



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

BR/GLT/06
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

A UTILIZAÇÃO DA CLIMATOLOGIA VIRTUAL NA ANÁLISE DE CARREGAMENTOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO: UM ESTUDO DE CASO COMPARANDO DADOS SIMULADOS CONTRA MEDIDOS

Rubinei Dorneles Machado(*)
Aldo Cosentino
Sergio Colle
Claudionor Kosmann
UFSC

Ricardo Hallak
USP

Dalton O. C. do Brasil
ONS

RESUMO

A operação de linhas aéreas de transmissão é subsidiada normalmente por dados climáticos. Uma das soluções possíveis para suprir a falta destes dados é a utilização da modelagem climática (climatologia virtual), na qual os dados climáticos ao longo da LT são simulados numericamente numa técnica denominada de downscaling dinâmico. Para avaliar o desempenho da modelagem climática obtida a partir do downscaling, comparou-se os dados meteorológicos simulados contra os medidos por uma estação meteorológica instalada ao longo de uma LT. Assim, o objetivo foi descrever o quanto a utilização da modelagem climática pode ser útil para a análise das capacidades operativas dinâmicas de LTs.

PALAVRAS-CHAVE: Downscaling, dados ambientais, modelagem climática, Linha de Transmissão, capacidades operativas

1.0 - INTRODUÇÃO

Com a reestruturação do setor elétrico brasileiro houve a desverticalização das empresas de energia, dividindo-as nos segmentos de geração, transmissão e distribuição, e posteriormente comercialização, importação e exportação de energia. Por conseguinte, incentivou-se a competição na geração e comercialização criando um ambiente propício a transações de compra e venda de energia elétrica no Brasil. Este cenário tem contribuído para o aumento da demanda de energia do sistema elétrico, o que condiciona o sistema energético à expansão e construção de novas linhas de transmissão. No entanto, segundo [1] e [2] a construção de novas linhas é um processo que encontra obstáculos na esfera ambiental visto à necessidade de liberação de faixas de passagem e licenciamento de obras. Há também a objeção no âmbito econômico, com valores de desapropriação destas faixas sendo muito maiores atualmente.

Neste contexto, a utilização de métodos que permitam aumentar a capacidade de uma LT existente seria uma alternativa para postergar investimentos e otimizar os ativos existentes. Esta recapacitação de LT além de não gerar novos impactos sobre o ambiente possibilita ampliar o uso da LT em tempo menor se comparado à construção de uma nova linha [1].

Ainda de acordo com Prada [1] e [3] a velocidade do vento e a temperatura do ar são variáveis que devem ser monitoradas para avaliar a possibilidade de recapacitação de LTs. Assim, evidencia-se que a operação de linhas aéreas de transmissão é pautada também por dados climáticos. No entanto, a obtenção de dados confiáveis em locais de interesse para o setor elétrico nem sempre é possível devido à falta de estações meteorológicas em regiões próximas as LTs ou, caso existente, não contenham dados com a qualidade ou quantidade adequada. Uma das soluções possíveis para suprir esta falta é a utilização de climatologia climática, na qual dados climáticos ao longo da linha de transmissão são simulados numericamente a partir de um conjunto de dados meteorológicos coletados

(*) Universidade Federal de Santa Catarina/Departamento de Engenharia Mecânica
Bloco A3 - 3º andar Trindade - Florianópolis/SC CEP 88040-900 e-mail: rubinei@lepten.ufsc.br

por fontes distintas e reunidos numa mesma base qualificada de dados, numa técnica denominada de downscaling dinâmico. Segundo [4] o uso de dados meteorológicos obtidos a partir do downscaling (modelagem climática) para pontos (latitude e longitude) sobre uma LT permite analisar o carregamento da LT identificando com segurança os pontos nos quais o carregamento é mínimo. Esta técnica não somente determina a capacidade de carregamento (Ampacidade) de forma mais realista, como permite, através da visualização de áreas de concentração de ventos de menor intensidade, a utilização de um traçado que favoreça ainda mais esta capacidade.

Para avaliar o desempenho da modelagem climática, num ponto de uma LT, a partir da técnica de downscaling dinâmico, comparou-se os dados meteorológicos simulados (velocidade média do vento e temperatura do ar) contra os dados medidos por uma estação meteorológica instalada no travessão de uma LT. Assim, o objetivo deste trabalho foi comparar as variáveis meteorológicas simuladas contra as medidas para avaliar o quanto a utilização da modelagem climática pode ser útil para a análise das capacidades operativas dinâmicas de LTs.

2.0 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Modelagem climática

A modelagem climática utilizada neste trabalho é um conjunto de dados ambientais obtidas a partir da técnica denominada downscaling dinâmico. Esta técnica consiste em obter a climatologia de dados ambientais com alta definição espacial e temporal em uma área limitada do globo terrestre por meio do uso de avançados códigos computacionais, denominados modelos numéricos da atmosfera. Os modelos numéricos regionais representam o estado da arte do conhecimento humano nas áreas da física e matemática associadas com o tempo e o clima. No presente trabalho, o Advanced Regional Prediction System – ARPS (Sistema de Previsão Regional Avançada [5],[6] e [7]) é usado para obter a climatologia da região de interesse. Para isso, são fornecidos ao modelo como condições iniciais e de fronteira da região em análise as matrizes de dados tridimensionais globais provenientes do Modelo de Circulação Geral da Atmosfera desenvolvido pelo NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Com arquivos de dados disponíveis desde 2000 até os dias de hoje, os dados tridimensionais fornecidos ao ARPS compreendem todas as variáveis termodinâmicas (por exemplo, temperatura, umidade, pressão atmosférica) e dinâmicas (velocidade do vento), disponíveis com resolução horizontal de 100 km e com intervalo de 6 horas na resolução temporal. O modelo ARPS contém a física necessária para reproduzir fenômenos observados na atmosfera em escala regional os quais os modelos globais não reproduzem. Este conjunto de fenômenos inclui nuvens e precipitação, sistemas organizados de mesoescala e efeitos da camada limite planetária nos primeiros metros da atmosfera acima da superfície.

A partir dos dados do modelo global, o modelo ARPS é integrado com uma grade numérica de alta resolução espacial (com 10 km de espaçamento entre os pontos de grade), para a qual os dados globais são interpolados. São então realizadas análises objetivas para que as características fisiográficas da região, como topografia, vegetação, tipo de solo e uso do solo sejam adequadamente incorporadas à física do modelo regional. Os modelos regionais possuem ainda a física do solo, de forma que informações provenientes do modelo global a respeito da temperatura e umidade das camadas do solo, bem como dos corpos d'água como lagos e oceano, são também introduzidas no modelo. O modelo ARPS foi então integrado para cada dia do período analisado, com condições iniciais correspondentes às 1800 UTC (Universal Time Coordinated) e por 30 horas a cada rodada. As primeiras 6 horas do resultado do modelo são descartadas por conta do efeito denominado “spin up”, correspondente ao período em que as variáveis atmosféricas na nova grade de 10 km se ajustam às condições meteorológicas de grande escala fornecidas pelo modelo global. Assim, a cada dia do período de climatologia (isto é, a cada 24 horas), há um novo conjunto de dados com frequência de amostragem de meia hora e na resolução espacial de 10 km. Por fim, salienta-se que a climatologia regional obtida a partir do modelo ARPS considerou um período de sete anos (2005 a 2012).

2.2 Dados utilizados para avaliação

Para avaliar se a modelagem climática criada pelo modelo ARPS consegue reproduzir com habilidade os dados ambientais registrados sobre um ponto de uma Linha de Transmissão, neste trabalho foram consideradas as variáveis velocidade do vento e temperatura do ar. Conforme já mencionado neste trabalho, estas variáveis ambientais são fortemente consideradas nos estudos de projeto de LTs e de capacidades operativas dinâmicas de LTs.

Para tanto foram considerados os dados consistidos da estação meteorológica automática instalada no travessão da Torre 172 (latitude 24°30'44.40" S e longitude 50°17'2.60" O) da linha de transmissão Figueira – Ponta Grossa Norte (FRA-PGN) de propriedade da COPEL. Os dados medidos foram corrigidos para a altura de 10 m conforme indicação da Norma. Tal estação foi instalada no contexto do projeto RMLT (Rede de Monitoramento de Linhas de Transmissão) encomendado pela ANEEL e executado pela UFSC/LEPTEN sob a interveniência técnica do ONS. As estações meteorológicas desta rede são referência no monitoramento ambiental de LTs por utilizarem sensores de vento ultrassônicos, que são capazes de medir baixas velocidades de vento (entre 0 e 0,5 m/s) com incerteza

menor que os sensores utilizados para medir velocidades de vento em aeroportos e redes meteorológicas convencionais. A tabela 1 apresenta a característica dos sensores utilizados para medir os dados utilizados neste trabalho e a tabela 2 descreve os tempos de amostragem e os valores médios calculados das variáveis meteorológicas. Neste artigo serão discutidos apenas os resultados encontrados para as estações do ano inverno (01 de abril a 30 de setembro, de acordo com relatório FT ABRATE-ONS, 2012) e verão (01 de outubro a 31 de março, FT ABRATE-ONS). Considerou-se a série temporal de 01 de fevereiro de 2010 a 31 de março de 2013.

TABELA 1 – Características e acurácia dos sensores utilizados para medir dados meteorológicos na LT FRA-PGN.

Sensor	Modelo	Característica	Acurácia
Velocidade do vento	Vaisala WXT-520	0 ... 60 m/s	$\pm 3\%$ até 10 m/s
Temperatura do ar	Vaisala WXT-520	-52 ... +60 °C	± 0.3 °C

TABELA 2 – Tempos de amostragem e média das variáveis.

variável	Amostragem	média armazenada
Velocidade do vento	cada 1 s	10 min
Temperatura do ar	cada 1 min	10 min

Os dados ambientais utilizados neste estudo são obtidos da seguinte maneira pela estação meteorológica: a cada 10 minutos é calculada uma média temporal da velocidade do vento e temperatura do ar utilizando os valores instantâneos amostrados conforme descrito na tabela 2. Outras variáveis meteorológicas também são medidas por esta estação, porém não foram utilizadas neste estudo. A partir destas médias foram calculados 48 valores médios de um dia (médias dos minutos 00 e dos minutos 30) para as estações do ano inverno e verão. Ou seja, foram calculados os valores médios de cada 30 minutos para o inverno e verão dos anos de 2010 a 2013. Por exemplo, para o minuto 00:00 encontrou-se um valor médio de toda a série temporal citada para o inverno e verão, para o minuto 00:30 outro valor e assim consecutivamente até o minuto 23:30.

2.3 Metodologia para avaliação da modelagem climática

Neste trabalho foram utilizados índices estatísticos relativos e absolutos com a finalidade de verificar se a modelagem climática reproduz os valores registrados pela estação meteorológica. De acordo com [8], a utilização em conjunto de diferentes índices durante a avaliação de desempenho de modelos de simulação pode evitar a penalização dos resultados em relação a utilização isolada de uma medida de erro. Ou seja, utilizar apenas um índice estatístico para avaliar a eficácia de modelos pode ser uma forma inadequada da estimativa do desempenho dos modelos, sendo o uso de distintas medidas de erro em conjunto um método mais justo para avaliação de modelos. Segundo [9] a utilização de um conjunto de medidas também atua como um efeito compensatório, uma vez que cada índice estatístico possui uma lacuna que pode ser preenchida com o uso de outro. Sendo assim, para avaliar o *skill* dos dados obtidos através da modelagem climática foram calculados sete índices estatísticos (ver Tabela 3).

TABELA 3 – Índices estatísticos utilizados para avaliação da modelagem climática

Índices estatísticos	Símbolo	Unidade
Erro médio (<i>bias</i>)	B	°C, m/s e W/m ²
Erro médio absoluto	EA	°C, m/s e W/m ²
Raiz quadrada do erro quadrático médio	REQ	°C, m/s e W/m ²
Razão dos desvios	R σ	Adimensional
Correlação linear	r	Adimensional
Coefficiente de Eficiência	E	Adimensional
Índice de concordância	d	Adimensional

3.0 - RESULTADOS

Através das médias horárias dos anos de 2010 a 2013 obtidas pela estação meteorológica e simuladas a partir da modelagem climática para as estações verão e inverno realizou-se avaliações objetivas utilizando os índices estatísticos apresentados no item 2 deste trabalho.

3.1 *Velocidade do vento*

Para o verão (ver Figura 1) nota-se que os valores médios da velocidade do vento não ultrapassaram o limite superior de 3,9 m/s tanto pela estação meteorológica quanto pela modelagem climática. O limite inferior medido foi de 3 m/s e 2 m/s simulado. Assim, de acordo com os valores registrados nesta estação para a série temporal em questão, pode-se afirmar que neste ponto da Linha de Transmissão há baixa variabilidade das médias de velocidade de vento (variando de 3 a 3,9 m/s) durante o verão. Verifica-se também que os maiores valores médios registrados pela estação ocorreram no período noturno, com a modelagem climática demonstrando habilidade em simular estes valores máximos. Porém, para o período diurno o modelo subestimou os valores médios da velocidade do vento, embora tenha representado com razoável precisão a variabilidade temporal das médias de vento. E essa subestimativa torna-se evidente analisando os índices estatísticos calculados (ver TABELA 4), em especial o *bias* (-0,2).

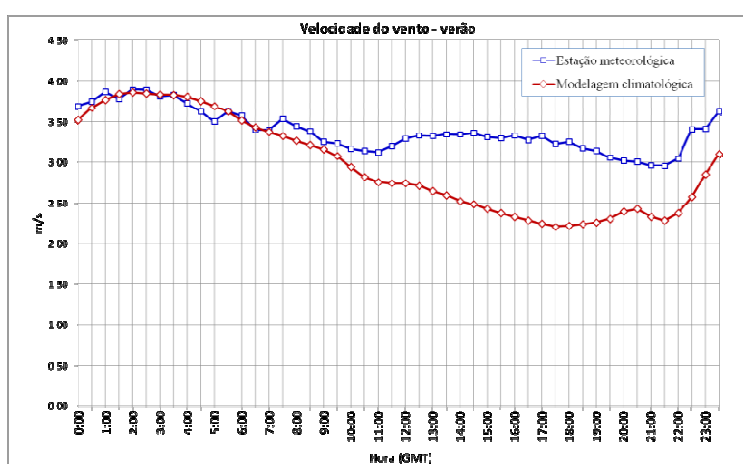


FIGURA 1- Médias temporais da velocidade do vento para o verão de 2010 a 2013 medidas pela estação meteorológica e simuladas pela modelagem climática.

TABELA 4 – Índices estatísticos definidos na tabela 3 e média aritmética calculada para os valores médios da velocidade do vento do verão de 2010 a 2013.

Verão	média	σ	B	EA	REQ	R σ	d	r	E
modelagem climática	2,8	0,6	-0,2	0,2	0	2,2	0,3	0,85	0,1
medido	3,3	0,3							

De acordo com os índices estatísticos apresentados na tabela 4 nota-se que é possível fazer uso de dois caminhos para determinação de vento nesta estrutura da LT quando não disponível o monitoramento por uma estação meteorológica. Um deles seria utilizar a média dos valores medidos (3,3 m/s), uma vez que a variabilidade intra-sazonal da velocidade média do vento é mínima para o verão. E esta afirmação é ratificada pelo coeficiente E, de Nash e Sutcliffe (1970), que indica que para valores de E distantes de 1 deve-se utilizar a média das observações. Porém, como não é possível monitorar todos os trechos de uma LT fica evidente que a modelagem climatológica poderia ser utilizada com segurança e como uma segunda alternativa para trechos ou LTs onde não há monitoramento, pois de acordo com a figura 1 os valores médios de vento simulados são sempre iguais ou menores que os medidos. Ou seja, para efeitos de estudos de capacidades operativas dinâmicas de LTs este método de determinação de velocidade do vento poderia ser considerado conservador para os referidos estudos.

Para o inverno os valores médios de velocidade do vento simulados pela modelagem climática subestimaram em toda a série temporal os valores medidos pela estação meteorológica (ver FIGURA 2). No entanto, a modelagem reproduziu com habilidade a variabilidade temporal do vento medido, mesmo tendo apresentado valores médios mais homogêneos o que resultou na curva mais suavizada em relação ao dado medido pela estação meteorológica. Ainda no tocante a variabilidade da velocidade do vento, nota-se que no final do período diurno o modelo

representa corretamente o decréscimo dos valores médios de velocidade do vento (20 GMT até 21 GMT) e o posterior aumento das velocidades. Este perfeito ajuste entre a fase dos dados medidos e simulados é indicado pela alta correlação linear e razão dos desvios padrão apresentada na tabela 5. Soma-se a estes índices a concordância perfeita entre os valores simulados e medidos ($d=1$, ver Tabela 5) e o coeficiente de eficiência (0,9) que indica que a modelagem climática é melhor preditora da velocidade média de vento no inverno para este ponto da LT do que a média das observações. Ressalta-se que estes valores encontrados para os índices citados estão apoiados no *bias* constante da série temporal. Isto permite corrigir a modelagem durante o pós-processamento e atingir valores próximos aos medidos. Verifica-se ainda que as maiores médias de velocidade do vento para o inverno ocorreram no período noturno (4,1 m/s contra 3,9 m/s no verão). Já a amplitude destes valores também variou pouco (0,9 m/s) ao longo das horas do dia no inverno (idem ao verão). Para os valores simulados, de acordo com a figura 2, também verifica-se baixa amplitude da média velocidade do vento ao longo do dia (1,4 m/s) com valores de máximo e mínimo variando entre 3,5 m/s e 2,1 m/s, respectivamente. De maneira geral, isto demonstra que a modelagem climática para a variável velocidade média do vento, independente da estação do ano inverno ou verão, simula ventos iguais ou inferiores aos registrados pela estação meteorológica.

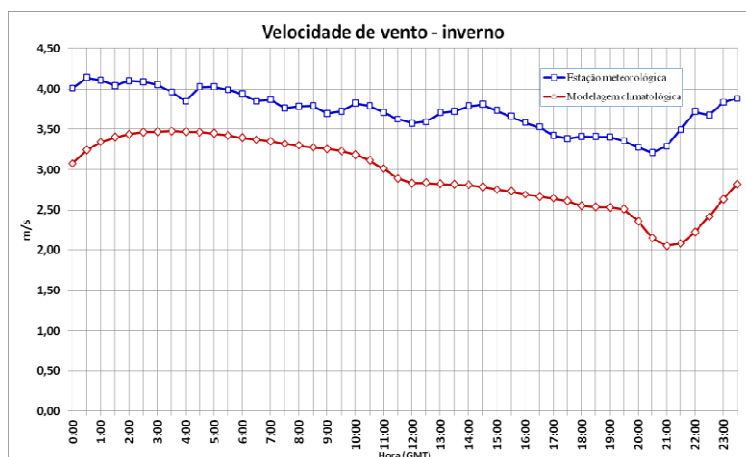


FIGURA 2- Médias temporais da velocidade do vento para o inverno de 2010 a 2013 medidas pela estação meteorológica e simuladas pela modelagem climática.

TABELA 5 – Idem a tabela 4, porém considerando a velocidade do vento do inverno de 2010 a 2012.

Inverno	Média	σ	B	Ea	Req	R σ	d	r	E
Modelagem climática	2,9	0,4	-0,8	0,8	0,8	1,7	1	0,83	0,9
Medido	3,7	0,2							

3.2 *Temperatura do ar*

Para a temperatura do ar nota-se que o modelo também subestima os valores médios medidos pela estação meteorológica (ver Figura 3). Porém, a modelagem climática apresenta habilidade em simular o ciclo diurno das médias da temperatura medida. Esta informação é evidenciada na tabela 6 a partir dos índices de concordância e razão dos desvios padrão que informam o perfeito ajuste na fase temporal entre os dados medidos e simulados, e da forte correlação (0,9) existente entre os valores medidos da modelagem e dos registros. Uma das vantagens de utilizar processamento numérico para obter informações sobre a atmosfera é a possibilidade de corrigir alguns erros constantes do modelo durante a fase de pós-processamento, conforme dito anteriormente. Por exemplo, para a temperatura do ar no período do verão removeu-se o *bias* frio do modelo (figura não mostrada) o que manteve os valores dos índices que indicam o perfeito ajuste de fase, porém reduziu os valores encontrados para os índices EA e REQ indicando valores simulados mais próximos aos registrados pela estação. Outro índice estatístico que teve seu valor alterado com a remoção do *bias* de 0,5 para 0,95 (valor não mostrado na tabela 6) foi o coeficiente de eficiência. E este valor de 0,95 indica que a modelagem climática neste ponto da LT é melhor preditora da temperatura podendo ser assumido que, na falta de valores medidos seja utilizado os valores simulados pelo modelo.

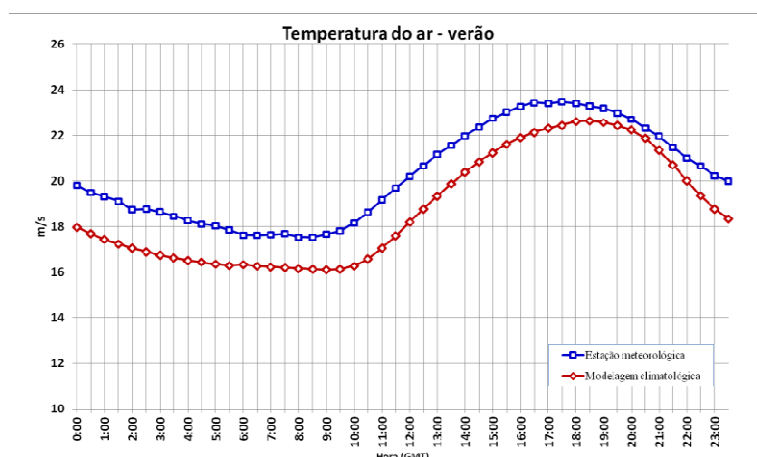


FIGURA 3 – Médias temporais da temperatura do ar para o verão de 2010 a 2013 medidas pela estação meteorológica e simuladas pela modelagem climática.

TABELA 6 – Índices estatísticos da temperatura do ar do verão de 2010 a 2013.

Verão	média	σ	B	EA	REQ	R σ	d	r	E
modelagem climática	18,1	2,4	-1,4	1,4	1,5	1,1	0,9	0,99	0,5
medido	19,9	2,1							

Para o inverno a variação da temperatura do ar ao longo do dia é da ordem de 5,3 °C, semelhante a variação registrada no verão (5,9 °C). Novamente, é possível notar que a modelagem climática subestima em toda a série temporal os valores medidos pela estação meteorológica (ver Figura 4). No entanto, mais uma vez fica evidente que o modelo captura o ciclo de aquecimento e resfriamento da atmosfera errando apenas em valores absolutos. E como já mencionado anteriormente, este erro pode ser removido ou atenuado através da remoção do *bias* frio associado a simulação. Por exemplo, a partir da remoção do *bias* da temperatura simulada para o inverno obteve-se índice de coeficiente de eficiência de 0,9, além dos valores de EA e REQ terem aumentado de -2,03 para 0,5 e 0,6, respectivamente.

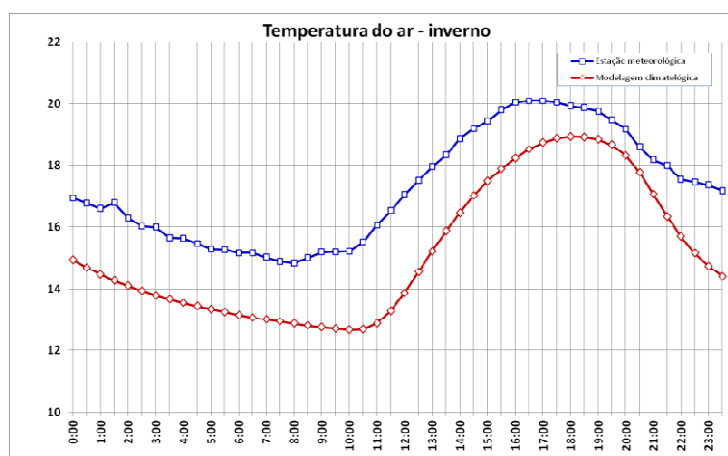


FIGURA 4 – Médias temporais da temperatura do ar para o inverno de 2010 a 2012 medidas pela estação meteorológica e simuladas pela modelagem climática.

TABELA 7 – Índices estatísticos da temperatura do ar do inverno de 2010 a 2012.

Inverno	média	σ	B	EA	REQ	R σ	d	r	E
Modelagem climática	14,5	2,2	-2,03	2,03	2,13	1,2	0,76	0,97	-0,4
Medido	17	1,8							

4.0 - CONCLUSÕES

Através da análise de índices estatísticos relativos e absolutos verificou-se que a modelagem climática obtida para este estudo apresenta habilidade em simular os valores medidos na escala temporal para os períodos analisados: inverno e verão. A variável temperatura do ar simulada a partir da técnica de downscaling apresentou um forte ajuste com os dados medidos indicando que as simulações estão bem correlacionadas com os dados da estação. Na comparação com a velocidade do vento notou-se que a modelagem climática subestima os valores de velocidade do vento medido para todos períodos, ressaltando o seu aspecto conservador. Os resultados mostraram claramente as vantagens da utilização da modelagem climática não somente pelo conservadorismo dos dados gerados, mas também pela aplicação imediata às análises de Linhas de Transmissão e Distribuição quando não estiverem disponíveis dados obtidos por monitoração adequado nos locais críticos das Linhas. Como seguimento recomenda-se a extensão da análise para outras regiões brasileiras de climatologia distinta.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PRADA, R. B., Recapacitação de Linhas de Transmissão. 2000. 103 f. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2000.
- [2] SILVA, et. al., Recapacitação de LTs de 138 kV – A experiência de FURNAS, GLT/012, In SPTEE, XVI, 2001. Campinas, São Paulo.
- [3] COSENTINO, A., et. al., Análise estatística da ampacidade sazonal da LT 525 kV Areia - Campos Novos, utilizando-se técnicas de downscaling de dados meteorológicos com apoio em mapeamento a laser. XIX SNPTEE. Rio de Janeiro, Outubro de 2007.
- [4] KOSMANN, C., COSENTINO, A., HOFFMANN J. N., Análise de projetos de linhas de transmissão sob a ótica da ampacidade estatística proposta na revisão da norma NBR 5422. XIII ERIAC. Porto Iguazú, 2009.
- [5] XUE, M., DROEGEMEIER, K. K., WONG, V., **2000**: The Advanced Regional Prediction System (ARPS) – A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I: Model dynamics and verification. Meteorol. Atmos. Phys., 75, 161-193.
- [6] XUE, M., DROEGEMEIER, K. K., WONG, V., SHAPIRO A., BREWSTER, K., CARR, F., WEBER, D., LIU, Y., WANG, D.-H., **2001**: The Advanced Regional Prediction System (ARPS) - A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part II: Model physics and applications. Meteorol. Atmos. Phys., 76, 143-165.
- [7] XUE, M., WANG, D.-H., GAO, J., BREWSTER, K., DROEGEMEIER, K. K., **2003**: The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation. Meteor. Atmos. Phys., 82, 139-170.
- [8] WEBER, A.; BUCKNER, M.; WEBER, J. Statistical Performance of Several Mesoscale Atmospheric Dispersion Models. Journal of Applied Meteorology, NOAA Central Library, Department of Commerce, v. 21, n. 11, p. 1633–1644, 1982.
- [9] SILVA, J. M., Simulação regional da variabilidade climática interanual no norte do Nordeste brasileiro. 2008. 69 f. Dissertação de Mestrado em Meteorologia – USP, São Paulo, 2008.