



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

CB/GOP/21

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO – IX

GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP

CAPACIDADE OPERATIVA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO: LIMITE REAL X LIMITE CONTRATUAL

Glaucio André Primo (*)
COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO

Teófilo Yutaka Taguti
COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO

Rafael Martins
COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO

RESUMO

Com o objetivo de obter os valores de capacidade operativa mais próxima da realidade, a COPEL, utilizando dados ambientais das estações meteorológicas do SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná), realizou estudo com suas linhas de transmissão, com o objetivo de conhecer a capacidade dinâmica dessas LTs e avaliar eventual superação dos valores de corrente contratados (CPST). Os resultados deste trabalho mostram que algumas linhas de transmissão tiveram suas capacidades contratadas superadas, ao compará-las com os valores calculados, utilizando dados ambientais reais medidos próximos das linhas de transmissão, embora não tenham ocorrido violações de alturas de segurança em razão dos carregamentos ocorridos estarem abaixo destes valores.

PALAVRAS-CHAVE

Ampacidade, Linha de Transmissão, Capacidade Operativa de Linhas de Transmissão

1.0 - INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão (LT) são ativos do sistema elétrico de potência (SEP) inseridos em ambientes não controlados (condições ambientais variáveis, travessias de rodovias, zonas rurais e urbanas), sujeitas a limitações de capacidade de transmissão de corrente (ampacidade). As linhas de transmissão da rede básica de operação, com tensão igual ou superior a 230 kV, tem seus limites operativos assumidos por contrato de prestação de serviços de transmissão (CPST), firmado entre o Agente de Transmissão e o Operador Nacional do Sistema (ONS), cujo valor é fixo, independente das condições ambientais. As linhas de transmissão são projetadas para operar a temperaturas que, por segurança, não podem ser superadas, de forma a respeitar as distâncias mínimas entre o cabo condutor e o solo ou obstáculo. Atualmente não há monitoração da temperatura do condutor ou das condições ambientais ao longo da LT, não evidenciando seus limites reais.

No desenvolvimento do projeto executivo [1] e na determinação das capacidades sazonais [3] das linhas de transmissão, utiliza-se a metodologia determinística e dados estatísticos e históricos de condições ambientais do local onde está inserida. Na realidade da operação do sistema, existem períodos em que há desvios significativos entre os dados históricos e reais, podendo incorrer em limites de capacidades operativas reais abaixo das contratadas.

O grande desafio para o cálculo da ampacidade de linhas de transmissão é determinar as condições ambientais representativas da região onde encontra-se inserida. Embora o projeto da linha esteja aderente às normas técnicas, existe um risco associado à possibilidade de, em condições climáticas desfavoráveis e carregamentos elevados,

(*) Rua Padre Agostinho, n° 2600 – CEP 80.710-000, Curitiba, Paraná, – Brasil
Tel: (+55 41) 3234-7061 – Fax: (+55 41) 3234-7061 – Email: glaucio.primo@copel.com

ocorrer violação das distâncias de segurança e riscos a terceiros.

Com o objetivo de obter os valores de capacidade operativa mais próximos da realidade, a COPEL, utilizando dados ambientais das estações meteorológicas do SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná) [4], discretizados de 15 em 15 minutos, realizou estudo com a LT 230 kV Cascavel – Salto Osório a fim de conhecer a capacidade dinâmica dessa LT e avaliar eventual superação dos valores de corrente contratados, com atenção no período de verão, quando as condições climáticas são desfavoráveis para ampacidade.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

2.1 Ampacidade

Ampacidade é o termo que define a capacidade de transporte de corrente (ampere) de uma linha de transmissão de energia elétrica considerando as características físicas do material do cabo e as condições ambientais.

A equação determinística para o cálculo da ampacidade é baseada na equação clássica de equilíbrio térmico, ou seja, todo calor recebido é igual ao calor perdido:

$$Q_j + Q_s = P_c + P_r$$

Onde,

Q_j : ganho de calor por efeito Joule (W/m);

Q_s : ganho de calor por efeito da incidência da radiação solar nos condutores (W/m);

P_c : Perda de calor por convecção (W/m);

P_r : perda de calor por radiação (W/m).

Os parâmetros ambientais variáveis que influenciam no cálculo da ampacidade são a temperatura ambiente, a velocidade e ângulo de incidência do vento, e a radiação solar.

A temperatura ambiente e a velocidade de vento são os parâmetros mais significativos no cálculo da temperatura do cabo condutor, com destaque para a velocidade de vento na dissipação do calor do cabo condutor. A figura 1 mostra esta característica.

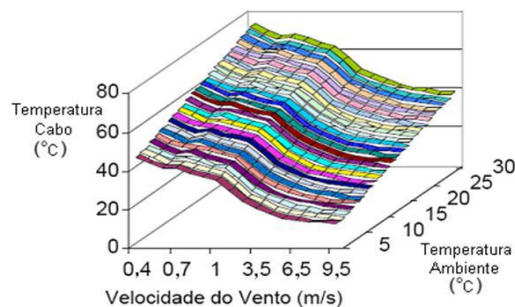


FIGURA 1 - Temperatura do cabo condutor X temperatura ambiente+velocidade de vento

2.2 Projeto Da Linha De Transmissão

Os editais de leilão de empreendimentos que envolvem a construção de linhas de transmissão determinam que as linhas devem ser projetadas de acordo com as prescrições da Norma Técnica NBR 5422, da ABNT, de forma a preservar, em sua operação, as distâncias de segurança nela estabelecidas. Devem ser previstas as capacidades de longa e de curta duração na linha de transmissão e a ocorrência simultânea das seguintes condições climáticas [1]:

- Temperatura máxima média da região.
- Radiação solar máxima da região.
- Brisa mínima prevista para a região, desde que não superior a 1 m/s.

Adicionalmente, os editais de leilão de LT determinam que em condições climáticas comprovadamente mais favoráveis do que as estabelecidas como base do projeto, de forma a aproveitar a sazonalidade, a linha de transmissão pode ser solicitada a operar com carregamento superior à capacidade de longa ou curta duração, desde que as distâncias de segurança sejam respeitadas [2].

Utilizando-se a equação de equilíbrio térmico do condutor da linha e com as necessidades de transmissão aplicáveis ao caso, determina-se as temperaturas de projeto de longa (T1) e de curta duração (T2), conforme ilustrado na figura 2.

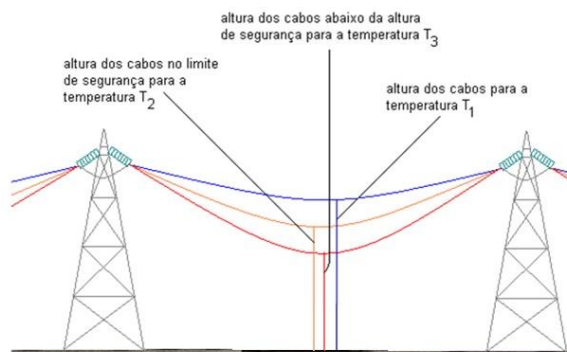


FIGURA 2 - Distâncias De Segurança De Linhas De Transmissão

Para conhecimento dos riscos na operação da LT são levantadas informações relacionadas às condições ambientais ao longo do seu traçado que influenciam a ampacidade.

2.3 Dados Ambientais Do Estado Do Paraná

A seguir são apresentadas estatísticas ambientais obtidas junto ao SIMEPAR (figuras 3 a 10), de forma a subsidiar avaliação dos eventuais riscos na operação das linhas de transmissão existentes no estado do Paraná.

2.3.1 Temperatura Ambiente (análise estatística, fonte IAPAR e SIMEPAR – 1989 A 2003 [4])

a) Temperatura máxima média anual e mês de janeiro

Existe desvio médio histórico na temperatura ambiente de aproximadamente 3°C entre as temperaturas máximas médias anuais (figura 3) e a máxima média do mês de janeiro (figura 4).

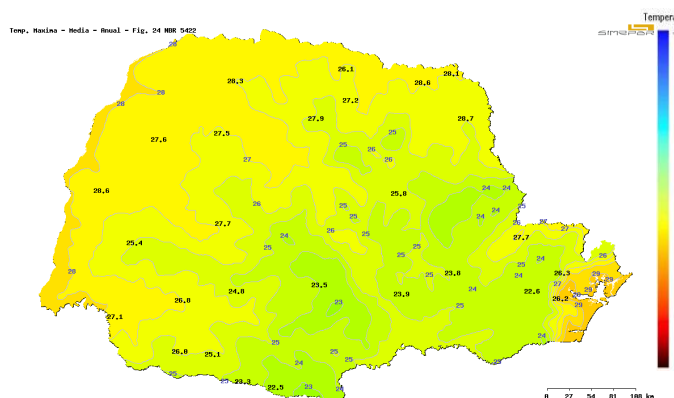


FIGURA 3 - Temperatura máxima média anual

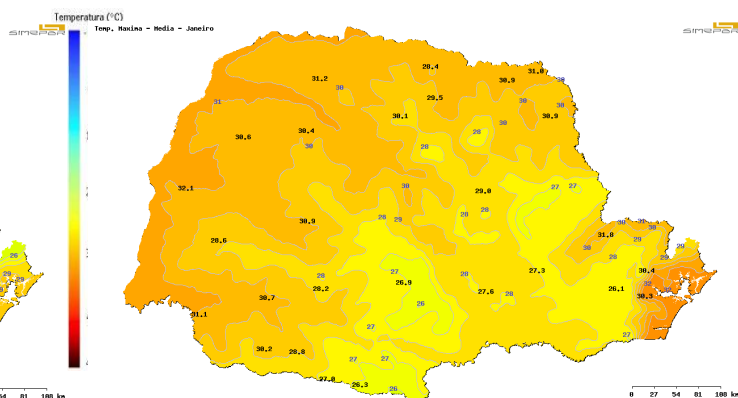


FIGURA 4 - Temperatura máxima média mês de janeiro (verão)

2.3.2 Número De Dias/Ano Médio Com Temperatura Ambiente Máxima (análise estatística fonte IAPAR e SIMEPAR - 1989 a 2003 [4])

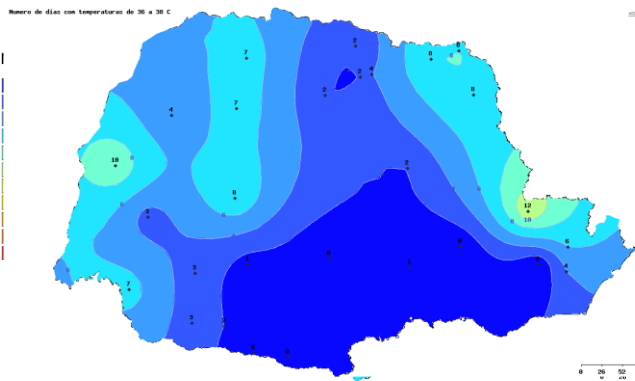


FIGURA 5 - Número de dias com temperaturas entre 32 e 34°C

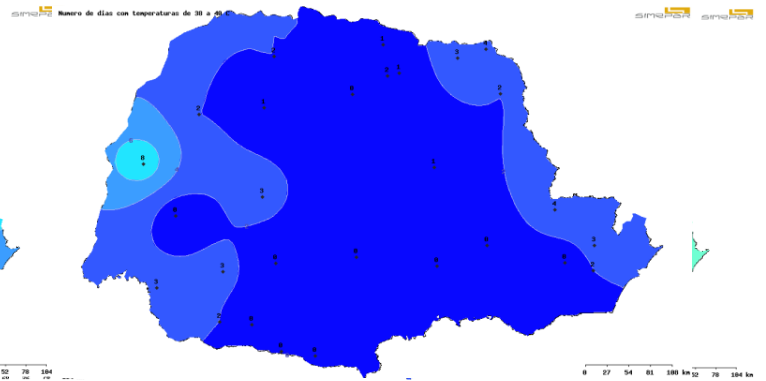


FIGURA 6 - Número de dias com temperaturas entre 34 e 36°C

As figuras 5 a 8 mostram que existe concentração significativa de dias com temperatura acima de 32°C no estado do Paraná. Na região de Guaíra e Palotina, noroeste do estado, em 52 dias/dia/ano, em média, há ocorrências de temperaturas acima de 32°C, sugerindo que nos meses de verão tenhamos dias ou semanas consecutivas com temperaturas elevadas.

2.3.3 Radiação Solar Média Máxima [4]

A radiação solar média máxima nos meses de janeiro e fevereiro situam-se em torno de 1000 W/m², o que está aderente aos dados de projeto (figuras 9 e 10).

FIGURA 7 - Número de dias com temperaturas entre 36 e 38°C

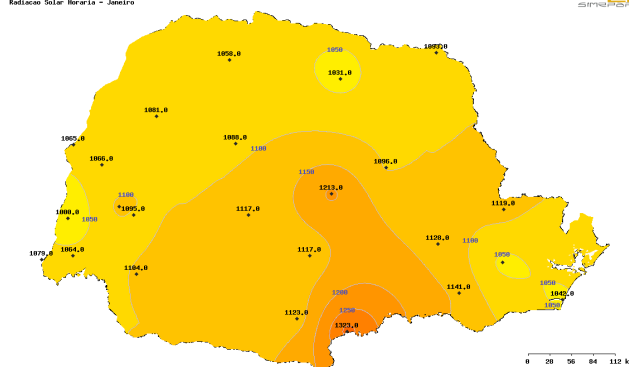


FIGURA 9 - Radiação média máxima em janeiro [W/m²]

FIGURA 8 - Número de dias com temperaturas entre 38 e 40°C

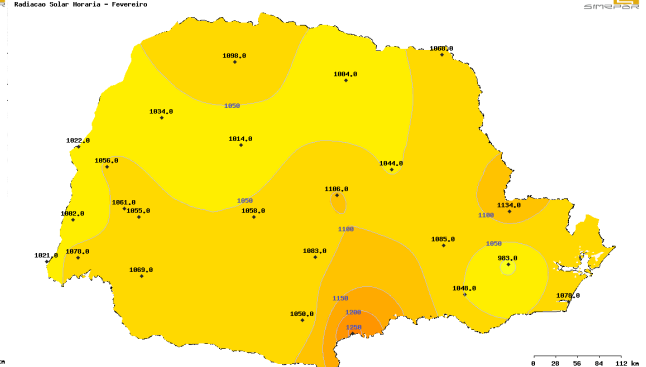


FIGURA 10 - Radiação média máxima mês de fevereiro [W/m²]

2.4 Estudo De Caso

Em fevereiro de 2012, em especial na segunda semana, ocorreram temperaturas elevadas e, associado a este fato, também verificaram-se cargas elevadas na região Sul. Destaca-se que os picos de cargas no verão ocorrem durante o dia, que corresponde ao período menos favorável sob o ponto de vista de ampacidade. Foram feitas avaliações, com base no levantamento dos dados ambientais ocorridos no dia 08 de fevereiro, com a finalidade de verificar eventuais violações de capacidades operativas reais das linhas de transmissão da rede básica.

2.4.1 Parâmetros Ambientais No Dia 08/02/2012 [4]

As figuras 11 a 14 mostram o comportamento de dados ambientais no dia 08 de fevereiro. As temperaturas máxima e média estiveram elevadas em todo o estado do Paraná, atingindo valores acima de 38°C na região Norte e Oeste, com radiação solar próxima de 1.000 W/m². A velocidade de vento possui variação acentuada, mas observa-se ocorrências de ventos em torno de zero.

a) Temperatura máxima

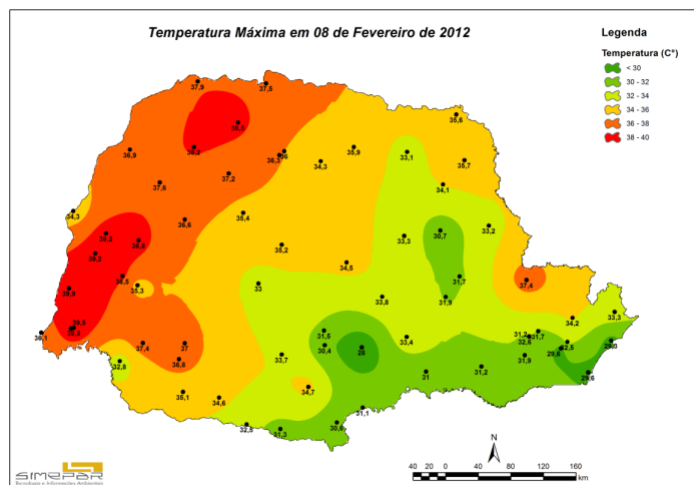


FIGURA 11 - Temperatura máxima [°C] em 08/02/2012

b) Radiação solar

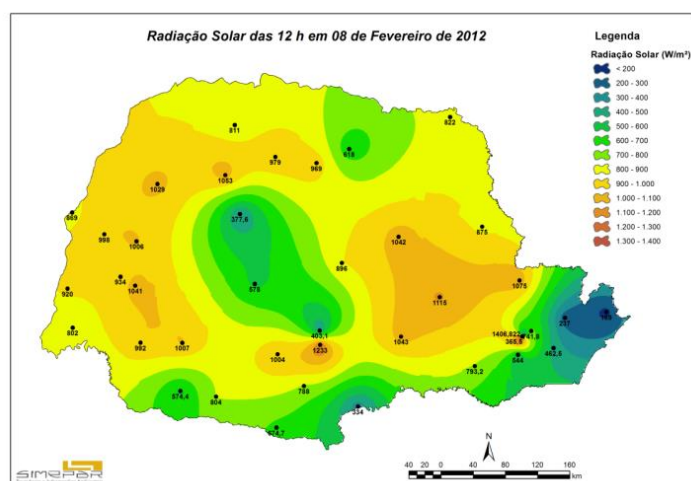


FIGURA 12 - Radiação Solar [W/m²] às 12h do dia 08/02/2012

c) Temperatura média

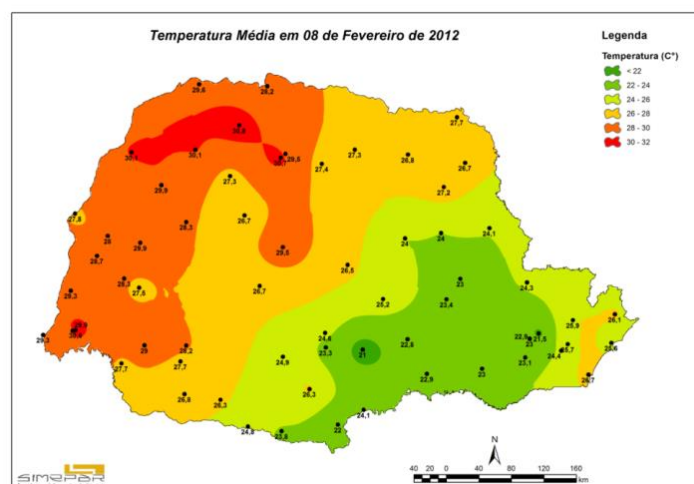


FIGURA 13 - Temperatura média [°C] em 08/02/2012

d) Velocidade de vento mínima

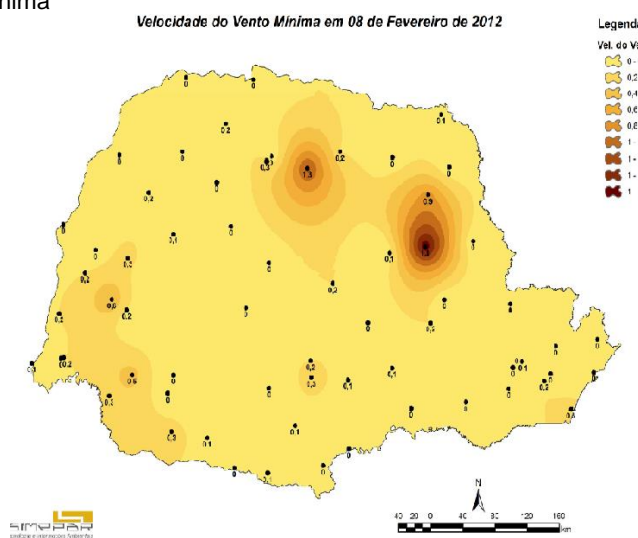


FIGURA 14 - Velocidade de vento mínima [m/s]

2.4.2 – Capacidades Operativas De Algumas Linhas De Transmissão Em 230 Kv

Mantendo fixas a radiação solar (1000 W/m^2) e velocidade de vento ($0,61 \text{ m/s}$) de projeto e as temperaturas ambiente máximas ocorridas no dia 08/02/2012, chegamos a valores de capacidades operativas mais próximas da realidade, conforme tabela 1. As colunas em destaque nesta tabela mostram que as capacidades contratadas (CPST) não poderiam ser exploradas com total segurança, seja considerando as temperaturas média e máxima no horário entre 12 e 18 horas. No entanto, destaca-se que neste dia nenhuma das capacidades foi efetivamente ultrapassada, pois os níveis de carregamento estavam abaixo dos limites, devido ao fato do sistema de transmissão ser projetado para suportar a condição n-1 (uma LT fora de operação).

Tabela 1 - Capacidade operativas referenciadas a temperatura ambiente

| LINHA DE TRANSMISSÃO | DIA 08 DE FEVEREIRO/2012 | | | | | | |
|---|--------------------------|-------------------|----------------------|--------------------|------------------------|----------------------|--------------------|
| | CPST (A) | TEMPERATURA MÉDIA | | | TEMPERATURA MÁXIMA | | |
| | | Temp Amb. °C | VALOR REAL (A) | VALOR REAL/CPST | Temp Amb. °C max | VALOR REAL (A) | VALOR REAL/CPST |
| Apucarana – Sarandi | 457 | 35 | 398 | 0,87 | 38 | 274 | 0,6 |
| Cascavel – Cascavel Oeste c2 e c3 | 895 | 34 | 848 | 0,95 | 36 | 823 | 0,92 |
| Cascavel – Foz do Chopim | 812 | 34 | 760 | 0,94 | 40 | 671 | 0,83 |
| Cascavel – Salto Osório | 812 | 35 | 745 | 0,92 | 38 | 702 | 0,86 |
| Foz do Chopim – Salto Osório | 812 | 35 | 745 | 0,92 | 40 | 671 | 0,83 |
| Chavantes – Figueira | 586 | 34 | 529 | 0,9 | 36 | 497 | 0,85 |
| Figueira – Jaguariaíva | 718 | 31 | 707 | 0,98 | 36 | 650 | 0,91 |
| Figueira – Londrina | 724 | 34 | 679 | 0,94 | 38 | 632 | 0,87 |
| Figueira – Ponta Grossa Norte | 402 | 31 | 380 | 0,94 | 36 | 249 | 0,62 |
| Ibiporã – Londrina c1 e c2 | 570 | 34 | 487 | 0,85 | 35 | 463 | 0,81 |
| Maringá – Sarandi | 457 | 35 | 353 | 0,77 | 38 | 274 | 0,6 |
| Apucarana – Londrina c2 | 724 | 34 | 679 | 0,94 | 38 | 632 | 0,87 |
| Fonte: Simepar e Copel – Temperatura Ambiente: médias e máximas horárias entre 12 e 18h | | | | | | | |

2.4.3 – Capacidade Operativa Da Lt 230 Kv Cascavel – Salto Osório

De forma a obter uma avaliação mais detalhada em relação à capacidade operativa de linha de transmissão foi calculada a capacidade da LT 230 kV Cascavel – Salto Osório, 80km de extensão, cabo Drake, temperatura de projeto 75°C, com dados ambientais de ambas as extremidades da linha, ao longo do dia.

A curva de temperatura ambiente de Salto Osório e Cascavel (figuras 15 e 16) são aderentes, com destaque para a temperatura mais elevada em Salto Osório. Quanto à velocidade de vento, variável de baixa previsibilidade ao longo da LT, em Cascavel (figura 18) é superior à de Salto Osório (figura 17), sendo que em Salto Osório verifica-se significativa quantidade de medidas de velocidades abaixo de 1 m/s. As radiações solares em ambas as extremidades são semelhantes (figuras 19 e 20), mas atingem valores de até 1100 W/m².

2.4.3.1 – Dados Ambientais Nas Extremidades Da Lt 230 Kv Cascavel – Salto Osório

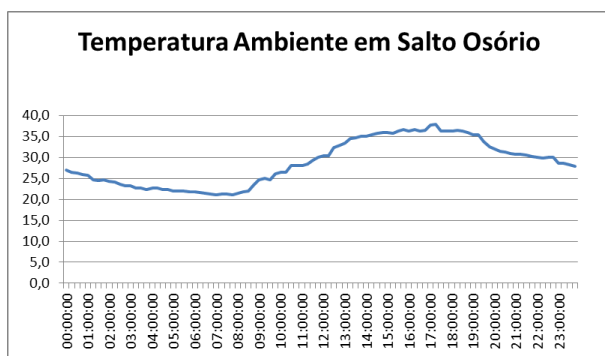


FIGURA 15 - Temperatura ambiente ao longo do dia no Terminal Salto Osório [°C]

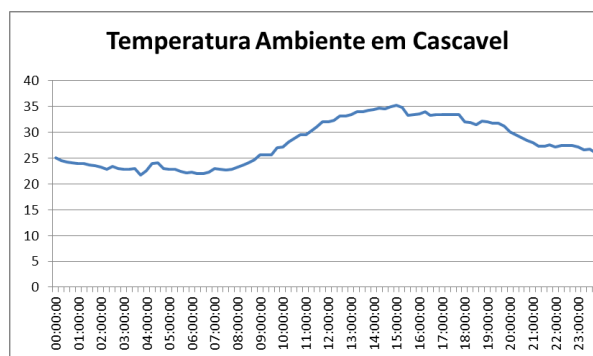


FIGURA 16 - Temperatura ambiente ao longo do dia no terminal Cascavel [°C]



FIGURA 17 - Velocidade de vento no terminal Salto Osório [m/s]

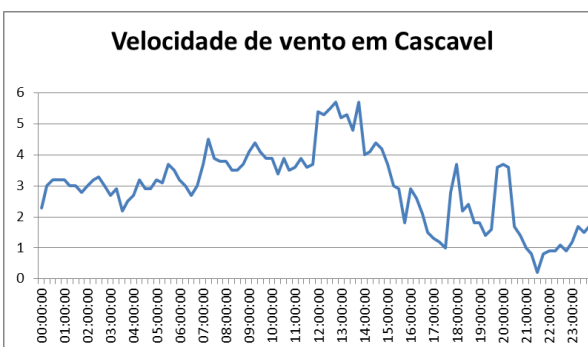


FIGURA 18 - Velocidade de vento no terminal Cascavel [m/s]

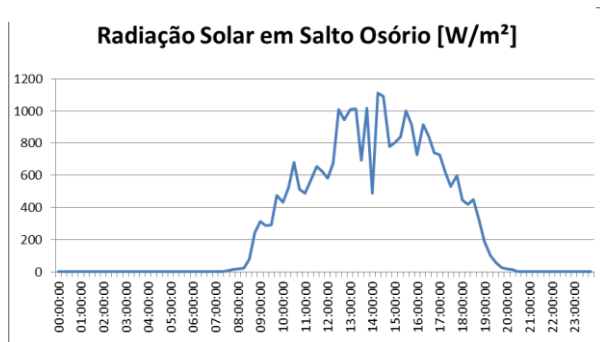


FIGURA 19 - Radiação Solar no terminal de Salto Osório [W/m²]

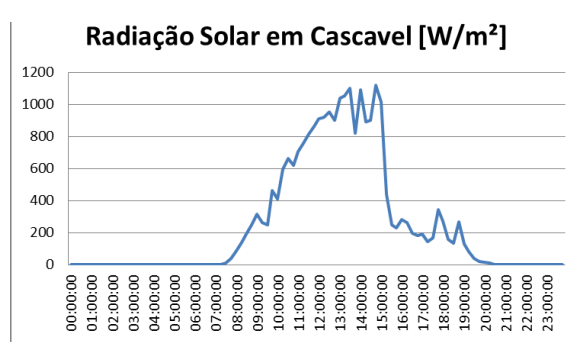


FIGURA 20 - Radiação solar no terminal de Cascavel [W/m²]

2.4.3.2 Capacidades Operativas Calculadas Com Dados Ambientais Verificados Para A Lt 230 Kv Cascavel – Salto Osório

A partir dos dados ambientais levantados, utilizando a metodologia determinística, calculou-se a capacidade operativa da LT 230 kV Cascavel – Salto Osório, a qual foi comparada com o valor contratado-CPST (812 A), valor sazonal de verão (verão dia – 812 A e verão noite 912 A) e valor efetivamente realizado, figuras 21 e 22.

a) Dados ambientais de Salto Osório

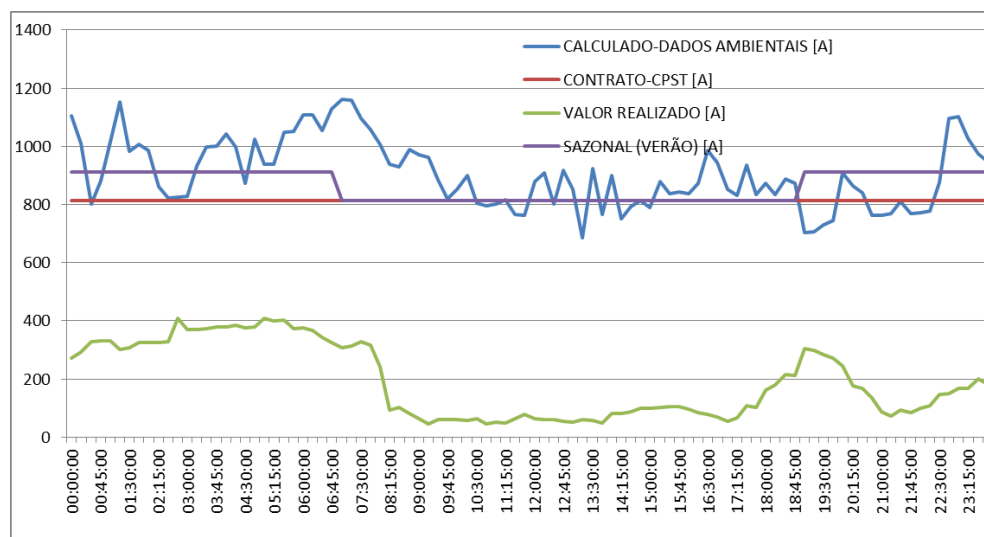


FIGURA 21 – Curvas de capacidades operativas contratada, calculada, sazonal, e curva realizada da LT 230 kV Cascavel – Salto Osório, com dados ambientais de Salto Osório [A]

b) Dados ambientais de Cascavel

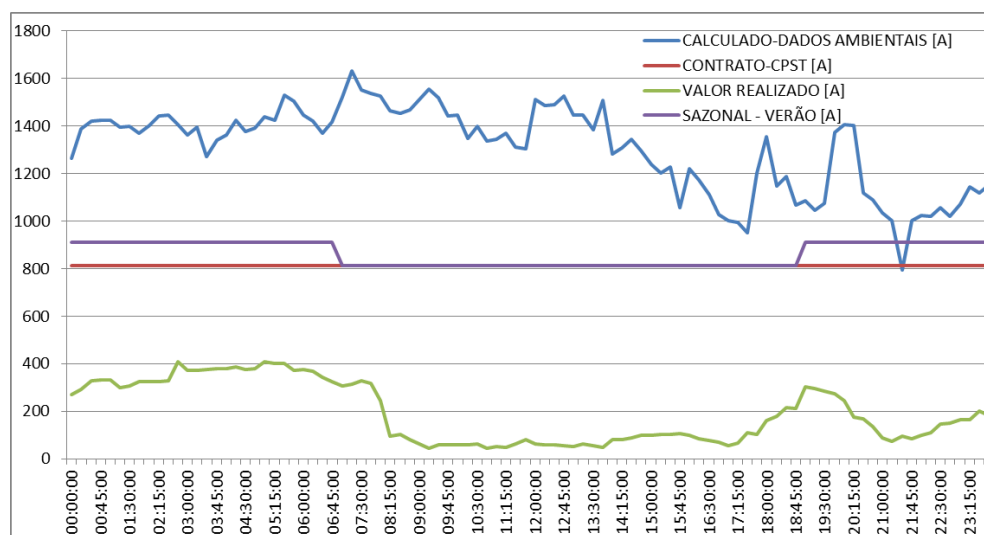


FIGURA 22 - Curvas de capacidades operativas contratada, calculada, sazonal, e curva realizada da LT 230 kV Cascavel – Salto Osório com dados ambientais de Cascavel [A]

Os valores calculados de ampacidade da LT 230 kV Cascavel – Salto Osório tem amplitudes diferentes ao comparar com os dados das extremidades da LT. Destaca-se que a ampacidade vista a partir dos dados de Salto Osório é significativamente menor, em virtude das temperaturas ambientes maiores e das velocidades de vento menores em Salto Osório, com destaque para a velocidade de vento.

3.0 - CONCLUSÃO

A capacidade operativa das linhas de transmissão (LT) é dependente das condições ambientais do local em que a LT está inserida, podendo ter variações significativas ao longo do dia ou mesmo épocas do ano, em especial nos estados da região Sul onde as sazonalidades são bem acentuadas.

Os projetos de linhas de transmissão, considerando as medidas das médias das máximas temperaturas anuais e vento de 1 m/s, podem estar descolados das grandezas medidas destes parâmetros nos meses do verão, e levar a períodos seguidos de operação das linhas de transmissão com limites de valores de ampacidade real menores que os contratados.

Um exemplo de operação com o limite de ampacidade real abaixo dos valores contratados foi o que ocorreu no início de fevereiro de 2012, com ondas de calor em todo o estado do Paraná, cujas temperaturas ficaram acima de 38°C nas regiões Norte e Oeste, o que vem ocorrendo sistematicamente no verão. Embora tenha havido diminuição importante no limite de ampacidade das LT estudadas, não houve violação das distâncias de segurança, pois os carregamentos ocorridos estavam abaixo dos valores limites calculados.

Ao estudar a ampacidade da LT 230 kV Cascavel – Salto Osório, com dados reais de temperatura, vento e radiação solar, observou-se que em alguns horários, em especial durante o dia, a capacidade contratada estava ligeiramente acima da calculada, com destaque para os períodos em que a velocidade de vento situava-se abaixo de 1 m/s.

O risco de operação de LT com valores acima de suas capacidades sempre existirá, mesmo que para períodos curtos de tempo. É preciso conhecer as instalações e prever medidas operativas de forma a minimizar estes riscos e os efeitos de eventual acidente, que pode ser grave, já que a LT está inserida em meio não controlado.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) NBR - 5422 – Projeto de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica - 1985.
- (2) ANEEL - Edital Leilão 007/2013 - Empreendimento SE Curitiba Norte.
- (3) ABRATEE – 29_01>2016 – Relatório_FT_Ampacidade Sazonal de Linhas de Transmissão
- (4) SIMEPAR - <http://www.simepar.br>

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Glaucio André Primo – Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 1997; especialista em Sistemas de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, Brasil, 2010, e especialista em Telecomunicações pela Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2001. É Engenheiro do Setor de Engenharia de Operação da Transmissão, da Companhia Paranaense de Energia - COPEL.

Rafael Martins - Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, com Mestrado em Engenharia Elétrica e Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais, ambos pela Universidade Federal do

Paraná. Atualmente trabalha como professor do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Positivo e também atua como Engenheiro na Companhia Paranaense de Energia - COPEL.

Teófilo Yutaka Taguti – Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 1984; especialista em Sistemas de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, Brasil, 2003. É Engenheiro da Divisão de Engenharia de Operação de Geração e Transmissão, da Companhia Paranaense de Energia - COPEL.