



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

BR/GOP/04
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - IX

GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP

**CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO DE LINHAS AÉREAS
CONSIDERANDO AS VARIAÇÕES SAZONAIS DO CLIMA**

João Ignácio da Silva Filho(*)
CEPEL

Ambrosio Melek
COPEL

RESUMO

A capacidade de transporte de linhas de transmissão de energia elétrica (LTs) é limitada pela temperatura dos cabos condutores que é determinada no projeto em função da ocorrência simultânea da corrente máxima e de parâmetros meteorológicos considerados críticos.

Na prática quando a temperatura do condutor for maior que a temperatura utilizada na locação das estruturas, a distância mínima de segurança cabo-solo será violada, colocando em risco a confiabilidade operacional da LT. Nesta situação a real capacidade de transporte é menor que a de projeto. O inverso acontece quando a temperatura do condutor for menor que a temperatura de projeto, ou seja, a capacidade de transporte é maior.

No que diz respeito ao meio ambiente, a temperatura do condutor depende das ações do vento, da temperatura do ar e da radiação solar na superfície do condutor. Como essas variáveis, em um dado local, mudam com a época do ano e o período do dia é provável que haja uma capacidade de transporte máxima diferenciada ao longo do ano.

Considerando que o clima é uma variável aleatória no tempo e no espaço, os especialistas brasileiros vêm envidando esforços no sentido de desenvolver uma metodologia para dimensionar o carregamento de LTs com base em técnicas estatísticas, que é conhecida como ampacidade estatística. Existem dois Grupos de Trabalhos tratando do assunto; um revisa a NBR5422 e o outro cuida de estabelecer as capacidades operativas sazonais das LTs do Sistema Interligado Nacional (SIN). Este último é uma Força Tarefa - Ampacidade Sazonal de Linhas - formada pelas empresas ABRATE, ONS, ELETROBRAS e CEPEL, com a incumbência de dar suporte ao ONS para atender a Resolução Normativa 191/2005 da ANEEL.

A grande dificuldade encontrada para a aplicação da ampacidade estatística é a carência de um banco de dados meteorológicos capaz de representar as variações temporais e espaciais do clima ao longo das rotas das LTs. A ONS realizou estudos que resultaram em um banco de dados gerados através de modelos numéricos de previsão de tempo e clima em pontos espaçados de 12 km em uma malha sobre o território nacional, por um período de 10 anos, de hora em hora. A FT Ampacidade Sazonal de Linhas comparou estes dados com dados medidos em estações meteorológicas e concluiu que os dados de temperatura do ar e de radiação solar atendem as necessidades da ampacidade estatística, o que não se pode dizer dos dados de velocidade e direção do vento.

No Informe Técnico estão apresentadas as atividades realizadas pela FT, que resultaram na proposta de metodologias de cálculo que consideram os dados de temperatura do ar e radiação solar gerados pelo modelo numérico usado pelo ONS e uma velocidade fixa do vento determinada em função da sazonalidade do clima. As metodologias são baseadas em conceitos estatísticos e admitem que a temperatura do condutor utilizada no projeto da LT seja excedida na operação em um dado período de tempo. Dependendo da época do ano e do período do dia, as novas capacidades sazonais aumentaram em aproximadamente 10% as atuais capacidades.

São sugeridas modificações em uma das metodologias para torná-la aplicável ao projeto de LTs novas com o objetivo de subsidiar as discussões na Comissão Técnica que revisa a NBR5422.

PALAVRAS-CHAVE

Linha de transmissão, capacidade de transporte sazonal, ampacidade estatística, dados meteorológicos

1.0 - INTRODUÇÃO

A capacidade máxima de transporte de uma linha de transmissão de energia elétrica é limitada pela temperatura de seus cabos condutores. A temperatura utilizada no projeto é calculada considerando a ocorrência simultânea da corrente máxima com uma condição meteorológica considerada crítica para a região. Com essa temperatura e a distância mínima de segurança cabo-solo especificada em norma técnica são definidas as localizações das estruturas ao longo da rota da LT.

Se na operação da LT ocorrer uma condição meteorológica pior que a considerada como crítica no projeto, a temperatura do condutor será maior que a prevista, resultando numa violação da distância mínima de segurança o que coloca em risco a confiabilidade operacional da LT. Nesta situação a real capacidade de transporte é menor que a do projeto. Quando as condições meteorológicas forem favoráveis, a temperatura do condutor será menor, possibilitando um aumento na capacidade de transporte. Com isto, conclui-se que a capacidade máxima real é dinâmica e varia com as condições climáticas. Na literatura existem diversos estudos que buscam definir métodos e critérios para explorar essa capacidade operacional, tais como, aprimoramento de estudo estatístico das condições climáticas ao longo da linha, controle das situações nas quais a temperatura de projeto é ultrapassada, medição em tempo real da temperatura do condutor etc.

Os estudos aqui apresentados seguem os conceitos de ampacidade estatística, em discussão no Brasil há alguns anos, que se baseiam em séries horárias de dados meteorológicos e riscos térmicos⁽¹⁾. Por definição o risco térmico é a probabilidade de que uma dada temperatura do condutor seja ultrapassada, ao considerar sua distribuição estatística. Nos estudos foi considerada somente a relação entre a temperatura do condutor e a sua distância cabo-solo, não tendo levado em conta a possível perda de resistência mecânica dos materiais quando o condutor é submetido a altas temperaturas.

A temperatura do condutor é calculada através de equações que expressam o equilíbrio térmico entre as quantidades de calor recebidas e cedidas pelo condutor, e depende da corrente elétrica, da ação do vento, da temperatura do ar e da radiação solar na superfície do cabo. Como o clima varia com as estações do ano e os períodos do dia, é possível estabelecer uma capacidade máxima para cada período sazonal. As diferenças entre as capacidades sazonais dependem da intensidade de variação do clima, que é influenciada pela localização da linha na região climática considerada.

A dificuldade para a aplicação da ampacidade estatística está na disponibilidade de bancos de dados meteorológicos medidos para representar as variações do clima ao longo da LT, em especial o vento. Existe no Brasil uma rede meteorológica com mais de 500 estações medindo o vento com os requisitos exigidos para o cálculo da ampacidade estatística. Entretanto, as estações nem sempre estão instaladas nas imediações das rotas de LTs e, frequentemente, se questiona o uso dos ventos nelas medidos no projeto e operação de sistemas de transmissão. Outra fonte de dados resulta da modelagem numérica de previsão do tempo e clima atrelado a técnica de *downscaling* para simular dados em pontos de uma grade sobreposta em uma área geográfica. A ONS e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) utilizando o modelo ARPS (*Advanced Regional Prediction System*) montaram um banco com dados espaçados numa malha com aproximadamente 12 km de lado cobrindo todo o território nacional. Os dados foram simulados em intervalos de uma hora ao longo de 10 anos⁽²⁾.

Atualmente existem no Brasil dois grupos de trabalhos que cuidam do desenvolvimento e aplicação de metodologias estatísticas para calcular as capacidades sazonais de LTs, que são: a Comissão Técnica do COBEI que revisa a norma NBR5422 – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica - e a Força Tarefa ABRATE, ONS, ELETROBRAS e CEPEL – Ampacidade Sazonal de Linhas. Esta última tem a incumbência de determinar valores de correntes sazonais para a operação das atuais linhas do SIN – Sistema Interligado Nacional -, que foram projetadas seguindo critérios determinísticos sem considerar a sazonalidade do clima. Considerando que vários especialistas participam dos dois grupos, está-se buscando uma metodologia que contemple tanto o projeto como a operação de LTs.

No IT estão descritas atividades executadas na FT Ampacidade Sazonal de Linhas que desenvolveram duas metodologias para determinar as capacidades sazonais das LTs. As metodologias têm como referência somente a temperatura de projeto; ou seja, não consideram em suas análises a distância vertical mínima de segurança que foi utilizada no projeto da LT. O foco atual da FT está na análise dos resultados encontrados, que estão sendo comparados com as recomendações da atual NBR5422⁽³⁾, para que se possa dar amparo legal aos novos carregamentos, que aumentaram em até 10% os atuais carregamentos. Os novos valores somente serão utilizados no ambiente da operação quando for confirmado o respaldo através da norma vigente ou da norma revisada.

Estão aqui, também, descritas sugestões de como aplicar os resultados dos estudos da FT Ampacidade Sazonal de Linhas no projeto de novas LTs, o que é deveras interessante para subsidiar os trabalhos da Comissão que revisa a NBR5422.

2.0 - CALCULO DA TEMPERATURA DO CONDUTOR

A temperatura superficial de cabo condutor é calculada em função de características físicas do condutor (resistência elétrica, material, bitola etc), da corrente elétrica e das condições meteorológicas, através de equações que expressam o equilíbrio térmico entre as quantidades de calor recebidas e cedidas pelo condutor. Desprezando efeitos de segunda ordem, a corrente elétrica e a radiação solar aquecem o condutor, enquanto que a convecção natural ou forçada pela ação do vento e a irradiação do material atuam no seu esfriamento. Na literatura existem diversas equações para o cálculo da temperatura do condutor em regime permanente. Na NBR5422 não há indicação de um método; a FT utilizou a metodologia apresentada pelo CIGRE ⁽⁴⁾, que está recomendada na Nota Técnica nº 038/2005–SRT/ANEEL.

Numa análise simplificada da influência dos dados meteorológicos na temperatura do condutor, pode-se dizer que as temperaturas do ar e do condutor variam na relação de 1:1, isto é, 1°C de variação na temperatura do ar corresponde a 1°C de variação na temperatura do condutor. Quanto à radiação solar, há uma variação de 18% na temperatura do condutor ao considerar as condições de sol a pino e sem sol. Já a influência do vento é bastante significativa e, portanto, recebe maior atenção na escolha do valor a ser usado nos cálculos. Na Figura 1a está apresentada a variação da temperatura do condutor com a velocidade do vento, mantendo os demais parâmetros constantes. Uma vez que tanto a direção da linha como a direção do vento pode variar ao longo da rota, é comum considerar nos cálculos a velocidade efetiva do vento, que vem a ser a velocidade do vento que atuando perpendicularmente ao cabo condutor resulta em uma mesma temperatura média do condutor para as condições reais de velocidade e direção do vento. Na Figura 1b, estão apresentadas a relação entre o vento real (velocidade e direção) com o vento equivalente (velocidade efetiva, com direção de 90 graus), tendo como base as velocidades efetivas de 0,61 m/s e 1,0 m/s. A magnitude da variação depende da corrente e das características do condutor, mas, grosso modo observa-se que um vento com 45 graus de direção tem uma velocidade real 45% maior que a velocidade efetiva.

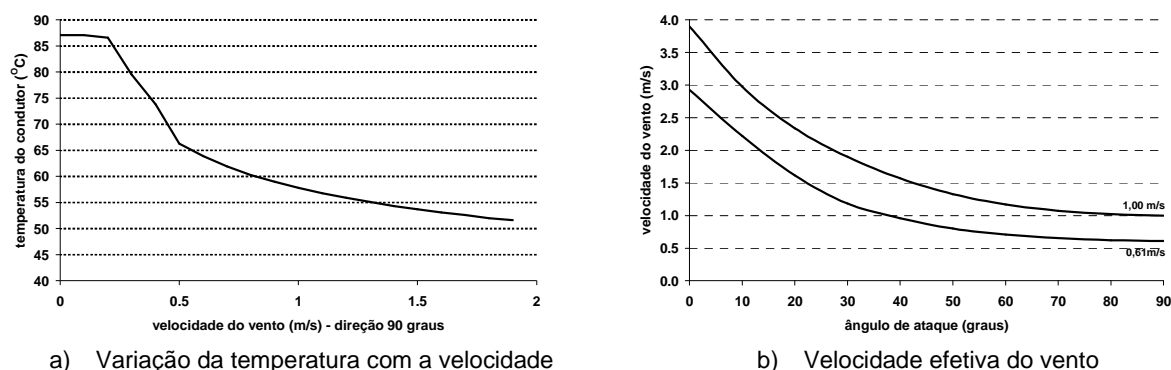


FIGURA 1 – Influência do vento na temperatura do condutor

3.0 - TEMPERATURA DE PROJETO PELA METODOLOGIA DETERMINÍSTICA DA NBR5422

Pela NBR5422 vigente, a temperatura de projeto é calculada, segundo uma metodologia dita determinística, que considera a ocorrência simultânea da corrente máxima e de condições meteorológicas supostamente críticas para a região da LT. É recomendado que os valores das variáveis meteorológicas sejam definidos através da análise de dados medidos ao longo da rota, ou em suas proximidades. Na falta de dados medidos ou de estudos específicos os seguintes valores devem ser adotados: velocidade do vento não superior a 1,0 m/s, temperatura do ar média das máximas diárias e radiação solar de 1000 W/m². Como a direção da LT varia ao longo de sua rota, é comum o uso de um vento com direção perpendicular ao cabo condutor.

Por razões de ordem prática e devido ao reduzido tempo para elaboração de estudos específicos, na sua grande maioria, as LTs vêm sendo projetadas considerando-se as condições de “falta de dados”. Anteriormente à aprovação da NBR5422 em 1985, os projetos consideravam a velocidade de 0,61 m/s. Devido a essas duas condições de velocidade do vento (0,61 m/s e 1,0 m/s), existem LTs implantadas em uma mesma região climática que para um mesmo tipo de condutor e temperatura de projeto têm capacidades de transportes diferentes umas das outras. Exemplificando, para uma temperatura de projeto de 60°C e cabo Grosbeak, as ampacidades de LTs na região climática de Belém são de 534 A e 613 A, para as velocidades de 0,61 m/s e 1,0 m/s, respectivamente. Na região climática de Florianópolis os valores são de 590 A e 673 A. Estas correntes serão usadas como referências para as discussões do Informe Técnico.

Ainda que as condições meteorológicas adotadas sejam consideradas críticas, existem situações em que o clima é mais desfavorável, resultando em temperaturas reais do condutor maiores que a de projeto. Por exemplo, para a condição de vento com velocidade zero, radiação solar de 1200 W/m², temperatura do ar de 40°C e corrente de 590 A têm-se a temperatura do condutor igual a 95°C; para a corrente de 673 A e com as mesmas condições meteorológicas, a temperatura será de 104°C, valores acima de 60°C utilizada no projeto. Chama-se aqui a

atenção para que a ocorrência simultânea destes dados meteorológicos utilizados no exemplo tem uma baixa probabilidade de acontecer, mas existem várias situações que levam a temperatura do condutor acima do valor utilizado no projeto. Nestas situações desfavoráveis, a distância mínima cabo-solo será violada. Apesar de esse assunto ser objeto de discussão em vários fóruns, não há um consenso de como tratá-lo na prática.

Na metodologia estatística em discussão na Comissão Técnica que revisa a NBR5422, a distância mínima de segurança cabo-solo é definida pelo somatório de várias distâncias onde uma delas é uma folga, denominada de parcela de segurança, onde a altura do condutor excursiona sem atingir o limite mínimo para que haja a disrupção elétrica. As temperaturas que levam as distâncias do condutor ao solo situarem-se nesta faixa de segurança são definidas pelo risco térmico.

4.0 - TEMPERATURA DE CABO CONDUTOR EM CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS REAIS

Na Figura 2 estão apresentadas as evoluções no tempo e os histogramas de frequências das temperaturas do cabo condutor Grosbeak calculadas com base nos dados horários medidos nas estações meteorológicas de Belém e Florianópolis, por um período de 3 anos. Os valores de correntes utilizadas estão identificados na figura e foram calculados no item 3.0. Na figura observa-se que a temperatura de projeto (60°C) foi excedida num grande número vezes, parte hachurada dos histogramas de frequências, ou seja, os riscos térmicos existem e são diferentes para cada massa de dados medidos. Nos gráficos com as séries temporais das temperaturas do condutor, observa-se claramente que há uma sazonalidade bem definida em Florianópolis, o que não ocorre em Belém.

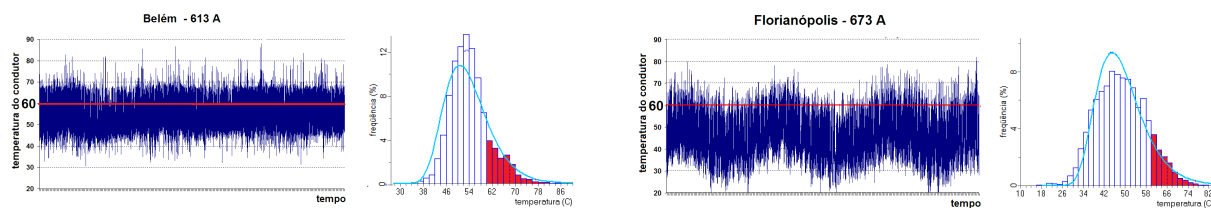


FIGURA 2 – Temperatura do condutor para as condições meteorológicas reais

A metodologia de ampacidade estatística ⁽¹⁾ tem como objetivo calcular as capacidades de LT através de riscos térmicos preestabelecidos e das condições meteorológicas sazonais da região de implantação do empreendimento. Com isto todas as LTs passam a ter a mesma confiabilidade operacional.

5.0 - DADOS METEOROLÓGICOS PARA APLICAÇÃO DE METODOLOGIA ESTATÍSTICA

Na falta de um banco com dados meteorológicos medidos em um grande número de localidades, a alternativa de utilizar dados gerados por um modelo numérico de previsão de tempo em uma malha densa é muito atraente. Uma das atividades da FT Ampacidade Sazonal de Linhas foi confrontar os dados de velocidade e direção do vento, temperatura do ar e radiação solar, gerados pelo modelo ARPS, disponibilizados pelo ONS com os dados medidos em 70 estações meteorológicas pertencentes ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), SIMEPAR (Instituto Tecnológico do Paraná) e FURNAS, localizadas nas regiões sul, sudeste e nordeste. Foram comparados os histogramas de frequências e as médias em cada hora do dia dessas variáveis meteorológicas. A variação da média de cada variável ao longo das horas do dia é aqui denominada de dia típico ou dia médio.

Na Figura 3 estão exemplificados dias típicos de dados medidos e simulados em uma mesma localidade. De uma forma geral o comportamento dos dias típicos em todos os locais com dados medidos e simulados foi semelhante ao desta figura, podendo-se concluir o que segue. Para a velocidade do vento, os dados gerados pelo ARPS são na maioria das vezes maiores que os medidos e não reproduzem a variação do vento a cada hora ao longo do dia. Nos dados medidos as velocidades do período noturno são menores que as do diurno, o que não ocorre nos dados gerados (Figura 3a). Pelos histogramas de frequências verificou-se que há uma tendência das velocidades simuladas serem maiores que as medidas. Sendo assim, para fins de estudos de ampacidade, os dados de velocidade do vento gerados pelo ARPS não representam de forma adequada os dados medidos.

Quanto à temperatura do ar verificou-se que em termos qualitativos o comportamento ao longo do dia dos dados medidos e simulados apresenta similaridades suficientes para os estudos de ampacidade (Figura 3b). Nos histogramas de frequências observou-se que nos dados medidos o número de valores próximos dos extremos é maior nos dados medidos quando comparado com os dados simulados, ou seja, os dados do modelo são mais concentrados em torno da média. Os dias médios (Figura 3c) e as distribuições estatísticas da radiação solar indicam que os dados do modelo são maiores que os dados medidos nas estações, o que está a favor da segurança para fins de cálculo da ampacidade.

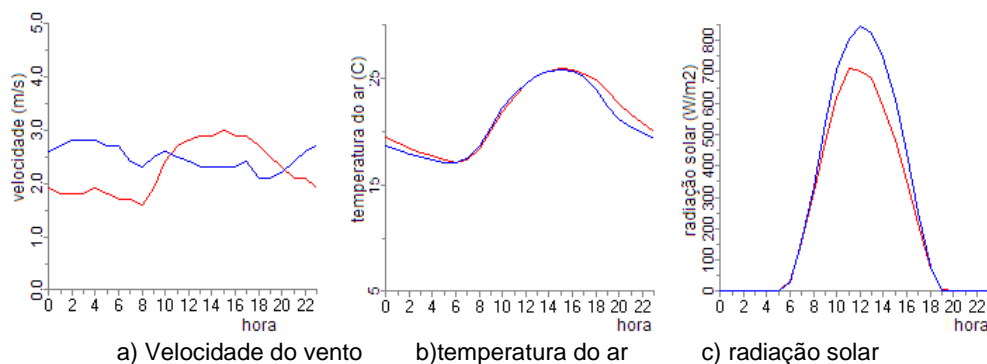


FIGURA 3 – Variação típica da velocidade do vento, temperatura do ar e radiação solar ao longo do dia
cor vermelha – dados medidos, cor azul – dados simulados

Frente aos resultados encontrados no confronto, tomou-se a decisão de utilizar os dados de temperatura do ar e radiação solar gerados pelo ARPS, e desenvolver metodologias para simularem a velocidade e direção do vento.

Nas Tabelas 1 e 2 encontram-se estatísticas das velocidades médias de 10 minutos medidas a cada hora por um período de 3 anos, em 369 estações do INMET, para as sazonalidades verão-dia (VD), verão-noite (VN), inverno-dia (ID) e inverno-noite (IN), períodos do ano estão definidas no item 6.0. Para fins de uma análise global, neste IT as estações estão agrupadas por região geopolítica, entretanto numa aplicação específica as estações devem ser agrupadas de acordo com as características climáticas da região da LT.

Na Tabela 1 estão apresentadas as velocidades associadas às probabilidades de ocorrências acumuladas no tempo. Exemplificando, a probabilidade de 5% indica o percentual do tempo com velocidades menores que o valor indicado na tabela, ou seja, está-se identificando o tempo de duração das velocidades baixas. Os dados apresentados na Tabela 1 indicam que as baixas velocidades nas regiões sul e nordeste têm magnitudes maiores que as das demais regiões.

Tabela 1 – Média, em cada região, das baixas velocidades (m/s) e percentual de tempo de duração

região	verão dia (VD)			verão Noite (VN)			inverno dia (ID)			inverno noite (IN)		
	3%	5%	10%	3%	5%	10%	3%	5%	10%	3%	5%	10%
sul	0,64	0,86	1,25	0,41	0,59	0,93	0,55	0,75	1,13	0,45	0,63	0,95
sudeste	0,39	0,55	0,87	0,18	0,25	0,43	0,37	0,52	0,83	0,21	0,28	0,47
centro oeste	0,39	0,56	0,87	0,17	0,23	0,38	0,40	0,57	0,91	0,23	0,32	0,51
nordeste	0,78	0,99	1,38	0,35	0,46	0,68	0,69	0,88	1,27	0,31	0,41	0,60
norte	0,34	0,45	0,67	0,17	0,20	0,28	0,33	0,44	0,67	0,17	0,20	0,27

As relações entre as menores velocidades do VD com as menores velocidades dos demais períodos sazonais encontram-se na Tabela 2. Os valores reafirmam a existência de diferenças marcantes entre os tempos de duração dos ventos com baixas velocidades ao considerar os períodos diurnos e noturnos. Quanto à época do ano, as diferenças entre o verão e o inverno são menos acentuadas, sendo a maior na região sul.

Tabela 2 – Relação entre a velocidade do VD com as demais sazonalidades (%)

região	quantidade estações	s%			5%			10%		
		VN	ID	IN	VN	ID	IN	VN	ID	IN
sul	68	0,64	0,87	0,70	0,64	0,89	0,69	0,69	0,90	0,71
sudeste	91	0,50	0,95	0,58	0,45	0,93	0,50	0,47	0,94	0,51
centro oeste	60	0,46	1,03	0,57	0,39	1,03	0,52	0,40	1,05	0,52
nordeste	107	0,45	0,96	0,42	0,44	0,95	0,41	0,45	0,97	0,42
norte	43	0,56	0,99	0,56	0,44	0,97	0,44	0,39	1,00	0,36

6.0 - METODOLOGIAS DESENVOLVIDAS NA FT AMPACIDADE SAZONAL DE LINHAS

Com base nos dados meteorológicos medidos e simulados, foram estudadas e aplicadas diversas metodologias para cálculo da capacidade sazonal, tendo-se convergido para duas delas. Ambas fazem uso das séries de dados horárias da temperatura do ar e da radiação solar simuladas para o período de 10 anos pelo modelo ARPS. Quanto ao vento, na metodologia denominada de “aplicação de fatores na velocidade do vento” o mesmo é determinado pela própria metodologia; enquanto que na metodologia “aplicação da velocidade de vento medida” usam-se dados de ventos medidos em estações meteorológicas situadas nas proximidades da rota da linha. As metodologias foram desenvolvidas considerando as LTs do SIN e os dados meteorológicos disponíveis; simulados e medidos.

No IT será apresentada somente a metodologia “aplicação de fatores na velocidade do vento”, pois a mesma requer um número menor de dados meteorológicos medidos, o que vem de encontro a um dos objetivos do IT que é apresentar uma metodologia que possa servir de base para a revisão da NBR5422. Esta metodologia com algumas modificações pode ser utilizada, também, para o projeto de uma nova LT.

Para representar a sazonalidade do clima, as séries horárias são divididas considerando os meses mais quentes e mais frios e os horários diurnos e noturnos. Os meses mais quentes, denominados de verão, correspondem ao período de outubro a março; e os mais frios, denominados de inverno, abrangem os meses de abril a setembro. Considera-se diurno o período entre 6h e 17h59min e noturno entre 18h e 5h59min, referidos ao horário local. Com isto têm-se os períodos VD (verão dia), VN (verão noite), ID (inverno dia) e IN (inverno noite).

6.1 Aplicação de fatores na velocidade do vento

A idéia básica da metodologia consiste em determinar qual é a velocidade constante efetiva do vento, que ocorrendo simultaneamente com os dados horários de temperatura do ar e da radiação solar, durante o período de 10 anos, resulta em um risco térmico de 10% para a temperatura de projeto da LT e a corrente sazonal. A metodologia é um processo iterativo, com solução numérica por aproximações sucessivas e diferenciadas por período sazonal, iniciando-se pelo VD.

O primeiro passo consiste em determinar a velocidade efetiva constante do vento no período de 10 anos para o VD (Vvd) considerando a corrente nominal da LT, a temperatura de projeto e o risco térmico de 10%. Para cada um dos demais períodos sazonais, a velocidade efetiva constante do vento é determinada multiplicando a Vvd por um fator menor ou igual a 1. Com essa velocidade calculada e os dados horários da temperatura do ar e da radiação solar simulados pelo ARPS para o período sazonal, determina-se a corrente sazonal que associa a temperatura de projeto ao risco térmico de 10%. Os fatores a serem aplicados na Vvd devem considerar as variações sazonais e podem ser estabelecidos com base nos dados da Tabela 2.

Na FT Ampacidade Sazonal de Linhas foram adotadas algumas premissas. A corrente nominal é a estabelecida no CPST (Contrato de Prestação de Serviços de Transmissão) e foi tomada como sendo a corrente do VD. A velocidade efetiva não pode ser maior que a velocidade utilizada no projeto da LT; se isto ocorrer será utilizada a velocidade de projeto. Neste caso, para a corrente do CPST o risco térmico é maior que 10%. Para obter o risco de 10% a corrente deveria ser reduzida. Entretanto, ficou acordado que, até que o CPST seja revisado, em qualquer período sazonal a corrente deve ser no mínimo igual ao valor contratual. Os fatores devem considerar a variação temporal do vento na região da LT, e definidos pela empresa proprietária da LT. Como valores iniciais foram utilizados 0,9 para o ID e de 0,6 para os dois períodos noturnos. Devido às características do clima da região de algumas LTs e os valores das velocidades determinísticas adotadas no projeto, esses valores foram modificados, adequando-os às condições de projeto da LT e aos valores apresentados na Tabela 2. Em muitos casos os valores iniciais foram modificados para 0,6 e 0,4, respectivamente.

A metodologia acima se aplica a LT existente, pois parte do princípio que a corrente nominal e a temperatura de projeto já foram calculadas anteriormente. Para uma nova LT onde se conhece apenas a corrente nominal, a metodologia pode ser adaptada para calcular a temperatura de projeto adotando uma velocidade efetiva do vento, que pode ser estimada com base nos dados da Tabela 1. Sugere-se como tempo de duração os percentuais de 3% e 5%. Uma vez que é possível estabelecer a velocidade efetiva para cada período, não há necessidade de aplicar os fatores na Vvd. Inicialmente se calcula a temperatura do condutor para o risco térmico de 10% em cada período sazonal; a maior delas será a temperatura de projeto. Para os períodos que tiveram as temperaturas menores, recalcula-se a corrente sazonal utilizando a temperatura de projeto, o risco térmico de 10% e a velocidade efetiva do período.

6.2 Aplicação da metodologia ao longo da rota

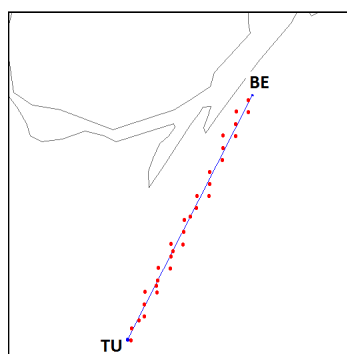


FIGURA 4 – Pontos da grade do ARPS ao longo da rota Belém-Tucuruí

Devido ao grande comprimento de uma LT, é bastante provável que existam variações climáticas ao longo de sua rota significativas para o cálculo da temperatura do condutor. Por isso, a metodologia deve ser aplicada a todos os pontos de sua rota que disponham de dados meteorológicos. A capacidade de transporte da linha é a menor entre as calculadas para todos os pontos.

Como os dados do ARPS foram modelados em uma malha onde as quadriculas têm, aproximadamente, 12 km de lado, a metodologia deve ser aplicada aos pontos que formam os vértices das quadriculas atravessadas pela linha. Por exemplo, uma LT entre Belém e Tucuruí é dimensionada considerando 31 pontos com dados meteorológicos, conforme apresentado na Figura 4.

7.0 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para exemplificar a aplicação da metodologia serão estudadas duas LTs hipotéticas. A LT Florianópolis-Campos Novos (FL-CN) com as correntes de 590 A e 673 A e a LT Belém-Tucuruí (BE-TU) com as correntes de 534 A e 613 A. Serão considerados 26 pontos com dados meteorológicos ao longo dos 270 km da rota da LT FL-CN e 31 pontos ao longo dos 300 km da rota da LT BE-TU. A título de informação, existem 9 estações meteorológicas a uma distância de até 100km da rota da LT FL-CN, e 6 estações na rota da LT BE-TU.

Nos exemplos serão abordados os casos de LT existente e de LT nova.

7.1 LT existente

Neste caso está-se admitindo que a LT foi projetada utilizando dados meteorológicos determinísticos e que as correntes nominais e as temperaturas de projeto são conhecidas. Os estudos cuidarão de determinar as capacidades sazonais e de verificar se na “falta de dados” as velocidades do vento utilizadas nos cálculos das ampacidades determinísticas estão de acordo com as reais velocidades medidas nas estações meteorológicas.

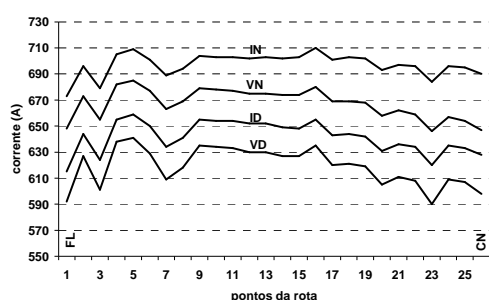


Figura 5 – Correntes sazonais nos pontos da rota da LT Florianópolis-Campos Novos 590 A

Os resultados para cada um dos 26 pontos da rota a LT FL-CN 590 A estão apresentados nos gráficos da Figura 5, onde se observa claramente que as correntes máximas sazonais variam com o clima de cada ponto. Por exemplo, no VD nos pontos 1 e 23 a corrente é 590 A, enquanto que no ponto 5 é 641 A, ou seja, as diferenças das condições climáticas nestes pontos implicam em uma variação de 9% na capacidade da LT. Na metodologia a capacidade máxima da LT é definida pelo ponto com menor corrente

Com base nos valores da Tabela 2, nos cálculos da LT FL-CN foram utilizados os fatores de redução da velocidade do vento de 0,9 para o ID e de 0,6 para os períodos noturnos; na LT BE-TU os fatores foram de 1,0 e 0,55.

Os resultados dos estudos das duas LTs estão apresentados na Tabela 3, onde se observa que há uma variação nas correntes, principalmente entre os períodos diurnos e noturnos. Na LT BE-TU a época do ano não influi na corrente, pois foi utilizada a mesma velocidade para o verão e o inverno e as variações sazonais da temperatura do ar e da radiação solar não são significativas.

Chama a atenção os valores de velocidades efetivas encontradas, que são menores que as velocidades de 0,61 m/s e 1,0 m/s utilizadas na ampacidade determinística. Entretanto, ao comparar as essas velocidades efetivas com o tempo de duração da Tabela 1, verifica-se que para LT BE-TU 613 A o percentual é da ordem de 10%, o que pode ser um indicativo de que essa corrente está elevada para a temperatura de projeto de 60°C. Não se tem um consenso do tempo de duração a ser adotado, mas os resultados indicam que o valor deve estar entre 3% e 5%.

Tabela 3 – Aplicação da “metodologia dos fatores na velocidade do vento” em LTs existente

LT	corrente (A)				corrente (pu)				velocidade efetiva do vento (m/s)			
	VD	VN	ID	IN	VD	VN	ID	IN	VD	VN	ID	IN
FL-CN	590	646	615	673	1,00	1,09	1,04	1,14	0,51	0,31	0,46	0,31
FL-CN	673	697	737	729	1,00	1,04	1,10	1,08	0,86	0,52	0,77	0,52
BE-TU	534	575	536	580	1,00	1,08	1,00	1,09	0,47	0,26	0,47	0,26
BE-TU	613	633	613	638	1,00	1,03	1,00	1,04	0,68	0,37	0,68	0,37

7.2 LT nova

Para uma LT nova, a metodologia é aplicada em duas etapas:

- com a corrente nominal da LT, o risco térmico, as velocidades efetivas do vento e os 10 anos de dados horários da temperatura do ar e da radiação solar simuladas pelo modelo numérico nos pontos ao longo da rota calcula-se as temperaturas do condutor em cada um dos períodos sazonais. A maior temperatura calculada vem a ser a temperatura nominal da LT.
- com a temperatura nominal, o risco térmico e os dados meteorológicos calcula-se as correntes para os demais períodos sazonais.

Para exemplificar a aplicação da metodologia para uma LT nova, foram calculadas a temperatura de projeto e as correntes sazonais das LTs hipotéticas. Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 4 e foram obtidos considerando um risco térmico de 10% e as velocidades efetivas do vento com o tempo de duração de 3% (Tabela 1). Ressalta-se aqui que esses valores de risco térmico e tempo de duração são meramente ilustrativos para a aplicação da metodologia; os valores definitivos devem ser estabelecidos pelos participantes dos grupos que estão estudando a ampacidade estatística no Brasil.

Tabela 4 – Aplicação da “metodologia dos fatores na velocidade do vento” em LTs novas

LT	velocidade efetiva do vento (m/s)				Temperatura nominal (°C)	corrente (A)				corrente (pu)			
	VD	VN	ID	IN		VD	VN	ID	IN	VD	VN	ID	IN
FL-CN	0,60	0,40	0,50	0,40	58,2	590	657	657	688	1,00	1,11	1,11	1,17
FL-CN	0,60	0,40	0,50	0,40	64,8	673	714	726	743	1,00	1,06	1,08	1,10
BE-TU	0,35	0,20	0,35	0,20	65,3	534	627	536	631	1,00	1,17	1,00	1,18
BE-TU	0,35	0,20	0,35	0,20	72,9	613	674	620	678	1,00	1,10	1,01	1,11

As temperaturas nominais apresentadas na coluna 6 da Tabela 4 permitem questionar o uso das velocidades de 0,61 m/s e 1,0 m/s, sem estudos prévios, ou seja, “na falta de dados”, para o cálculo da temperatura de projeto na metodologia determinística, que para as correntes do VD é de 60°C. Esta constatação é válida para o risco térmico e o tempo de duração adotados; todavia, a mesma está de acordo com os gráficos da Figura 2 onde se vê que a temperatura de 60°C foi ultrapassada diversas vezes. Quanto à sazonalidade, valem os mesmos comentários anteriores, ou seja, mais acentuada com o período do dia e praticamente inexistente na região norte com a época do ano.

8.0 - CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO

A temperatura do cabo condutor calculada pelos atuais procedimentos determinísticos será ultrapassada todas as vezes em que ocorrerem condições meteorológicas mais críticas que as usadas no cálculo. A metodologia de ampacidade estatística tem como meta definir critérios para estabelecer o período de tempo em que a temperatura do condutor é maior que a temperatura usada na locação dos suportes da LT. A dificuldade para aplicar a ampacidade estatística é a falta de dados meteorológicos medidos em um grande número de pontos por longo período de tempo, suficiente para caracterizar o clima ao longo da rota. Os dados de temperatura do ar e de radiação solar gerados pelo modelo ARPS quando comparados com dados medidos em estações meteorológicas têm precisão suficientemente para a aplicação da ampacidade estatística. O mesmo não se pode dizer dos dados de vento. Os dados horários de velocidade do vento medidos nas estações meteorológicas indicam que, na maioria dos locais, o tempo de duração com baixas velocidades é maior no período noturno. Quanto à época do ano constatou-se uma pequena diferença entre os meses aqui denominados de verão e inverno, sendo a diferença mais acentuada na região sul. Nos estudos os dados de velocidade do vento foram agrupados por região geográfica, entretanto melhor seria agrupá-los por região climática para futuras aplicações. No IT foram analisadas apenas as baixas velocidades medidas em 369 estações do INMET, sendo importante para conclusões mais robustas analisar os dados de estações de outras empresas.

A capacidade de transporte da LT varia em função das características climáticas da época do ano e do período do dia, o que possibilita definir uma ampacidade sazonal para a LT. Para definir as capacidades sazonais das LTs do SIN foi criada uma Força Tarefa que desenvolveu duas metodologias com enfoques estatísticos que fazem uso de dados meteorológicos gerados pelo modelo numérico de previsão de tempo - ARPS – e medidos em estações meteorológicas. Para um grande número de LTs das regiões sul e sudeste, as aplicações das metodologias resultaram num aumento da capacidade de transporte para os períodos de VN, ID e IN em relação aos valores do CPST. Para as LTs das regiões norte e nordeste as diferenças entre as correntes do verão e do inverno foram pequenas, sendo mais significativas entre os períodos noturnos e diurnos. Todavia, a adoção destes novos valores pela operação depende de um respaldo da NBR5422.

A metodologia de ampacidade estatística aqui denominada de “aplicação de fatores na velocidade do vento” pode ser modificada para o projeto de LTs novas, tornando-a factível para uso na NBR5422.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Comissão Técnica do COBEI para revisão da NBR5422, Draft 13 – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica, 2012.
- (2) Cosentino, A.; Haas, R.; Colle, S.; Kosmann, C. Análise estatística da ampacidade sazonal da It 525kv Areia - Campos Novos, utilizando-se técnica de downscaling de dados meteorológicos, com apoio em mapeamento a laser. XIX SNPTTE. 2007 - Rio de Janeiro - GLT24.
- (3) Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5422– Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica, 1985.
- (4) The Thermal Behaviour of Overhead Conductors”, WG 22.12, Electra No. 144 October 1992;

AGRADECIMENTO:

Os autores ressaltam que as metodologias que serviram de base para as discussões apresentadas no Informe Técnico são frutos das atividades da Força Tarefa ABRATE, ONS, ELETROBRAS e CEPEL – Ampacidade Sazonal de Linhas – e expressam seus agradecimentos aos colegas que compõem essa FT, aos quais atribuem os méritos do IT.