

Metodologia de Cálculo de Ampacidade de Linhas Aéreas de Transmissão Considerando a Influência da Camada Limite da Atmosfera

Carlos A. M. Do Nascimento e João A. Vasconcelos

Resumo – Este artigo apresenta uma nova metodologia de cálculo de ampacidade de linhas aéreas, a qual utiliza dados da velocidade do vento obtidos por meio da análise da camada limite da atmosfera – CLA na determinação do vão crítico. Está baseada na dificuldade e no alto custo de monitorar os parâmetros climatológicos ao longo da linha aérea, em especial a variação do vento. Nessa metodologia proposta, os vãos com menor velocidade de vento e simultaneamente com menor distância livre são definidos como vãos críticos e são aqueles que limitarão a capacidade térmica da linha. Os resultados obtidos na aplicação da metodologia em linha aérea de 138 kV, com 133 vãos, demonstram a consistência e sua aplicabilidade. Esta metodologia pode ser aplicada tanto na fase de projeto como na fase de operação da linha. Neste último caso, poder-se-á operar a linha aérea com maior segurança e com possibilidade de maximizar a transmissão.

Palavras-chave – Ampacidade, Linhas de Transmissão, Método Determinístico, Método Probabilístico e Parâmetros Climatológicos.

I. INTRODUÇÃO

Um ponto relevante para a melhoria do processo de cálculo da ampacidade é a necessidade de se estabelecer ao longo de todos os vãos de uma dada linha aérea os valores dos parâmetros climatológicos velocidade do vento, temperatura ambiente e radiação solar [1]. O monitoramento das condições climatológicas ao longo de toda a linha aérea por meio de estações climatológicas é de custo proibitivo [2], sobretudo para linhas longas. Assim, um ponto de partida plausível para se trabalhar na determinação da velocidade do vento, que é o parâmetro climatológico de maior influência no cálculo da ampacidade, é a utilização do estudo numérico da camada limite da atmosfera - CLA¹ [3] e [4] para a região da linha

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

Carlos A. M. Do Nascimento trabalha na Cemig Distribuição S.A (e-mails: caxandre@cemig.com.br).

João A. Vasconcelos UFMG (e-mail: vasconcelos.joa.antonio@gmail.com)

¹ A Camada Limite Atmosférica (CLA), também conhecida como Camada Limite Planetária (CLP), possui altura típica de 1 km, localiza-se na baixa

aérea. Na validação do modelo da CLA é preciso dispor da topografia digital do terreno e de medidas de velocidade do vento em diversos pontos sobre a fronteira da região e em seu interior. Uma vez validado o modelo, é preciso apenas efetuar simulações com diversas condições de fronteira para formação de um banco de dados que será utilizado na determinação dos vãos críticos climatológicos, isto é, vãos com menor valor de velocidade de vento. É importante salientar que ainda não existe uma metodologia proposta na literatura para a determinação dos vãos críticos [5], [6] e [7]. Neste contexto, o objetivo geral desse trabalho é apresentar uma nova metodologia de cálculo da ampacidade – AmpCLA, que seja mais realista do que as metodologias tradicionais de cálculo [8] e [9]. Na apresentação que se segue, são sucintamente apresentados, o método de cálculo de ampacidade determinístico, o algoritmo para o cálculo da temperatura do condutor, o critério de determinação do vão crítico, a metodologia proposta (AmpCLA) e a sua aplicação em uma linha aérea de 138 kV em operação.

II. CÁLCULO DA AMPACIDADE

A IEEE Std 738TM-2006 [8] define a *Capacidade Térmica em Regime Permanente* como sendo “a corrente elétrica constante para a qual a temperatura do condutor é igual à temperatura máxima permitida para condições climatológicas especificadas e para características do condutor sob a suposição de que o condutor se encontra em equilíbrio térmico. Considerando a equação de equilíbrio térmico (1) em regime permanente,

$$P_j + P_s = P_r + P_c \quad (1)$$

é possível determinar qual é a corrente máxima que pode passar pelo condutor ao se considerar que a taxa de perda por efeito Joule. Isto é,

$$R(T_c) I^2 + P_s = P_r + P_c \quad (2)$$

Logo,

$$I = \sqrt{\frac{P_r + P_c - P_s}{R(T_c)}} \quad (3)$$

troposfera e por isto sofre diretamente a influência da superfície. A CLA é a camada inferior da troposfera, em contato direto com a superfície terrestre, que apresenta uma escala de altura de 1 a 2 km (durante o dia) e entre 0 e 100 m (durante a noite).

Em (1)-(3), P_J , P_S , P_R e P_C são respectivamente a taxa de ganho de calor por efeito Joule, a taxa de ganho de calor por radiação solar, a taxa perda de calor por irradiação térmica do condutor e a taxa de perda de calor por convecção, dados em W/m. Os parâmetros R e T_C são a resistência por unidade de comprimento (Ω/m) e a temperatura do condutor ($^{\circ}C$).

O cálculo da capacidade térmica do condutor em regime permanente é normalmente feito para uma temperatura máxima do condutor especificada no projeto da linha (por exemplo: $T_C = T_{max} = 70$ ($^{\circ}C$)) e condições climatológicas conservadoras, isto é velocidade do vento entre 0,6 e 1,2 (m/s), temperatura ambiente no verão entre 30 e 45 ($^{\circ}C$).

III. CÁLCULO DA TEMPERATURA DO CONDUTOR

As taxas de perda de calor por convecção (P_C) e irradiação (P_R) não são linearmente dependentes da temperatura do condutor, assim, a equação de equilíbrio térmico (1) pode ser resolvida para determinar a temperatura do condutor em termos da corrente e variáveis climáticas através de um processo iterativo [10], isto é, dada a corrente que circula pelo condutor, segue-se os seguintes passos:

- Assume-se uma temperatura de referência para o condutor.
- Calculam-se as taxas de perdas de calor por convecção e irradiação.
- Calcula-se a corrente do condutor para esta temperatura de referência.
- Comparam-se os valores da corrente calculada através da equação (3) com a corrente que circula no condutor.
 - Se as correntes são iguais, pára-se o processo e a temperatura corrente é a solução procurada.
 - Se as correntes são diferentes, a temperatura do condutor de referência é então aumentada se o valor da corrente calculada é inferior ao valor da corrente do condutor. Caso contrário a temperatura é diminuída.
- Retorna-se ao passo b.

IV. CRITÉRIO PARA LOCALIZAÇÃO DO VÃO CRÍTICO

A determinação do conjunto de vãos críticos é importantíssima, pois se ocorrer alguma falha, com certeza a grande probabilidade é de que ocorra em um destes vãos. A definição de vão crítico juntamente com os fatores que os influenciam são elegantemente discutidos em [2]. Basicamente os vãos críticos são aqueles que possuem a menor velocidade de vento e concomitantemente possuem a menor distância livre entre o condutor e o objeto aterrado mais próximo.

Na metodologia AmpCLA, a determinação dos vãos críticos é implementada de forma original e de baixo custo se comparada com o monitoramento ao longo de toda a linha, conforme mencionado em [2]. A diferença basicamente consiste nos valores de velocidade considerados, pois na metodologia proposta, o vão crítico em termos da velocidade do vento é identificado através de simulação da camada limite da atmosfera, com condição de fronteira prescrita ($v = 1$ (m/s) e no mínimo quatro direções de incidência no domínio de simulação). Os vãos que possuírem velocidades menores que 1 (m/s) são considerados vãos críticos climatológicos. Este

valor de velocidade de referência é um critério técnico dependente da região do planeta considerada.

Matematicamente, seja V_{ce} o conjunto de vãos críticos elétricos quanto à distância livre [11], isto é, são vãos que possuem distância livre inferior a uma determinada distância de referência; e V_{cc} o conjunto de vãos críticos climatológicos, isto é, são vãos com menor valor de velocidade do vento².

Observe que um vão pertencente a V_{ce} é provavelmente um vão com maior probabilidade de violação da distância mínima de segurança entre condutor – objeto aterrado mais próximo do que um vão não pertencente a V_{ce} . Portanto, um vão pertencente a V_{ce} possui maior risco de falha elétrica. Por outro lado, um vão que pertença a V_{cc} possui menor capacidade de refrigeração do condutor e, portanto, maior risco térmico.

Os vãos que pertencem a ambos os conjuntos V_{ce} e V_{cc} formam o conjunto $V_{c\cap e}$ de vãos da linha aérea. Matematicamente, $V_{c\cap e}$ é o conjunto formado pela interseção entre os conjuntos V_{ce} e V_{cc} .

$$V_{c\cap e} = V_{ce} \cap V_{cc} \quad (4)$$

Sobre o conjunto de vãos $V_{c\cap e}$ deve-se ainda excluir os vãos dominados ao se aplicar o critério de não-dominância³ quanto à velocidade do vento e distância livre. Isto é, deve-se excluir o vão que comparativamente com qualquer outro pertencente ao conjunto $V_{c\cap e}$ tenha maior valor de velocidade do vento e altura livre. O resultado da aplicação do critério de não-dominância constitui o conjunto de vãos críticos da linha e será denominado de conjunto V_c .

Observe que os vãos pertencentes a V_c constituem uma fronteira não-dominada e são aqueles que possuem concomitantemente as menores distâncias livres e as menores velocidades de vento dentre todos os vãos da linha aérea. Isto é, são os vãos críticos do ponto de vista do risco de falha, isto é, risco térmico ou elétrico.

Uma vez determinado o conjunto de vãos críticos V_c , deve-se então determinar o vão mais crítico, através do cálculo da temperatura do condutor de cada um destes vãos e sua nova distância livre correspondente. O vão que apresentar a menor distância livre dentre todos os vãos pertencentes a V_c e ainda se aproximar da distância mínima de segurança é o vão mais crítico de toda a linha aérea.

V. CAMADA LIMITE DA ATMOSFERA - CLA

A região da CLA é definida como sendo uma fina camada da atmosfera, adjacente à superfície terrestre (até 2 km de altura), em que o escoamento do vento apresenta um elevado número de Reynolds. Esse escoamento ocorre em diferentes

² Com ângulo de ataque de 90° em relação ao eixo do condutor.

³ um vetor $u = (u_1, \dots, u_k)$ domina um outro vetor $v = (v_1, \dots, v_k)$ (representado por $U \leq V$) se e somente se u é parcialmente menor que v . Isto é, $\forall i \in \{1, \dots, k\}, u_i \leq v_i$ e $\exists i \in \{1, \dots, k\} | u_i < v_i$.

escalas, onde cada escala, descrita em termos de domínio computacional, utiliza modelos distintos. Esses modelos utilizam as equações constitutivas gerais [3], apresentando diferenças apenas nas simplificações dos termos fonte, que depende principalmente do domínio computacional e da estratificação térmica. As equações que regem estes escoamentos geofísicos são as equações de continuidade, de conservação de quantidade de movimento, de conservação de energia e de conservação da espécie química. Os modelos para simulação dos campos de velocidade de vento são classificados em quatro classes de modelos: circulação global, predição de climas, meso-escalas e micro-escala. O modelo de circulação global é caracterizado por utilizar domínios entre 200 e 500 km ao longo da superfície terrestre e são utilizados para analisar os campos de velocidade de vento. Os modelos de predição de clima utilizam por sua vez domínios entre 50 e 100 km e são utilizados para resolver problemas de frentes climáticas. Os modelos de meso-escalas utilizam domínios típicos entre 2 a 50 km e são empregados no estudo dos campos de velocidade de vento sobre topografias e, finalmente, os modelos micro-escala utilizam pequenos domínios específicos e são empregados no estudo da regionalização dos campos de velocidade de vento sobre a superfície terrestre. Esses modelos utilizam as mesmas equações constitutivas gerais com mais ou menos simplificações nos seus termos fonte. O estudo numérico sobre a CLA em topografia complexa para aplicação em estudos climatológicos foi introduzido por [4]. O detalhamento da modelagem da camada limite da atmosfera é apresentada no Apêndice A para não prejudicar a compreensão do artigo.

A. Simulação da CLA

A simulação da CLA foi realizada no âmbito deste utilizando sistema computacional CFX da ANSYS [12]. A metodologia de simulação consistiu dos seguintes pontos:

- 1) condição de contorno logarítmica com valor de referência da velocidade do vento definido a 10 metros de altura do solo e igual a 1 (m/s) (veja apêndice A, equação (11));
- 2) direção do vento em relação à referência geográfica segundo os seguintes ângulos de incidência (45; 135; 225; 315°C) (veja Figura 1);
- 3) atmosfera neutra, isto é, número de Froude superior a 1000.

Foram realizadas quatro simulações, uma para ângulo de incidência do domínio. Após as simulações, foram identificados os vãos críticos climatológicos da linha aérea, isto é, quais vãos possuíam velocidade do vento inferior a 1 (m/s). Naturalmente, maior número de ângulos de incidência poderiam ser considerados para maior precisão na determinação do conjunto de vãos críticos climatológicos.

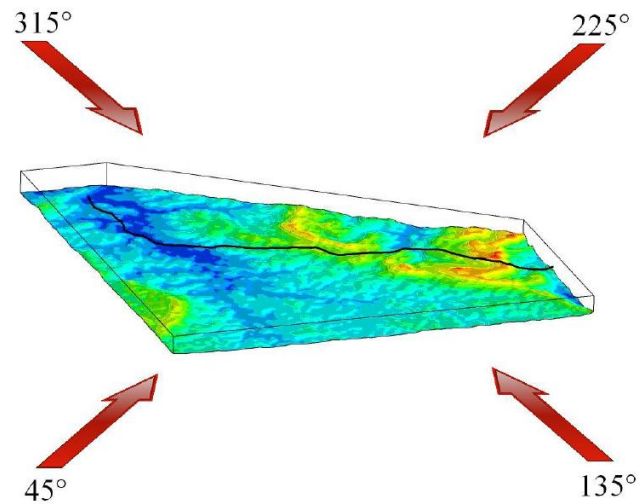


Figura 1 - Domínio de simulação com os ângulos de incidência do vento.

VI. METODOLOGIA AMPCLA

A metodologia AmpCLA proposta neste trabalho foi desenvolvida com base em informações de velocidade do vento, obtidas via análise da camada limite atmosférica, para determinação do conjunto de vãos críticos climatológicos em uma dada linha aérea e na redefinição de ampacidade de linha em operação. A metodologia AmpCLA pode ser resumida no seguinte conjunto de etapas:

- 1) Selecionar os parâmetros da linha aérea a ser estudada.
- 2) Discretizar o domínio de estudo, região topográfica digitalizada contendo todos os vãos da linha aérea, utilizando um malhador apropriado.
- 3) Efetuar simulações da CLA conforme descrito no item V.
- 4) Identificar os Vãos Críticos Climatológicos – V_{cc} , a partir das menores amplitudes de velocidade do vento simuladas na etapa 3, menor que 1 m/s, conforme item IV.
- 5) Identificar os Vãos Críticos do ponto vista elétrico - V_{ce} , conforme descrito no item IV.
- 6) Selecionar os vãos críticos não-dominados por meio da interseção do conjunto de vãos V_{ce} e V_{cc} e aplicação do critério de não-dominância conforme descrito no item IV. Armazenar o conjunto de vãos resultante em um vetor V_c .
- 7) Calcular a temperatura do condutor para o conjunto de vãos pertencentes ao conjunto V_c utilizando o método iterativo em regime permanente conforme descrito no item III. e considerando a velocidade de vento calculada em V_{cc} conforme etapa 4.
- 8) Recalcular as distâncias livres no conjunto de vãos V_c utilizando a temperatura do condutor obtida na etapa 7.
- 9) Identificar o pior caso, isto é, de menor distância livre.
- 10) Calcular a ampacidade determinística (item II.) para o vão crítico identificado em 9.

Esta metodologia tem a vantagem de permitir a identificação

do vão crítico sem a necessidade de monitoramento de nenhum vão da linha aérea. Uma vez encontrado o vão crítico pode-se agora monitorar a temperatura do condutor através de um sensor tipo Power Donut e calcular a ampacidade em tempo real. O custo financeiro do monitoramento fica extremamente reduzido em relação às outras metodologias, pois se espera que o número de vãos críticos seja pequeno quando comparado com o número total de vãos da linha aérea.

VII. APLICAÇÃO PRÁTICA DA AMPCLA

A metodologia proposta foi aplicada na determinação da ampacidade de uma linha aérea de transmissão projetada utilizando os seguintes parâmetros:

- 1) Condutor tipo Linnet ou 336 (mcm)
- 2) Corrente elétrica = 510 (A) = 1 PU
- 3) Tensão da linha = 138 (kV)
- 4) Radiação solar = 1000 (W/m²)
- 5) Velocidade do vento medido a 10 metros de altura do solo = 1 (m/s)
- 6) Ângulo do vento em relação ao eixo do condutor = 90 (°)
- 7) Temperatura ambiente = 30 (°C)
- 8) TN: Temperatura normal do condutor = 70 (°C)
- 9) TE: Temperatura de emergência do condutor = 90 (°C)

A. Etapa 1: Seleção da Linha

A linha em estudo possui 133 vãos distribuídos ao longo de 52 km de comprimento na região de Acuruí-MG. As distâncias livres mínimas, em todos os vãos, são calculadas ou retiradas diretamente do projeto da linha. Para fins de ilustração é mostrado na Figura 2 um vão da linha.

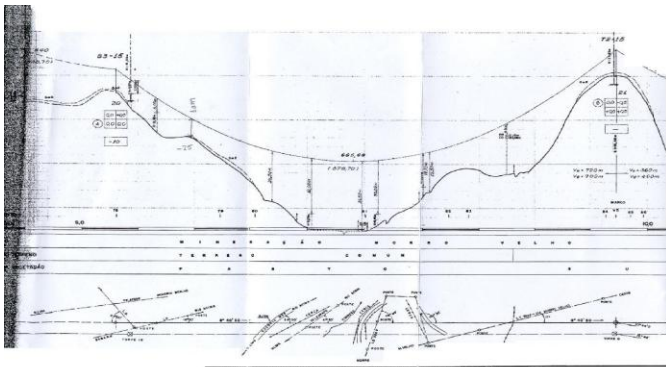


Figura 2 – Perfil e Planta da Linha de 138 kV em estudo.

B. Etapa 2: Discretizar o Domínio Computacional da Linha

O domínio contendo a linha aérea deve ser discretizado de forma apropriada utilizando algum malhador em 3D. Neste trabalho, foi utilizado o malhador da referência [12]. A Figura 3 ilustra uma malha da região contendo parte da linha aérea.

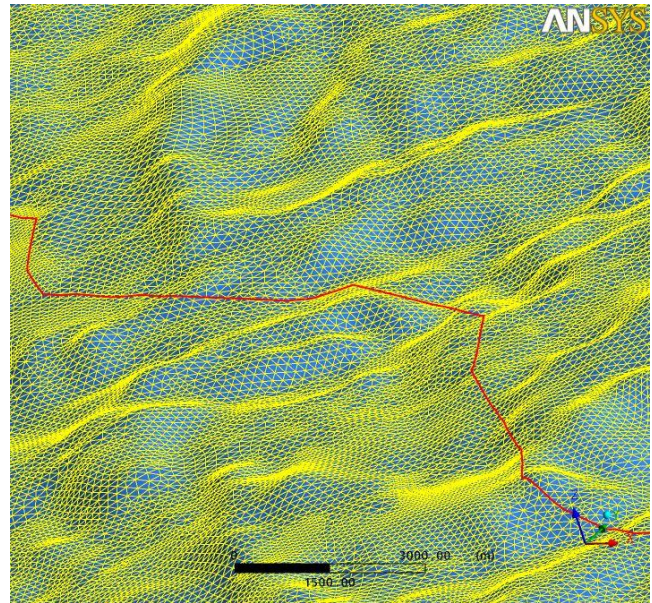


Figura 3 – Discretização do domínio da linha de transmissão para análise da camada limite.

C. Etapa 3: Simulação da CLA

A CLA foi simulada com a velocidade de vento na fronteira de entrada da região igual a 1 (m/s), para cada uma das 4 direções do vento (45; 135; 225; 315°C). Dos resultados numéricos obtidos com estas simulações foram então extraídas as velocidades de vento em todos os vãos ao longo da linha aérea. O menor resultado de velocidade dentre os quatro valores extraídos para todos os vãos foi considerado como a velocidade crítica climatológica do vão. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos para alguns poucos vãos.

Tabela 1 Resultados obtidos com a simulação da CLA.

Vão	Ângulo de Ataque do Vento (Figura 1) (°)	Módulo da Velocidade do Vento Simulado (m/s)
19-20	45	3.8
19-20	135	1.4
19-20	225	1.1
19-20	315	4.8
20-21	45	3.5
20-21	135	1.2
20-21	225	0.9
20-21	315	4.1
21-22	45	3.7
21-22	135	1.2
21-22	225	1.0
21-22	315	3.8

D. Etapa 4: Identificar os Vãos Críticos Climatológicos - Vcc

A Figura 4 mostra os resultados da velocidade do vento (para 4 simulações da CLA) em função dos vãos da linha aérea. O valor mostrado na Figura 4 é o menor valor de velocidade de vento obtido em 4 simulações (ver valor em negrito da Tabela 2), uma para cada ângulo de ataque (45; 135; 225; 315°C) e com a velocidade do vento na entrada de 1 (m/s). Analisando a Figura 4, observa-se que os resultados numéricos para a velocidade do vento são, em apenas 3 do total de 133 vãos, inferiores ao valor de 1 m/s imposto como condição de fron-

teira na entrada da região de estudo. Nos vãos com menor velocidade de vento espera-se ter uma temperatura no condutor mais elevada e, conseqüentemente redução na mínima distância livre e maior risco de falha elétrica.

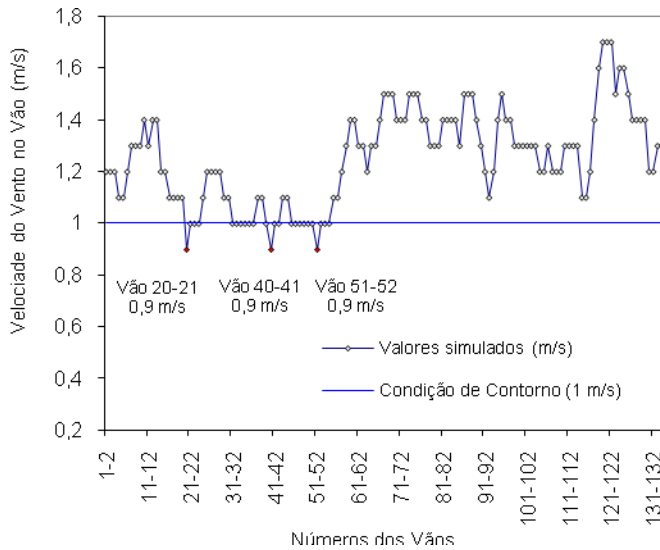


Figura 4 Velocidade do vento nos vãos da linha aérea de 138 kV.

Os vãos críticos climatológicos da linha aérea estão mostrados na Tabela 2, especificamente os vãos (20-21, 40-41 e 51-52), que correspondem à velocidade do vento menor que 1,0 (m/s).

Tabela 2 Vãos Críticos Climatológicos - V_{cc}.

Vão	Velocidade do Vento Simulada (m/s)	Distância livre (m) para velocidade do vento igual a 1 (m/s)
20-21	0,9	10
40-41	0,9	10
51-52	0,9	14

E. Etapa 5: Identificar os Vãos Eletricamente Críticos- V_{ce}

A localização dos vãos eletricamente críticos – V_{ce} é feita analisando o projeto eletromecânico da linha aérea em relação às distâncias entre o objeto aterrado mais próximo e o condutor aéreo, e verificando se esta distância é inferior a determinado valor de referência (h_{ref}), a qual deve ser superior à distância mínima de segurança especificada em norma técnica (h_{min}). Por exemplo, seja h_{ref} = 10 (m) para o caso em que a distância mínima de segurança é segundo norma técnica h_{min} = 7 (m) para linhas aéreas de 138 kV. A Tabela 3 mostra os resultados desta análise com a identificação dos vãos críticos segundo o critério de segurança adotado. Observa-se que dentre os 133 vãos da linha, apenas 5 possuem alturas iguais a 10 (m). Nenhum vão desta linha possui altura inferior a este valor de referência.

Tabela 3 Vãos Críticos Elétrico – V_{ce} identificados no perfil e planta original da linha (ver Figura 2).

Vão	Velocidade do Vento Simulada (m/s)	Distância livre (m) para velocidade do vento igual a 1 (m/s)
3-4	1,1	10
19-20	0,9	10
20-21	0,9	10
39-40	1,0	10
40-41	0,9	10

F. Etapas 6, 7, 8 e 9

A interseção entre os conjuntos V_{cc} e V_{ce}, isto é, V_{cc ∩ ce} = V_{cc} ∩ V_{ce} = {20-21, 40-41, 51-52} ∩ {3-4, 19-20, 20-21, 39-40, 40-41} = {20-21, 40-41}. Aplicando o critério de não-dominância quanto aos pares (velocidade do vento, distância livre), se percebe que os dois vãos (20-21) e (40-41) são ambos os críticos e com os mesmos valores de velocidade de vento e distância livre. Efetuando os novos cálculos de temperatura do condutor e da distância livre obtém-se para estes vãos valores idênticos, respectivamente iguais a 72,6 (°C) e 9,9 (m). Esses dois valores violam os limites requeridos pelo projeto eletromecânico dessa linha.

Outra análise alternativa para determinar o conjunto não-dominado é plotar os dados de todos os vãos V_{cc} e V_{ce} num gráfico de velocidade de vento versus distância livre, depois de recalculada a distância livre para a velocidade de vento simulada em V_{cc}, e aplicar o critério de não-dominância. A Figura 5 ilustra este procedimento considerando o conjunto de vãos pertencentes a V_{cc} ∪ V_{ce}.

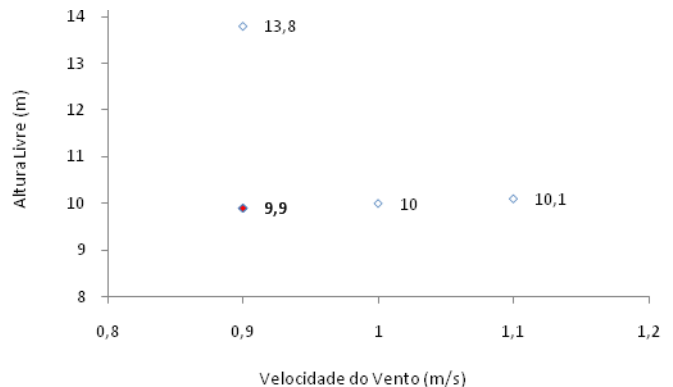


Figura 5 Determinação dos vãos não-dominados.

G. Etapa 10: Calcular a Ampacidade Determinística nos Vãos Críticos- V_c

A ampacidade calculada no vão crítico define a ampacidade de toda a linha aérea. Dessa forma, para a velocidade de vento de 0,9 (m/s), e o limite da temperatura de projeto dessa linha aérea igual a 70 (°C), resulta em 0,965 (PU) de capacidade de transmissão, o que é 3,5% menor do que a ampacidade original calculada para a velocidade de vento de projeto igual a 1 (m/s) e temperatura do condutor igual a 70 (°C).

Naturalmente o ideal seria efetuar um maior número de

simulações da CLA com diferentes condições de incidência do vento e que fossem as mais realistas possíveis. No entanto, as poucas simulações aqui apresentadas têm por objetivo apresentar a metodologia desenvolvida em uma aplicação real.

Este resultado mostra que esta linha aérea poderia ser monitorada em tempo-real em apenas dois vãos do total de cento e trinta e três. Este monitoramento poderia ser feito via sensores para medição da temperatura do condutor ou distância livre. Esta informação é certamente de grande valia para a concessionária, pois o dispêndio de recursos para monitoramento da linha aérea visando o aumento de segurança e a possibilidade no aumento de capacidade de transmissão da linha poderia ser feito com um pequeno investimento.

Observa-se também que a metodologia pode ser aplicada tanto nas fases de projeto quanto na operação da linha aérea. Na fase de projeto para permitir ao projetista uma visão realista da linha quanto aos vãos críticos e garantir já na fase de projeto a determinação da ampacidade com maior precisão. Na fase de operação para permitir a supervisão dos vãos críticos e com isto aumentar a confiabilidade da linha e possivelmente até maximizando a transmissão de energia elétrica.

VIII. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou de forma didática a nova metodologia AmpCLA, a qual permite identificar os vãos críticos da linha e conseqüentemente o seu monitoramento no caso de linhas existentes. Para demonstrar a aplicação da metodologia em um caso real, utilizou-se uma linha aérea de 133 vãos, de 138 kV, na região de Acuruí – MG. Os resultados obtidos mostram a consistência da metodologia, bem como a necessidade de um pequeno investimento para permitir o monitoramento em tempo real e conseqüentemente a exploração máxima da capacidade de transmissão da linha, auxiliando a equipe de operação das concessionárias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ELECTRA 174 - WG 22.12. The thermal behaviour of overhead conductors”, October 1997.
- [2] RAMON, G.J. Dynamic Thermal Line Rating: Summary and Status of the State-of-the-Art Technology. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 3, July 1987.
- [3] UCHIDA, T. and ONYA, Y, Numerical Simulation of Atmospheric Flow Over Complex Terrain, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 81, p. 283-293, 1999.
- [4] TAYLOR P.A. and TEUNISSEN, H.W., The Askervein Hill Project: Overview and Background data. Boundary Layer Meteorology, v.39, pp.15-39. 1987.
- [5] JAUFER, S. - Experiences with the Weather Parameter Method for the use in Overhead Line Monitoring systems – Group B2-105 - Cigre Session Paris/France/August-2008.
- [6] G. BRUNO, - Increasing Capacity of Two Italian Lines by the Adoption of Devices for Monitoring Environmental Conditions and Conductors Temperature or by Using High-Temperature Conductors – Group B2-102 – Cigre Session Paris/France/August-2008.
- [7] ANJAN, K. Deb. Powerline ampacity system, theory, modeling and applications – book, CRC Press – NY-USA, 2000.
- [8] IEEE P738/D1. Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors, January 2007.
- [9] CIGRE-Task Force B2.12.6, Guide for selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings. December 28, 2005.
- [10] MORGAN, V.T., - The Thermal Rating of Overhead-Line Conductors”, Part I. The Steady-State Thermal Model. 174, November 1982.

- [11] PLS-CADD™ (Power Line Systems - Computer Aided Design and Drafting - www.powline.com), USA.
- [12] CFX-5.5 - AEA Technology plc. Documentation. AEA Technology Engineering Software Ltd, United Kingdom, 2002.
- [13] HUSER, A., NILSEN, P.J., and SKATUN, H., Application of k-ε model to the stable ABL: pollution in complex terrain, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 67-68, pp. 425-436, 1997.
- [14] MONTAVON, C., Validation of a non-hydrostatic numerical model to simulate stratified wind fields over complex topography, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 74-76, 1998, pp. 273-282., 1998.
- [15] ZHANG – A comparison of numerical and physical modeling of stable atmospheric flow and dispersion around a cubical building - Atmosphere Environment Vol. 30, No. 8, pp. 1327-d 345, 1996.
- [16] WRIGHT, N.G., EASOM, G.J. - Non-linear k-ε turbulence model results for flow over a building at full-scale, Applied Mathematical Modelling 27, pp. 1013–1033, 2003.
- [17] MOREIRA, G. A. A., VALLE, R. M., CARVALHO, W. L. S. - Numerical simulation of neutral atmospheric boundary layer flow In: ENCIT 2008 - 12th Brazilian Congress of thermal Sciences and Engineering, 2008, Belo Horizonte/2008.

APÊNDICE A - MODELO MATEMÁTICO DA CLA

O modelo matemático da CLA é definido pelas equações (5) a (8) que representam, respectivamente, a conservação de massa, quantidade de movimento, equação de estado e equação de energia sob a decomposição de Reynolds e a aproximação de Boussinesq [16].

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \forall i = 1, 2, 3. \quad (5)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{p}{\rho_0} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - S_w \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \rho_0} = -\frac{\partial T}{T_0} \quad (7)$$

$$c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{Pr_T} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q \quad (8)$$

onde:

- u_i i-ésima componente cartesiana da velocidade do vento (m/s)
- x_i i-ésima coordenada cartesiana (m)
- p pressão (N/m²)
- ρ_0 massa específica de referência (kg/m³)
- k energia cinética por unidade de massa (m²/s²)
- t tempo (s)
- ν_t viscosidade efetiva (m²/s)
- S_w termo fonte (m/s²)
- C_p capacidade térmica do ar a pressão constante (W.s/kg°C)
- T temperatura (°C)
- Pr_T número de Prandtl turbulento (adimensional)
- Q taxa de geração de energia (W/m)

O termo S_w representa o termo de flutuação que considera o efeito da turbulência. A definição do termo de flutuação ca-

racteriza diversos modelos disponíveis na literatura. Usualmente, os modelos apresentados por [13], [14] e [15] utilizam a aproximação de Boussinesq e os modelos de turbulência são derivados do modelo $k-\varepsilon$ ($k \rightarrow$ turbulent kinetic energy, $\varepsilon \rightarrow$ the turbulent energy dissipation rate)

A. Domínio de Análise

A simulação da camada limite é feita sobre um domínio que possui na sua base o solo, com vegetação, água e ou construções, que colocam dificuldades para o movimento da camada de ar. O topo do domínio deve ser considerado alto o suficiente para que se possam considerar condições de fronteira tipo Neumann natural, sem que com isto haja perda de precisão nos resultados. Na entrada do domínio a condição de fronteira para modelo turbulento pode ser conforme o modelo $k-\varepsilon$, e o perfil da velocidade na entrada com distribuição logarítmica. Nas laterais se tem condição de simetria e na saída a condição de saída. A Figura 6 ilustra as superfícies do domínio onde as condições de fronteira devem ser definidas.

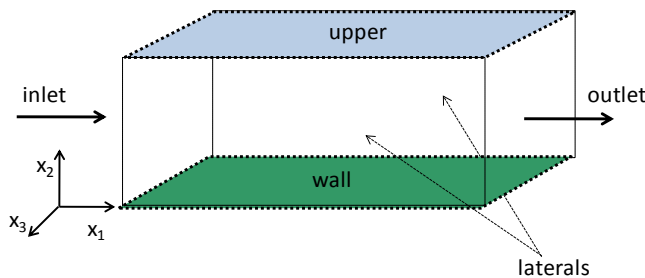


Figura 6 Ilustração das condições de fronteira.

B. Condições de Contorno – Modelo $k-\varepsilon$

As condições de contorno utilizadas na CLA pelo modelo de turbulência $k-\varepsilon$ estão associadas à energia cinética turbulenta k , e à sua taxa de dissipação ε . Neste modelo, as condições de entrada são dadas por (9) e (10)

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z} \quad (10)$$

onde

- u_* velocidade de fricção (m/s)
- κ constante de Von Karman ($\kappa=0.41$) (adimensional)
- C_μ constante empírica (adimensional)
- z altura (m)

C. Condições de Contorno na Entrada

O perfil logarítmico de velocidade na entrada é dado por (11) em função da altura z (m).

$$u(z)_{in} = u_{ref} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_o}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_o}\right)} \quad (11)$$

onde:

- $u(z)_{in}$ velocidade dada pelo perfil logarítmico modificado (m/s)
- u_{ref} velocidade de referência obtida a uma altura de 10 (m) em (m/s)
- z_{ref} altura de referência igual a 10 (m)
- z_o comprimento aerodinâmico da rugosidade (m)

Valores típicos de rugosidade são apresentados na Tabela I.

TABELA I
VALORES GERAIS DE RUGOSIDADE.

Região	z_o (m)
Cidade	1
Floresta	0,3
Grama baixa	0,03
Água	0,0001

D. Condições de Contorno na Saída e nas Laterais

O perfil de velocidade na saída e nas laterais é dado por condição de derivada nula em relação normal à superfície, para todas as grandezas θ envolvidas, conforme (12).

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} = 0 \quad (12)$$

E. Condições de Contorno no Solo (Parede)

A velocidade no solo é considerada nula em todas as direções, isto é $u_x = u_y = u_z = 0$.

F. Condições de Contorno na Superfície do Topo

A velocidade na superfície do topo, dada por (13), é considerada constante e não é mais influenciada pela rugosidade do solo.

$$u_w = U_\infty \quad (13)$$

As outras propriedades são consideradas constantes.

G. Tratamento das Forças de Empuxo Verticais

As forças de empuxo são consideradas no termo S_w da equação da conservação de quantidade de movimento (6), o qual é dado por (14).

$$S_w = g \cdot \Delta\rho = g \cdot (\rho - \rho_0) \quad (14)$$

onde:

- S_w termo fonte ($\text{kg/s}^2\text{m}^2$)
- g aceleração da gravidade (m/s^2)
- ρ massa específica do meio (kg/m^3)
- ρ_0 massa específica de referência ($\rho_0 = 1.185 \text{ kg/m}^3$)

Ao se considerar a variação $\Delta\rho$ constante durante a simulação, o número de Froude pode ser relacionado por (15) ao se considerar a relação entre as forças de inércia e de empuxo.

$$Fr = \frac{U_\infty}{\sqrt{g \cdot L \cdot \Delta\rho / \rho_0}} \quad (15)$$

onde:

U_∞ representa a velocidade desenvolvida acima de 500 metros (m/s)

$\Delta\rho$ variação da massa específica para a altura considerada (kg/m^3)

L altura do domínio (m)

g aceleração da gravidade (m/s^2)

Desta forma, o termo fonte em relação à altura z , o qual considera o efeito térmico, introduzido na equação da conservação de quantidade de movimento, pode ser escrito em [17] conforme (16).

$$S_w = \frac{U_\infty^2 \cdot \rho_0}{L \cdot Fr^2} \quad (16)$$

Finalmente, a intensidade das forças de empuxo devido aos efeitos térmicos do solo é obtida através de valores atribuídos ao número de Froude. A Tabela II mostra a relação entre o tipo da atmosfera e a faixa de valores atribuídos ao número de Froude.

TABELA II
VALORES GERAIS DO NÚMERO DE FROUDE.

F_r	Tipo de Atmosfera
> 1000	CLA Neutra
$10 < F_r < 1000$	CLA Estável
$-100 < F_r < 10$	CLA Instável

Resumidamente, as condições de fronteira e de turbulência são apresentadas na Tabela III.

TABELA III
CONDIÇÕES DE CONTORNO UTILIZADAS NO CFX PARA O MODELO SIMPLIFICADO [17].

Contorno	u_1	u_2	u_3	K	\mathcal{E}
Entrada (inlet)	$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$	$u_2 = 0$	$u_3 = 0$	$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}$	$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z}$
Fronteira de saída (outlet)	$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} = 0$	$\frac{\partial u_2}{\partial x_1} = 0$	$\frac{\partial u_3}{\partial x_1} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial x_1} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_1} = 0$
Solo (wall)	Parede sem deslizamento acoplada com funções de parede do modelo de turbulência			$\frac{\partial k}{\partial x_2} = 0$	$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z}$
Fronteiras laterais	$\frac{\partial u_1}{\partial x_3} = 0$	$\frac{\partial u_2}{\partial x_3} = 0$	$\frac{\partial u_3}{\partial x_3} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial x_3} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_3} = 0$
Céu (Symmetry)	$u_1 = U_\infty$	$\frac{\partial u_2}{\partial x_2} = 0$	$\frac{\partial u_3}{\partial x_2} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial x_2} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_2} = 0$