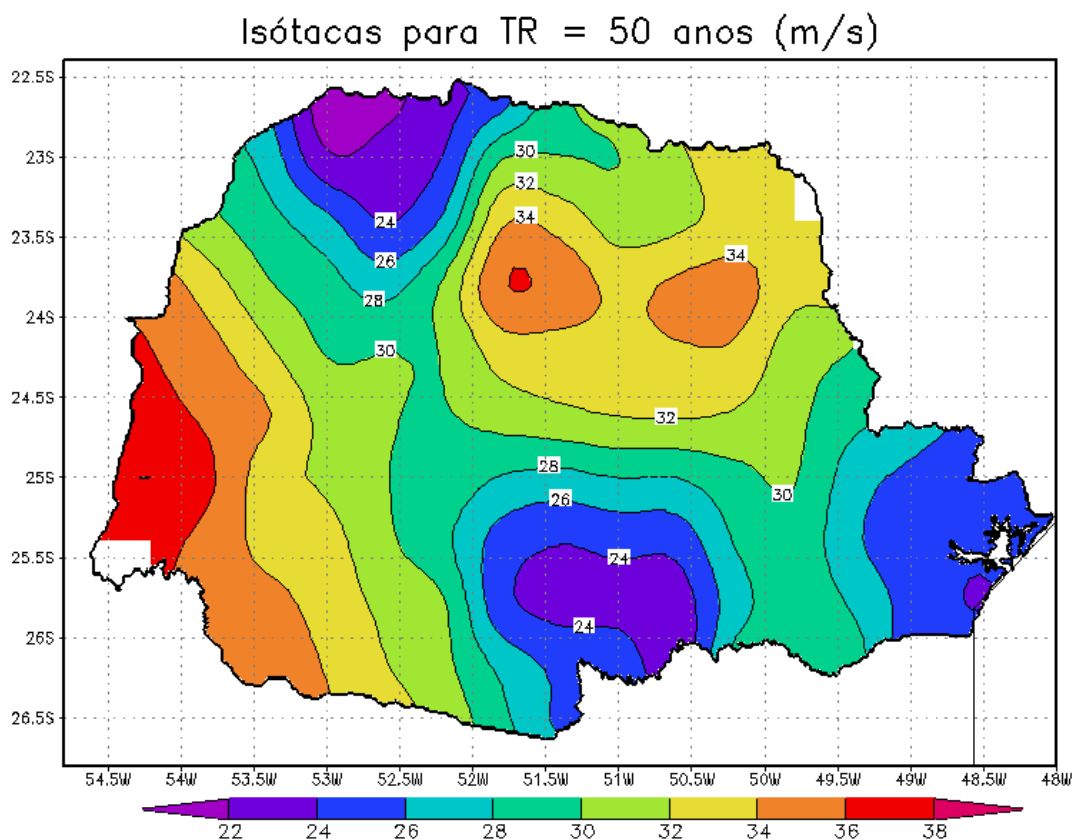


FIGURA 6 – Velocidade básica do vento, com resolução de 30 s, para o tempo de retorno de 50 anos

7.0 - CONCLUSÃO

O resultado da análise dos dados de temperatura e vento das estações meteorológicas das redes do IAPAR e SIMEPAR foi o detalhamento do mapeamento dessas variáveis meteorológicas para o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica no Paraná. O mapeamento produzido neste estudo complementa os procedimentos especificados na norma NBR-5422 da ABNT.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ABNT – NBR 5422, Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica, Mar/1985.
- (2) PRATES, J. E.; ZAICOVSKI, M. B.; GUETTER, A. K.; Variabilidade Temporal e Espacial do Vento Médio e de Rajada no Paraná. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Foz do Iguaçu – PR, 2002.