



## GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP

### APLICAÇÃO DE SERVIÇOS CLIMÁTICOS NO ÂMBITO DO PROTOCOLO PIEVC NA AVALIAÇÃO DE RISCOS NA OPERAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

JULIAN LUIZ REIS(1);DIEGO LUIS TEDESCO DANDOLINI(2);JACIRA PRICHULA(3)  
CGT ELETROSUL(1)

#### RESUMO

*Nesse trabalho será apresentado os resultados de aplicação dos serviços climáticos, prestados por órgãos de Meteorologia e que considera também a localização espacial das infraestruturas (traçado e torres), em duas linhas de transmissão operadas pela Eletrobras CGT Eletrosul. Foram avaliados os cenários históricos baseados na estatística das variáveis climáticas bem como a predição destas variáveis em cenários futuros com quantificação dos gases de efeito estufa (GEE). Serão avaliados os riscos operacionais capacidade associados ao risco térmico e desempenho associado à taxa de desligamentos devido descargas atmosféricas.*

**PALAVRAS-CHAVE:** Mudanças climáticas, Linhas de Transmissão, Ampacidade, Descargas atmosféricas, Desempenho, Planejamento da Manutenção.

#### 1.0 INTRODUÇÃO

As variáveis climáticas ou meteorológicas desempenham papel importante na operação de linhas de transmissão. Devido a vários aspectos, as mudanças climáticas podem afetar a operação de linhas de transmissão e nesse sentido a avaliação de riscos operacionais se faz necessário.

Quando uma linha de transmissão (LT) é inserida no Sistema Elétrico, o agente transmissor proprietário firma um contrato com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) chamado Contrato de Prestação de Serviços de Transmissão (CPST) no caso da Rede Básica (tensões de 230 kV ou superior, redes de interligação de áreas de mercado ou ainda redes de interesse de operação do ONS). Neste documento são fixadas as receitas financeiras (associado ao valor do leilão, por exemplo) e as capacidades operativas da nova LT que o agente transmissor informa para que o ONS opere respeitando os limites impostos, com os quais são chamados de limites operacionais.

A meteorologia na região onde percorre a LT varia consideravelmente em cada sazonalidade provocando alterações dinâmicas na capacidade da LT. Na questão da sazonalidade, no âmbito apenas da operação, períodos definidos como verão dia (VD), verão noite (VN), inverno dia (ID) e inverno noite (IN) são considerados pelo ONS nos estudos de operação de curto-prazo (horizonte quadrimestral e mensal) (1). Neste aspecto, é imprescindível o conhecimento físico da LT por parte da transmissora para minimizar os riscos incorridos.

O projeto de uma linha de transmissão em solo nacional segue recomendações da norma brasileira ABNT NBR 5422, ao qual está sendo revisada até a data de publicação desse documento, prevendo em futuros projetos a adoção do conceito de ampacidade estatística associando um risco térmico e que será mais bem detalhada na seção 3.

Outro requisito importante na operação é o desempenho de LT's para desligamentos provocados por descargas atmosféricas. No caso brasileiro, para LT's de corrente alternada iguais ou superiores a 345 kV, esta taxa deve ser igual ou inferior a um desligamento para cada 100 km por ano (2). O critério de desempenho frente às descargas atmosféricas está relacionado à isolação elétrica (suportabilidade) enquanto o critério de capacidade operativa está associado à temperatura dos condutores. Por isso, ambos os aspectos devem ser discutidos separadamente.

Estudos desse tipo, no que tange à análise futura de risco térmico da LT, pode subsidiar justificativas referentes ao não atendimento de aspectos operacionais relacionadas a esse risco, subsidiar negociações durante a revisão tarifária (já que a diminuição do risco passa por um aumento das atividades de manutenção da LT) ou mesmo indicar ao ONS a necessidade de substituição dos cabos por outros que permitam operar com temperatura de projeto mais elevada.

Um risco operacional desempenho elevado indica que a linha está desligando acima do normatizado pelo procedimento de rede do ONS (devido descargas atmosféricas). Nesse caso, um estudo como esse pode antecipar ações de correção e/ou manutenção nas variáveis de projeto que propiciem uma melhora no desempenho da LT.

Este documento foi dividido em uma seção a respeito da metodologia de análise de riscos a partir da utilização dos serviços climáticos (seção 2) e duas seções conceituais/técnicas, pois cada uma tem particularidades do ponto de vista de critérios de desempenho operativo (seções 3 e 4). A seção 5 apresenta os casos estudados e seus resultados. Por fim, a seção 6 apresenta conclusões a respeito dos resultados obtidos e da metodologia aplicada.

De forma geral, esse trabalho através das metodologias apresentadas e análise dos resultados da aplicação dos serviços climáticos, contribui para a avaliação dos riscos operacionais em linhas de transmissão e tomadas de decisão no ambiente de operação.

## 2.0 PROTOCOLO PIEVC E SERVIÇOS CLIMÁTICOS

O Protocolo de Engenharia para Avaliação de Vulnerabilidade da Infraestrutura e Adaptação à Mudança do Clima (PIEVC – *Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee*) foi um comitê estabelecido pelo *Engineers Canada* em 2005 com a função de supervisionar um projeto de avaliação de vulnerabilidade de engenharia naquele país (3). Foi desenvolvida uma metodologia de análise de risco climático para avaliar possíveis impactos relacionados à mudança do clima, em infraestruturas públicas e privadas. Após a aplicação dessa metodologia, é possível estabelecer medidas adaptativas às mudanças climáticas em projetos de infraestruturas existentes, podendo influenciar no ambiente de operação e manutenção. Além disso, essas medidas de adaptação podem ser consideradas também nos ambientes de planejamento e desenvolvimento de novas infraestruturas. A Figura 1 apresenta o fluxograma com os passos necessários para avaliação de vulnerabilidades nas infraestruturas. As determinações das variáveis climáticas aplicáveis nas análises de risco correspondem ao passo 2.

No contexto de mudanças climáticas, onde o Brasil é signatário da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática (UNFCCC) além de fazer parte dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são medidas visando combater as mudanças do clima e seus impactos, surge o projeto em parceria com o governo alemão (Projeto CSI – *Enhancing Climate Services for Infrastructure Investments*) com o objetivo que as instituições introduzam em seus processos de planejamento e regulamentações, informações climáticas customizadas e orientadas para o usuário, também conhecidas como Serviços Climáticos, de fundamental importância para o gerenciamento de riscos climáticos pelos tomadores de decisão públicos ou privados. Os Serviços Climáticos usados nesse trabalho com foco nos riscos operacionais em linhas de transmissão foram fornecidos por parceiros no projeto CSI como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) e Defesa Civil do Estado de Santa Catarina. A partir de definições correspondentes ao passo 1 do protocolo PIEVC decidiu-se por analisar linhas de transmissão de 525kV da Eletrobras CGT Eletrosul conforme critério de região dentro do estado de Santa Catarina e fator climático, resultando na análise de duas LT's:

- LT Oeste – escolhida devido grande ocorrências de temporais com ventos fortes e descargas atmosféricas;
- LT Litoral – escolhida em função de alta ocorrência de chuva acumulada levando a deslizamento de terras.

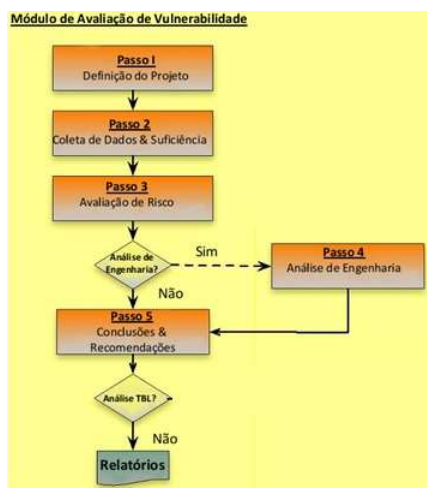


FIGURA 1 – Fluxograma dos passos do PIEVC.

Foram avaliados os riscos estruturais caracterizados por danos físicos às estruturas (queda de torres, avarias nas fundações, rompimentos de cabos) e os riscos operacionais que são o objeto desse trabalho. Os riscos são avaliados de acordo com pontuações de severidades provocada por determinada variável climática e pontuações associadas à sua probabilidade de ocorrência. Através dessa associação foi determinada uma matriz de risco onde a cor verde representa risco baixo e uma análise mais aprofundada é descartada, a cor amarela indica risco médio e é necessário reter o resultado para análise posterior e a cor vermelha representa alto risco com necessidade de partir direto para recomendações advindas de análises detalhadas (vide Figura 2).

SEVERIDADE	5	5	10	15	20	25
	4	4	8	12	16	20
	3	3	6	9	12	15
	2	2	4	6	8	10
	1	1	2	3	4	5
		1	2	3	4	5
PROBABILIDADE						

FIGURA 2 – Matriz com zonas de risco obtidas a partir da aplicação do protocolo PIEVC.

### 3.0 CAPACIDADE OPERATIVA

A capacidade de uma linha de transmissão é definida por sua temperatura de projeto, pelas características do cabo condutor e pelas condições meteorológicas ao longo da LT. A temperatura de projeto é uma condição limite de operação em regime permanente (algum ponto de operação estável eletricamente), definida em projeto (ABNT NBR 5422/1985) que resulta em um abaixamento dos cabos condutores à distância cabo-solo mínima normalizada (Figura 3). Ao se garantir que a temperatura superficial do cabo condutor não exceda a temperatura de projeto, minimizam-se os riscos associados. No âmbito da operação, é necessário definir qual será a capacidade operativa das LT's, ou seja: a corrente que, ao fluir pelos cabos condutores da LT, elevará sua temperatura até a temperatura de projeto.

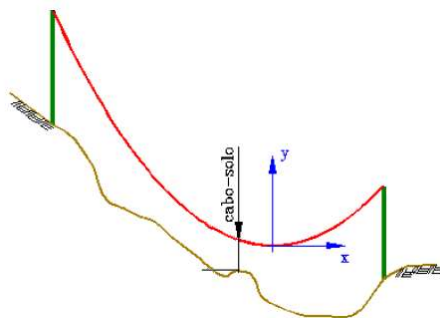


FIGURA 3 – Ilustração da distância cabo-solo mínima normalizada.

Para relacionar corrente elétrica e temperatura superficial do cabo condutor, deve-se estimar/medir outros parâmetros: **ventos (velocidade e direção), temperatura ambiente e radiação solar.**

Atualmente, a operação de linhas de transmissão no Brasil considera a abordagem determinística tanto para assinatura do CPST quanto para operação sazonal nos âmbitos de curto prazo. Isso significa que condições de referência são usadas para determinar a temperatura superficial do condutor, a saber:

- Velocidade de vento entre 0,61 e 1 m/s;
- Direção do vento perpendicular ao eixo da torre/LT (90°);
- Temperatura ambiente igual à média das máximas diárias do verão;
- Radiação solar igual a 1000 W/m².

Em regime permanente, a temperatura do cabo condutor pode ser considerada constante, assim como a corrente elétrica, a radiação solar, o vento e a temperatura ambiente. A Equação (1) expressa o equilíbrio térmico no cabo condutor, derivada do modelo *Cigré* (4) e utilizada pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) como procedimento para determinar a capacidade de LT's da Rede Básica (5).

$$P_J + P_S = P_C + P_R \quad (1)$$

Onde:

$P_J$  = Parcela de ganho de calor por efeito Joule;

$P_S$  = Parcela de ganho de calor devido radiação solar difusa;

$P_C$  = Parcela de perda de calor por convecção devido a passagem do vento pelo cabo condutor;

$P_R$  = Parcela de perda de calor por irradiação no cabo condutor.

A Figura 4 contém uma ilustração que apresenta aspectos da equação de equilíbrio térmico (Equação 1) das potências geradas e dissipadas na LT.

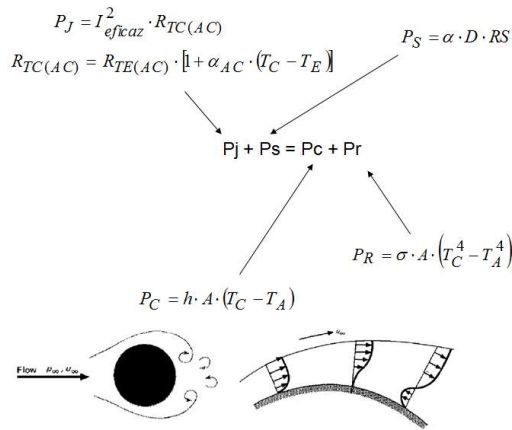


FIGURA 4 – Esquema ilustrativo da equação de equilíbrio térmico de uma LT.

A parcela  $P_J$  (Parcela de Efeito Joule) é uma potência gerada pela LT devido à passagem da corrente elétrica nos cabos condutores. Outra parcela responsável pelo aumento de temperatura é a  $P_S$  (Parcela Ganho Solar), que está associada à potência devido à absorção de calor do cabo condutor pelo sol.

No lado direito da equação, estão as parcelas responsáveis por diminuir a temperatura do cabo condutor. A primeira é a  $P_C$  (Parcela Convecção) e está relacionada à retirada de calor do cabo condutor pelo vento. E, finalmente, a parcela  $P_R$  (Parcela Radiação), cujo valor representa a perda de calor por irradiação.

A norma ABNT NBR 5422 que rege o projeto de linhas de transmissão, e que em uma de suas seções trata da capacidade, está sendo revisada e prevê que o conceito de risco térmico e ampacidade estatística sejam usados em projetos após sua publicação (revisão).

Como visto anteriormente, a temperatura superficial do condutor depende de variáveis climáticas que interagem simultaneamente. Os dados dessas variáveis podem ser extraídos de estações meteorológicas próximas da região onde passa a LT ou então obtidas por simulação numérica através de um processo conhecido como *downscaling* (técnica de espacialização) que transfere as variáveis climáticas em pontos específicos da LT.

Com a série de dados dessas variáveis climáticas, pode então ser obtida uma distribuição de temperaturas superficiais do condutor, com o qual podemos relacionar ao estudo de ampacidade estatística. De posse dessa distribuição é possível se calcular a probabilidade de ultrapassagem de um dado valor de temperatura superficial do condutor, por exemplo e por conveniência, idêntica a temperatura de projeto. Essa probabilidade de ultrapassagem dessa temperatura de referência (ou de projeto) é então definida como risco térmico. A Figura 5 ilustra a distribuição das temperaturas superficiais do condutor, as probabilidades e o risco térmico.

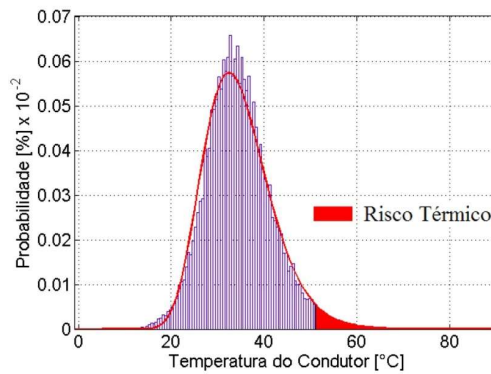


FIGURA 5 – Distribuição de temperaturas e risco térmico (6).

O risco térmico expressa o tempo com a qual a LT irá operar com distância cabo-solo abaixo da normalizada (considerando a corrente constante). Para efeitos de entendimento, se a série das variáveis climáticas correspondem a 30 anos de medição (10950 dias ou 262800 horas) e admite-se um risco térmico de 5% para condições de operação normal, o total de dias que se incorre risco de ultrapassar a distância cabo-solo é de 547,5. Na prática, é exatamente isso que acontece, pois, as variáveis climáticas tem um caráter estatístico devido às suas respectivas distribuições ao longo do tempo. A Equação (2) define o risco térmico (7).

$$RT \equiv P(t \geq t_{ref}) = 1 - \int_{t_{min}}^{t_{ref}} f(t) dt \quad (2)$$

#### 4.0 DESEMPENHO FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O que mantém uma LT em operação são as distâncias elétricas em ar e os isoladores entre os pontos energizados e o plano de terra (considerado como referência). Tanto o ar quanto os isoladores possuem características dielétricas que permitem manter uma tensão elétrica nos condutores sem que haja um curto-circuito para outro ponto, que é traduzido sob a forma de suportabilidade. O curto-circuito, por sua vez, é uma falha no dielétrico que ultrapassa sua suportabilidade. Pode ocorrer por vários motivos, entre eles: diminuição da distância entre partes energizadas e partes aterradas, aumento da tensão elétrica imposta sobre este dielétrico e degradação das características físicas deste dielétrico.

Isto posto, a avaliação do desempenho de uma linha de transmissão aérea no que se refere à capacidade de suportar elevações transitórias de tensão provenientes de manobras de dispositivos da rede elétrica e de surtos atmosféricos (descargas) é um assunto complexo. Notadamente os desligamentos devido às descargas atmosféricas dependem de muitas variáveis como a distribuição de intensidades e tempos de frente das descargas atmosféricas, densidade das descargas atmosféricas que incidem na terra, impedâncias de surto dos cabos de blindagem, dos cabos condutores e das torres, impedância impulsiva de pé de torre entre outros. Porém, aspectos mais detalhados não serão tratados nesse trabalho.

Do ponto de vista das descargas atmosféricas, no âmbito deste trabalho, parte-se do princípio que as mesmas não atingem os cabos condutores, pois a blindagem promovida pelos cabos guarda praticamente garante isto. Normalmente correntes com intensidades mais baixas de descargas atmosféricas, se comparadas com a média de sua distribuição, podem atingir o cabo condutor (falha de blindagem), a depender do projeto da LT, e estas correntes provocam sobretensões que geralmente são suportáveis para os dielétricos já citados.

Considerando isto, as descargas atmosféricas que atingem a linha de transmissão terão ponto de incidência mais provável nos cabos de blindagem e/ou nas torres. Quando isto acontece, a tensão elétrica se eleva na torre e no entorno da LT, pois a corrente elétrica proveniente da descarga atmosférica que agora flui nestas estruturas gera um elevado aumento transitório de tensão. Se esta tensão ou potencial elétrico ultrapassar a suportabilidade do dielétrico (geralmente os isoladores) há a ocorrência de uma descarga disruptiva de retorno também chamado de *backflashover* (da estrutura para o condutor). Este fenômeno pode ser visualizado na Figura 6.

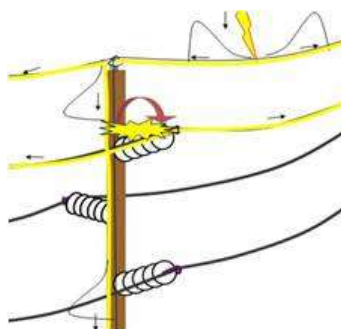


FIGURA 6 – Ocorrência de *backflashover*.

Este fenômeno acaba causando o desligamento da LT pela proteção que está instalada nos terminais da mesma. Em seguida, como o evento causador é extinto, devido a propagação desse surto atmosférico pelos elementos da LT, principalmente o aterramento, permitem um decréscimo dessa energia, haverá uma tentativa de religamento da linha de transmissão. Geralmente esta tentativa tem sucesso, pois o dielétrico em ar é autorregenerativo (isolação autorrecuperante) e recupera rapidamente as características dielétricas originais que permitem a operação da LT.

A variável climática a ser usada nesse trabalho para avaliar riscos relativos a aumentos de desligamentos provocados por descargas atmosféricas é a **densidade de descargas atmosféricas que incidem na terra**, que é dependente do índice cerâmico da região onde a LT foi implantada.

#### 5.0 CASOS ESTUDADOS E RESULTADOS

Para a LT Oeste e LT Litoral, as temperaturas superficiais do condutor é 60°C e 65°C, respectivamente. Estas temperaturas superficiais do condutor são dependentes de variáveis climáticas ocorrendo de maneira simultânea e por esse motivo as probabilidades de ocorrência são conjuntas. Desse modo foi desenvolvida uma matriz de risco similar a recomendada pelos critérios do protocolo PIEVC e pode ser visualizada através da Figura 7. A análise do risco operacional capacidade é realizada através da obtenção do risco térmico (RT) para os cenários estudados.

	Risco Térmico	Nível
Risco Operacional Capacidade	$0 < RT \leq 0.10$	BAIXO
	$0.10 < RT \leq 0.15$	MÉDIO
	$RT > 0.15$	ALTO

FIGURA 7 – Matriz com zonas de risco operacional capacidade.

As LT's foram avaliadas a partir de 21 pontos (com resolução de 5 km) através de simulação numérica disponibilizados pelos climatologistas parceiros do projeto CSI. Estas variáveis foram dispostas em intervalos de 3 em 3 horas gerando um total de 84 distribuições de temperaturas superficiais do condutor (uma para cada sazonalidade). Esse total de distribuições corresponde a um período climático estudado. Ao todo foram computados três períodos, a saber: Histórico (35 anos de dados – 1975 a 2010), Projeção Climática de Cenário Futuro RCP4.5 e RCP8.5 (30 anos de dados – 2010 a 2040). As trajetórias representativas de concentração RCP (*Representative Concentration Pathway*) fornecem cenários de emissão de GEE, com o qual RCP8.5 é o cenário mais pessimista. Os resultados do risco operacional capacidade para a LT Oeste e Litoral podem ser visualizados através das Tabelas 1 e 2, respectivamente (cor laranja representa a maior variação em relação ao cenário histórico/medido).

Os resultados para a LT Oeste mostram que três pontos possuem indicativo de alto risco, sendo necessário uma análise mais criteriosa dos vãos que compreendem esses pontos, verificando corte de vegetação na faixa de segurança, altura cabo-solo dos vãos correspondentes, tração nos cabos condutores. Se alguns desses itens estiverem fora dos padrões, medidas adaptativas como limpeza de faixa, aumento da altura das torres associadas ou retracionamento dos cabos condutores podem ser usados. Já para a LT Litoral os resultados se situaram em patamares aceitáveis em qualquer cenário, pois as projeções de mudanças climáticas são mais favoráveis se comparadas com a LT Oeste. Além disso, a temperatura de projeto para a LT Litoral é mais alta (65°C ao invés de 60°C da LT Oeste). Somado esses fatores, facilmente se percebe que a LT Oeste necessita de um monitoramento maior em relação ao risco térmico associado às mudanças climáticas provocados por variações simultâneas na velocidade e direção do vento, temperatura do vento e radiação solar que impactam na capacidade da LT em operar nas distâncias mínimas de segurança.

A Figura 8 apresenta o ponto de simulação numérica com o resultado mais pessimista de todos analisados, para cada cenário.

Com relação ao risco operacional desempenho foram adotados os valores de densidade de descargas atmosféricas que incidem na terra  $N_G$  de 9 e 13 para as LT's Litoral e Oeste, respectivamente. Esses valores são os máximos encontrados no trajeto dessas LT's no mapa da região sul do Brasil para densidade de descargas atmosféricas (8) e coincidem com o valor de 1 desligamento a cada 100 km por ano, de acordo com os requisitos dos Procedimentos de Rede do ONS. As Tabelas 3 e 4 apresentam as escalas de severidade, escalas de probabilidade e probabilidade de ocorrência para as LT's Litoral e Oeste, respectivamente.

Risco Térmico - RCP 4.5									Risco Térmico - RCP 8.5							
Ponto	VD	Diferença	VN	Diferença	ID	Diferença	IN	Diferença	VD	Diferença	VN	Diferença	ID	Diferença	IN	Diferença
1	6.73%	11.38%	17.70%	33.36%	2.26%	24.11%	4.87%	21.38%	6.42%	6.25%	18.66%	40.59%	2.45%	34.54%	5.52%	37.58%
2	1.78%	44.59%	9.30%	54.51%	0.50%	60.00%	1.64%	24.29%	1.74%	41.34%	10.58%	75.83%	0.53%	69.60%	2.11%	59.92%
3	2.11%	52.56%	9.45%	53.04%	0.55%	45.47%	1.87%	31.00%	2.14%	54.73%	10.60%	71.67%	0.62%	63.98%	2.19%	53.42%
4	2.11%	52.56%	9.45%	53.04%	0.55%	45.47%	1.87%	31.00%	2.14%	54.73%	10.60%	71.67%	0.62%	63.98%	2.19%	53.42%
5	3.77%	33.69%	12.65%	44.57%	1.24%	45.88%	2.75%	18.53%	3.81%	35.11%	13.84%	58.17%	1.24%	45.88%	3.20%	37.93%
6	3.94%	30.03%	12.60%	45.33%	1.26%	43.18%	2.72%	16.24%	3.76%	24.09%	13.76%	58.71%	1.23%	39.77%	3.31%	41.45%
7	2.33%	44.72%	9.61%	52.54%	0.68%	58.14%	1.95%	18.90%	2.38%	47.83%	10.84%	72.06%	0.71%	65.12%	2.27%	38.41%
8	2.32%	49.68%	9.60%	50.71%	0.67%	45.65%	1.93%	21.38%	2.33%	50.32%	10.76%	68.92%	0.68%	47.83%	2.28%	43.40%
9	3.61%	46.15%	11.40%	39.88%	0.95%	30.14%	2.66%	18.22%	3.55%	43.72%	12.54%	53.87%	1.03%	41.10%	3.06%	36.00%
10	2.49%	50.00%	9.45%	51.93%	0.60%	42.86%	1.88%	14.63%	2.54%	53.01%	10.52%	69.13%	0.60%	42.86%	2.35%	43.29%
11	1.91%	42.54%	7.94%	52.99%	0.45%	40.63%	1.38%	5.34%	2.05%	52.99%	8.74%	68.40%	0.45%	40.63%	1.78%	35.88%
12	2.57%	46.02%	9.05%	56.30%	0.57%	35.71%	1.80%	13.21%	2.85%	61.93%	9.67%	67.01%	0.65%	54.76%	2.08%	30.82%
13	4.38%	54.77%	11.66%	58.42%	1.00%	40.85%	2.55%	18.06%	4.67%	65.02%	12.03%	63.45%	1.14%	60.56%	2.87%	32.87%
14	3.84%	52.38%	10.88%	58.60%	0.82%	41.38%	2.26%	14.72%	4.17%	65.48%	11.54%	68.22%	0.95%	63.79%	2.63%	33.50%
15	3.84%	52.38%	10.88%	58.60%	0.82%	41.38%	2.26%	14.72%	4.17%	65.48%	11.54%	68.22%	0.95%	63.79%	2.63%	33.50%
16	4.78%	43.98%	12.56%	52.61%	1.10%	35.80%	2.83%	15.98%	4.94%	48.80%	13.01%	58.08%	1.16%	43.21%	3.20%	31.15%
17	4.32%	50.00%	11.20%	57.08%	0.84%	21.74%	2.51%	30.05%	4.48%	55.56%	11.21%	57.22%	1.08%	56.52%	2.71%	40.41%
18	4.56%	56.16%	10.80%	59.53%	0.90%	21.62%	2.46%	18.84%	4.71%	61.30%	10.52%	55.39%	1.14%	54.05%	2.67%	28.99%
19	7.05%	41.00%	14.73%	51.08%	1.65%	20.44%	3.86%	24.52%	7.22%	44.40%	14.51%	48.82%	1.97%	43.80%	4.24%	36.77%
20	13.96%	23.65%	22.30%	39.11%	4.59%	18.60%	7.73%	15.89%	13.52%	19.75%	22.26%	38.86%	5.02%	29.72%	8.26%	23.84%
21	13.96%	23.65%	22.30%	39.11%	4.59%	18.60%	7.73%	15.89%	13.53%	19.84%	22.26%	38.86%	5.02%	29.72%	8.26%	23.84%

TABELA 1 – Evolução do risco térmico dos casos de projeção climática em comparação com o cenário histórico (medidas existentes) para a LT Oeste.

Risco Térmico - RCP 4.5									Risco Térmico - RCP 8.5							
Ponto	VD	Diferença	VN	Diferença	ID	Diferença	IN	Diferença	VD	Diferença	VN	Diferença	ID	Diferença	IN	Diferença
1	2.54%	7.59%	1.00%	-5.28%	0.76%	32.21%	0.65%	22.09%	2.52%	6.74%	0.87%	-17.59%	0.98%	70.48%	0.83%	55.90%
2	2.52%	7.99%	0.86%	-8.40%	0.84%	62.48%	0.61%	35.14%	2.62%	12.27%	0.73%	-22.25%	0.99%	91.50%	0.80%	77.23%
3	0.87%	-3.75%	0.32%	-19.47%	0.20%	116.00%	0.12%	-8.52%	0.96%	6.21%	0.28%	-29.54%	0.22%	137.60%	0.20%	52.47%
4	1.37%	-3.66%	0.48%	-10.72%	0.59%	103.90%	0.33%	17.17%	1.34%	-5.77%	0.41%	-23.74%	0.54%	86.62%	0.46%	63.33%
5	1.17%	-5.56%	0.45%	-17.49%	0.51%	81.08%	0.32%	23.80%	1.24%	0.09%	0.38%	-30.33%	0.55%	95.29%	0.40%	54.75%
6	1.56%	-0.89%	0.51%	-24.76%	0.61%	52.03%	0.46%	-4.61%	1.48%	-5.97%	0.38%	-43.94%	0.70%	74.46%	0.60%	24.42%
7	0.86%	-9.16%	0.27%	-23.84%	0.30%	36.42%	0.24%	21.98%	0.82%	-13.38%	0.17%	-52.05%	0.35%	59.16%	0.29%	47.39%
8	1.14%	-2.14%	0.32%	-31.55%	0.33%	15.59%	0.37%	41.04%	1.08%	-7.29%	0.23%	-50.80%	0.47%	64.63%	0.34%	29.60%
9	0.78%	-18.61%	0.27%	-27.05%	0.22%	42.56%	0.21%	32.76%	0.81%	-15.48%	0.18%	-51.36%	0.31%	100.88%	0.18%	13.80%
10	0.63%	-12.59%	0.22%	-21.57%	0.20%	40.11%	0.22%	67.72%	0.67%	-7.04%	0.12%	-57.22%	0.27%	89.15%	0.19%	44.85%
11	0.60%	-15.84%	0.30%	2.68%	0.22%	26.72%	0.19%	2.60%	0.66%	-7.43%	0.18%	-38.39%	0.26%	49.76%	0.22%	18.80%
12	0.93%	-9.23%	0.41%	-10.05%	0.29%	47.39%	0.18%	-8.52%	0.93%	-9.23%	0.25%	-45.15%	0.29%	47.39%	0.26%	32.14%
13	0.52%	-13.89%	0.33%	0.84%	0.22%	111.20%	0.10%	-31.79%	0.52%	-13.89%	0.24%	-26.66%	0.17%	63.20%	0.17%	15.96%
14	1.15%	-1.61%	0.62%	-14.89%	0.34%	63.20%	0.17%	-25.32%	1.19%	1.82%	0.47%	-35.48%	0.43%	106.40%	0.35%	53.76%
15	1.06%	-11.08%	0.38%	-21.97%	0.34%	60.23%	0.27%	55.52%	0.90%	-24.51%	0.29%	-40.45%	0.41%	93.22%	0.26%	49.76%
16	1.43%	1.12%	0.43%	-29.70%	0.47%	46.78%	0.37%	11.52%	1.17%	-17.27%	0.41%	-32.97%	0.65%	102.99%	0.40%	20.56%
17	0.19%	13.42%	0.14%	-32.20%	0.05%	159.20%	0.05%	-7.43%	0.13%	-22.40%	0.08%	-61.25%	0.04%	107.36%	0.03%	-44.46%
18	0.25%	5.20%	0.14%	-18.33%	0.06%	-2.80%	0.06%	-37.79%	0.18%	-24.26%	0.08%	-53.33%	0.10%	62.00%	0.08%	-17.06%
19	0.37%	6.71%	0.16%	-35.83%	0.07%	-30.22%	0.11%	35.77%	0.32%	-7.71%	0.14%	-43.85%	0.14%	39.57%	0.14%	72.80%
20	0.43%	-17.63%	0.13%	-46.18%	0.13%	24.80%	0.13%	-11.33%	0.43%	-17.63%	0.08%	-66.88%	0.19%	82.40%	0.09%	-38.61%
21	0.18%	-18.94%	0.05%	-62.25%	0.05%	-19.00%	0.08%	72.80%	0.14%	-36.96%	0.05%	-62.25%	0.09%	45.80%	0.04%	-13.60%

TABELA 2 – Evolução do risco térmico dos casos de projeção climática em comparação com o cenário histórico (medidas existentes) para a LT Litoral.

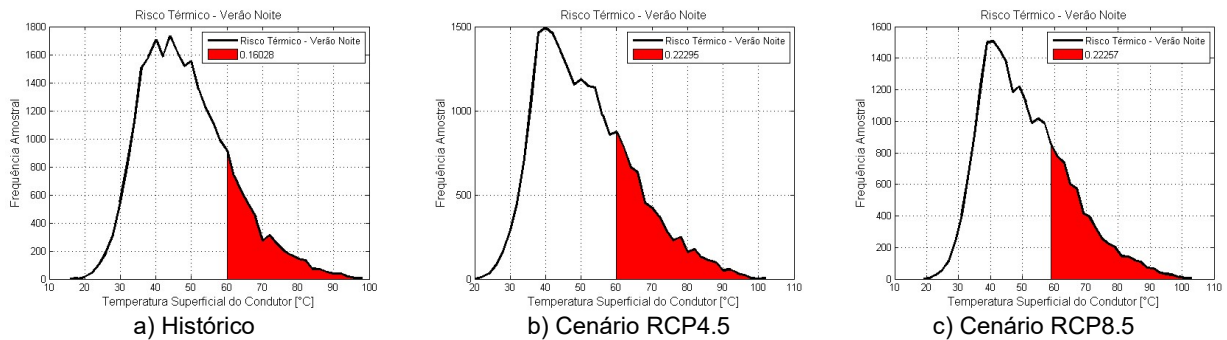


FIGURA 8 – Risco Térmico para os diferentes cenários climatológicos (valores em por unidade).

Densidade de Descargas Atmosféricas ao Solo (número / km² / ano)	Severidade		Aumento na Taxa de Falha [%]	Escala de Probabilidade	Probabilidade de Ocorrência [em %]				
					Clima Atual	RCP 4.5		RCP 8.5	
						Eta-HadGEM 2-ES	Eta-Microc5	Eta-HadGEM 2-ES	Eta-Microc5
$N_g \leq 9$	0	Sem Impacto	-	-	14.29	0	0	0	0
$9 < N_g \leq 11$	1	Leve	0	1 - Raro (<10%)	14.29	0	0	0	0
$11 < N_g \leq 13$	2	Moderado	20	2 - Pouco Provável (10-17%)	23.81	1.06	0	2.13	0
$13 < N_g \leq 16$	3	Grave	50	3 - Provável (18-50%)	19.05	98.94	98.94	97.7	100
$16 < N_g \leq 18$	4	Severo	80	4 - Altamente Provável (51-99%)	4.76	0	1.06	0	0
$N_g > 18$	5	Catastrófico	100	5 - Quase Certo (>99%)	23.81	0	0	0	0

TABELA 3 - Probabilidade de ocorrência atual e futura (Modelos HadGEM e Microc5) das faixas de densidade de descargas atmosféricas para LT Litoral.

Densidade de Descargas Atmosféricas ao Solo (número / km² / ano)	Severidade		Aumento na Taxa de Falha [%]	Escala de Probabilidade	Probabilidade de Ocorrência [em %]				
					Clima Atual	RCP 4.5		RCP 8.5	
						Eta-HadGEM 2-ES	Eta-Microc5	Eta-HadGEM 2-ES	Eta-Microc5
$N_g \leq 13$	0	Sem Impacto	-	-	0	0	0	0	0
$13 < N_g \leq 16$	1	Leve	0	1 - Raro (<10%)	4.76	0	0	0	0
$16 < N_g \leq 19$	2	Moderado	20	2 - Pouco Provável (10-17%)	23.81	0	0	0	0
$19 < N_g \leq 23$	3	Grave	50	3 - Provável (18-50%)	9.52	0	0	0	0
$23 < N_g \leq 26$	4	Severo	80	4 - Altamente Provável (51-99%)	9.52	0	0	0	0
$N_g > 26$	5	Catastrófico	100	5 - Quase Certo (>99%)	52.38	100	100	100	100

TABELA 4 - Probabilidade de ocorrência atual e futura (Modelos HadGEM e Microc5) das faixas de densidade de descargas atmosféricas para LT Oeste.

As escalas de severidade para cada LT foram obtidas através da utilização de informações dos projetos executivos e também do cálculo da taxa de desligamentos através do programa *IEEE Flash* versão 1.9 que utiliza o método descrito em (9).

Após a determinação das severidades e probabilidades, as matrizes de risco operacional desempenho para as LT's estudadas são apresentadas na Tabela 5.

Severidade	Risco Atual	Risco RCP 4.5	Risco RCP 8.5
Leve	1	1	1
Moderado	6	2	2
Grave	3	3	3
Severo	4	4	4
Catastrófico	20	25	25

a) LT Oeste

Severidade	Risco Atual	Risco RCP 4.5	Risco RCP 8.5
Leve	2	1	1
Moderado	6	2	2
Grave	9	15	15
Severo	4	4	4
Catastrófico	15	5	5

b) LT Litoral

TABELA 5 - Risco operacional desempenho para cenário atual (medições) e cenários de projeções climáticas.

Os resultados indicam alto risco para severidade catastrófica (2 desligamentos a cada 100 km por ano) em qualquer cenário climatológico para a LT Oeste. Já para a LT Litoral o cenário de mudanças climáticas é mais otimista que o risco atual (histórico até 2010). Observando os eventos reais de desligamento das duas LT's, através das estatísticas de análise de ocorrências, foi possível perceber que não há concordância com os resultados obtidos. Isso é devido a concentração da análise ser em apenas uma variável, que é a densidade de descargas atmosféricas incidentes na terra. Como visto na seção 4, outras variáveis têm importância nesse tipo de análise, principalmente relacionadas com o sistema de aterramento das torres.

## 6.0 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram avaliados os riscos operacionais do tipo capacidade e do tipo desempenho. A aplicação direta do protocolo PIEVC no caso do risco operacional capacidade não foi possível, devido ao caráter simultâneo das variáveis aleatórias temperatura ambiente, velocidade e direção do vento, radiação solar. A probabilidade de ultrapassagem da capacidade das LT's depende das probabilidades conjuntas dessas variáveis. Sendo assim, o risco térmico representa diretamente o risco operacional capacidade.

O risco operacional desempenho também possui uma característica estatística dependente simultaneamente de diversos dados de projeto da LT e também de características ambientais. A aplicação direta do protocolo PIEVC na parte de desempenho apesar de não representar a realidade de desligamentos das duas LT's, indica que existe uma preocupação na monitoração futura da taxa de falha, uma vez que a densidade de descargas para o solo aumenta significativamente e esta é uma variável bem importante na análise. Para mitigação do risco operacional desempenho, existem algumas medidas que podem ser utilizadas para melhorar a taxa de falha por descargas atmosféricas. O procedimento mais usado é a diminuição da resistência de pé de torre com melhorias no projeto dos contrapesos ou ainda tratamento do solo para diminuição da sua resistividade contribuindo para um maior espalhamento da descarga atmosférica no solo diminuindo por consequência desligamentos provocados por *backflashover*. Outras alternativas também podem ser usadas como instalação de para-raios de LT, instalação de estais em estruturas autoportantes ou mesmo aumento do número de isoladores ou troca por tipos com características mais favoráveis de suportabilidade.

Os serviços climáticos dedicados às análises realizadas nesse trabalho contribuem para uma localização mais precisa das regiões da LT com possíveis problemas de distância cabo-solo. Desse modo, poderá ser realizada uma alocação mais exata de horas de trabalho, de material e infraestrutura necessária com um bom planejamento baseado nesse tipo de análise apresentada.

Para a verificação de desempenho frente às descargas atmosféricas, os serviços climáticos em conjunto com as estatísticas de desligamentos podem antecipar ações corretivas ou preditivas nos elementos da LT que assegurem melhora no próprio desempenho e por consequência evitem até mesmo possíveis penalizações.

Vale destacar que o propósito de parceria multidisciplinar entre agentes de transmissão e agentes de climatologia, que fornecem os serviços climáticos, é de relevada importância. A partir dessa interação, melhorias nos serviços climáticos podem ser realizadas para que sejam cada vez mais dedicados ao propósito de análise de risco de infraestruturas específicas no ambiente de operação.

## 7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) FORÇA TAREFA ABRATE/ONS. Cálculo da Ampacidade Sazonal de Longa Duração das Linhas de Transmissão da Rede Básica; 2016.
- (2) ONS. Procedimentos de Rede – Submódulo 2.7 – Requisitos Mínimos para Linhas de Transmissão, 2020.
- (3) ENGINEERS CANADA. *Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee – Engineering Protocol for Infrastructure Vulnerability Assessment and Adaptation to a Changing Climate*, June 2016.
- (4) CIGRÉ WG 22.12. *Thermal Behaviour of Overhead Conductors*, August 2002.
- (5) NOTA TÉCNICA ANEEL nº 38. Procedimentos para a Determinação da Capacidade Operativa das Instalações de Transmissão Integrantes da Rede Básica e das Demais Instalações de Transmissão Pertencentes ao Sistema Interligado Nacional, das Funções de Transmissão e dos Pagamentos Base Correspondentes, Novembro de 2005.
- (6) SAKAGAMI, Y. Mapeamento do Risco Térmico em Linhas Aéreas de Transmissão Com Base em Dados de Modelo Numérico Atmosférico – Dissertação de Mestrado – UFSC, Junho de 2010.
- (7) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão e Energia Elétrica - NBR 5422, *Draft13*, Maio de 2011 (em processo de revisão).
- (8) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Proteção Contra Descargas Atmosféricas Parte 2: Gerenciamento de Risco – NBR 5419, Maio de 2015.
- (9) IEEE 1243-1997 – *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*, December 1997.

## DADOS BIOGRÁFICOS

### (1) JULIAN LUIZ REIS



Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Regional de Blumenau (FURB), Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração Sistemas de Energia Elétrica com ênfase em transitórios eletromagnéticos pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Já atuou como engenheiro de projetos de subestações na Companhia de Geração e Transmissão de Energia Elétrica do Sul do Brasil (CGT Eletrosul). Atualmente, atua como engenheiro de estudos elétricos de potência na mesma empresa. Interessa-se por Linhas de Transmissão, Transitórios Eletromagnéticos, Modelagem e Campos Eletromagnéticos.

### (2) DIEGO LUIS TEDESCO DANDOLINI

Engenheiro Civil Formado pela UFMS - Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. MBA Projeto, execução e controle de Estruturas e Fundações- IPOG. Administrador pela UNISUL/ FGV. Engenheiro de Manutenção Sênior atuando na área de Linhas de Transmissão da Eletrosul, responsável pelas demandas da área de Engenharia Civil (inspeções, diagnósticos, especificação e acompanhamento de implantação de soluções de Engenharia. Engenheiro Líder de projeto para implantação de Parque Eólico. Engenheiro residente de Pequena Central Hidrelétrica. Engenheiro de Projetos PCH e UHE. Engenheiro Coordenador de projetos de PCH. Gerente da área de Engenharia de Manutenção de Linhas de Transmissão.

### (3) JACIRA PRICHULA

Graduada em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria. Atualmente atua como Engenheira Florestal e Analista Ambiental em trabalhos técnicos relacionados a gestão corporativa e licenciamento ambiental de empreendimentos de geração hídrica e eólica e sistemas de transmissão, desenvolvendo atividades vinculadas gestão de processos ambientais, avaliação de risco, supervisão ambiental, avaliação de impactos ambientais, supervisão e execução de medidas mitigadoras e compensatórias e mapeamento temático. Tem interesse em ecologia, meio ambiente e setor elétrico.