



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

BR/GOP/10
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - IX

GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- GOP

PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CARREGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

**Dirceu de Almeida
ELETROBRAS ELETRONORTE - Brasil**

RESUMO

A definição de carregamento máximo das linhas de transmissão tem sido perseguida objetivando um melhor aproveitamento do sistema elétrico, de forma a postergar obras e maximizar os recursos financeiros disponíveis.

Existem quatro fatores que restringem o transporte de energia em corrente alternada nas linhas de transmissão, são eles: a regulação de tensão, a estabilidade do sistema elétrico, limite térmico da linha de transmissão e limite térmico do condutor.

Neste trabalho, se estabelece os limites operacionais para a linha de transmissão e para o condutor através de ferramenta computacional desenvolvida em Visual Basic Application (VBA) existente no próprio EXCEL.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas aéreas de transmissão, ampacidade, equação de equilíbrio térmico, carregamento normal e de emergência, equação de mudança de estado.

1.0 - INTRODUÇÃO

Existem quatro fatores que restringem o transporte de energia em corrente alternada nas linhas de transmissão, são eles: limite imposto pela regulação de tensão, limite imposto pela necessidade de manter a estabilidade do sistema elétrico, limite térmico da linha de transmissão e limite térmico do condutor.

Neste trabalho, será apresentado ferramental computacional para avaliar as limitações impostas pelo limite térmico da linha e do condutor.

Conceitualmente, define-se o limite térmico da linha de transmissão como sendo a temperatura máxima que os condutores podem atingir sem comprometer as alturas de segurança entre o condutor – obstáculo. Já o limite térmico do condutor esta associado com a temperatura máxima que o condutor pode operar sem que exista comprometimento de sua capacidade elástica (características físicas) que ocorre quando o condutor atinge a temperatura de recozimento.

Toda linha de transmissão é projetada para operar até uma determinada temperatura de seus condutores de forma a manter suas distâncias de segurança.

Estas distâncias são função do tipo de travessia e da condição de carregamento e, infelizmente, acabam sendo comprometidas por imprecisões no projeto / construção, invasão de faixa, mudança de tipo de travessia, etc.

As distâncias (clearances) fase-solo representam um fator crucial na identificação da capacidade de carregamento elétrico da linha de transmissão.

As aferições destas distâncias requerem uma avaliação do comportamento eletromecânico da linha de transmissão, incorporando: a intensidade de corrente no condutor, a degradação gradativa dos condutores com o tempo (perda de capacidade elástica, oxidação com perda da capacidade de troca de calor com o meio), as condições ambientais (velocidade do vento, umidade, aquecimento solar, temperatura ambiente, etc.).

As distâncias de segurança estabelecidas em normas técnicas (por exemplo, NBR-5422), não devem ser violadas pelos condutores, mesmo aquecidos pelo efeito Joule e pela ação do sol.

Do que foi exposto acima, verifica-se que um fator crucial para a operação de uma linha de transmissão é a identificação correta dos limites operacionais para transporte da energia considerando estas situações.

No intuito de estabelecer estes limites com segurança, foram desenvolvidas metodologias de análise, como a elaborada pelo CCON(1) ou mais recentemente, pela ANEEL através de sua nota técnica 038/2005 – SRT/ANEEL Anexo A – Cálculo da Capacidade Operativa de Longa Duração das Linhas Aéreas de Transmissão (2). Ressalta-se que, a NBR-5422 não estabelece a utilização de nenhum modelo de ampacidade específico.

Mais recentemente, tem sido proposto a utilização de monitoramento “on-line” destas distâncias de segurança bem como, sensoreamento remoto de temperatura do condutor, velocidade do vento, etc., principalmente, em regiões costeiras, onde se espera ganhos no transporte de energia devido a maior influência dos ventos.

A utilização de uma ferramenta computacional com programação voltada para o EXCEL (planilhas) pode apresentar algumas vantagens, tais como: importação de insumos (vento, temperatura ambiente, etc) provenientes de estações meteorológicas / sensoriamento remoto ao longo das linhas de transmissão. Com estes insumos, é possível estabelecer as condições de carregamento das linhas de transmissão em tempo real usando uma abordagem determinística.

Além disto, a utilização da ferramenta computacional é bastante simples sendo basicamente, uma planilha do EXCEL com as possibilidades inerentes do EXCEL (ferramentas de análise / gráficas).

2.0 - METODOLOGIA

A metodologia utilizada na ferramenta computacional desenvolvida é a mesma adotada pelo extinto CCON que utiliza a equação clássica de equilíbrio térmico do condutor, ou seja, assume-se que os parâmetros atmosféricos que influenciam o estado térmico do condutor bem como, seu carregamento elétrico são constantes. Nesta situação todo o calor absorvido pelo condutor é igual ao calor dissipado.

A equação de equilíbrio, pode ser escrita como:

$$Q_J + Q_S = Q_R + Q_C \quad (1)$$

Onde:

- Q_J representa o aquecimento por efeito Joule e depende da temperatura do cabo condutor, da resistência efetiva do condutor e da corrente elétrica que atravessa o mesmo.
- Q_S representa o aquecimento devido ao efeito solar e depende da intensidade da radiação solar [W/m^2] e da capacidade de absorção da radiação solar por parte do cabo condutor.
- Q_R representa a dissipação de calor por irradiação e depende da diferença de temperatura entre o cabo condutor e o ambiente e da capacidade de emissão térmica do cabo condutor (emissividade).
- Q_C representa a dissipação de calor por convecção e depende entre outras coisas, da velocidade e da direção do vento que atravessa a linha de transmissão bem como, da temperatura ambiente (transmissão de calor que é acompanhada por transporte de massa). É um dos termos da equação que mais influência no estabelecimento do equilíbrio térmico.

Uma vez estabelecido a temperatura do condutor, deve-se averiguar se as distâncias de segurança (clearances) estão conforme preconizadas em normas (no Brasil, NBR-5422). A aferição destas distâncias requer uma avaliação do comportamento eletromecânico da linha de transmissão tanto em regime permanente quanto em situações de emergência de longa e de curta-duração; através da equação de mudança de estado de forma a identificar vãos críticos a terem suas alturas de segurança corrigidas ou monitoradas.

Para a correta aferição destas distâncias, necessita-se efetuar o levantamento de dados das linhas de transmissão em campo, para identificar a situação real da linha de transmissão (inventário através de formulários).

Os insumos necessários do campo são apresentados abaixo.

- Levantar por vão e por fase:
 - menor distância condutor-solo / obstáculo
 - menor distância entre condutores (travessia LT)
 - distância do vértice da catenária até o solo / obstáculo
 - distância a estrutura mais próxima
- Identificar o código de travessia: - (1) pedestres, (2) circ. máq. Agrícola, (3) rodovias, (4) ferrovia não eletrif.
 - (5) ferrovia eletrificada, (6) suporte de LT (ferrovia), (7) águas navegáveis
 - (8) linha transmissão, (9) linha telecomunicação, (10) telhados e terraços
 - (11) paredes, inst. transp.
- Outros registros necessários:
 - data e hora
 - temperatura ambiente
 - corrente

A metodologia recomendada pelo CCON era a determinística, porém, já tinha uma abordagem semi-probabilística uma vez que se utilizava como insumo de entrada nas análises; a média das máximas temperaturas diárias e a média das velocidades mínimas diárias para o vento, conforme a sazonalidade (estações do ano).

Esta abordagem prezava a segurança operativa da linha de transmissão sem o exagero de se adotar valores extremamente conservativos, como digamos, ausência de vento.

3.0 - O AVACALT

O AVACALT é um sistema de avaliação de carregamento das linhas de transmissão (regime normal e de emergência de longa e curta duração) baseado nas condições reais da linha de transmissão, obtidas de levantamento de campo.

A ferramenta é baseada em uma metodologia de cálculo já existente e empregada no setor elétrico (confiável), utilizando-se da linguagem de programação técnica conhecida como Visual Basic Application (VBA), que já vem embutida no Excel (planilhas eletrônicas).

A programação voltada a utilização de planilhas permitirá – no futuro - a importação de insumos (vento, temperatura ambiente, etc) provenientes de bancos de dados de estações meteorológicas e, o estabelecimento do carregamento da LT em tempo real, pelos centros de operação de sistemas elétricos.

3.1 Funcionalidades presente no AVACALT

- Permite inventariar as linhas de transmissão, levantando em campo suas características básicas para avaliação da real situação das linhas de transmissão.
- Permite definir os limites de carregamento em condições normais e de emergência de longa e curta duração para as linhas de transmissão (com e sem sol).
- Permite definir as condições que limitam a aplicação do carregamento nominal e de emergência bem como, identifica os vãos da linhas de transmissão que violam as alturas de segurança definidas em norma.
- Permite definir a relação de alturas a crescer para que as linhas de transmissão não violem as alturas de segurança normatizadas pela NBR 5422.
- Com algumas adaptações, se pode ter todas as funcionalidades descritas acima, para utilização em tempo real caso existam dados meteorológicos ao longo do percurso percorrido pela linha de transmissão.

3.2 Esquema de funcionamento do AVACALT

O menu de entrada do programa possui opções de entrada de dados / relatórios de saída das simulações via formulários ou via planilha do Excel, recursos para efetuar a simulação via formulário ou via planilha do excel e recursos para incorporar novos usuários e para finalizar o programa, conforme pode ser visto na Figura 1.



FIGURA 1 –Menu de entrada do AVACALT

Layout da interface de entrada de dados via formulário, possui diversas abas que separam os dados a serem inseridos por tipo / característica, facilitando a tarefa do usuário.

Para fins ilustrativos, apresentamos o formulário de dados necessários para as estruturas / condutores, na Figura2.

 Two screenshots of the data entry form. The left screenshot shows the 'Dados Gerais das Estruturas' tab with fields for 'Número da Estrutura', 'Comprimento do Vão', 'Hora da Medição', 'Temperat. Hora Medição', 'Tipo de Travessia', and distance measurements for three phases. The right screenshot shows the 'Dados do Condutor' tab with fields for 'Tipo Condutor', 'Resistência Condutor', 'Seção Cabo', 'Peso Alumínio', 'Coef.Dilatação', 'Tensão de Ruptura', 'Mod.Elast.Final', 'Seção do Alumínio', and various temperature and weight specifications. Both tabs include buttons for 'Incluir', 'Sair', 'Imprimir Insumos', and 'Limpar Todos Dados das Estruturas da Planilha (Novo Caso)'.

FIGURA 2 –Insumos de dados de estruturas e de condutores

Também, apresentamos o relatório de saída da simulação, que também, possui diversas abas que separam os resultados por tipo / característica, conforme pode ser visto na Figura 3.

 Two screenshots of the results report. The left screenshot shows the 'Correntes Máximas' tab with calculated current values for different scenarios. The right screenshot shows the 'Alturas Calculadas / Acréscimos Necessários para Limite Térmico da LT' tab with a table of calculated heights and required increments for various structures and phases.

Estrutura	Fase A	Fase B	Fase C	Acréscimo Fase A	Acréscimo Fase B	Acréscimo Fase C
002-2	5,9558	14,9558	20,9558	0,54	0	0
004-1	6,758	12,258	18,258	0	0	0
004-2	11,7107	17,7107	23,7107	0	0	0
006-1	8,4819	14,4819	20,4819	0	0	0
007-1	6,3119	12,9119	18,9119	0,19	0	0
011-2	6,8635	13,8635	19,8635	0	0	0

FIGURA 3 –Resultados das simulações apresentados nas diversas abas do AVACALT

O AVACALT faz automaticamente, todas as etapas de cálculos, com a escolha das formulações a empregar em função da idade dos condutores da linha de transmissão, do horário do levantamento dos dados em campo (hora da medição), do tipo do condutor (alumínio, alumínio com alma de aço), do tipo de carregamento (normal ou emergência), etc.

A equação de mudança de estado foi resolvida usando dois métodos (Newton e Biseção), de forma a se calcular a tensão de esticamento, conforme por ser visto pela Figura 4.

```

Dim TB_VAO As Currency
Dim TB_MEIN As Currency
Dim TB_PA As Currency
Dim TB_PAC As Currency
Dim PTCond As Currency
Dim Ca
Dim Cb
Dim TB_CDI
'Dim TB_TLTP As Currency
Dim CC
'Dim TB_DC As Currency
Dim PVento
Dim PesVirtCab
Dim DD

TB_VAO = Worksheets("Insumos").Range("D2").Value
TB_MEIN = Worksheets("Insumos").Range("L5").Value
TB_PA = Worksheets("Insumos").Range("G5").Value
TB_PAC = Worksheets("Insumos").Range("H5").Value
TB_CDI = Worksheets("Insumos").Range("I5").Value
TB_TLTP = Worksheets("Insumos").Range("B2").Value
TB_DC = Worksheets("Insumos").Range("D5").Value

PTCond = TB_PA + TB_PAC
Ca = (TB_MEIN * TB_SC * (PTCond ^ 2) * (TB_VAO ^ 2)) / (24 * (TB_TEIN ^ 2))
Cb = TB_MEIN * TB_SC * (AlCoCreep + ((TB_CDI * (TB_TLTP - 25))) - TB_TEIN
CC = Ca + Cb
'MagBox "O valor do termo C é de " & CC

PVento = 0.0036 * (TB_VMMedial ^ 2) * TB_DC
PesVirtCab = (PTCond ^ 2 + PVento ^ 2) ^ 0.5

DD = (TB_MEIN * TB_SC * (PesVirtCab ^ 2) * (TB_VAO ^ 2)) / 24
'MagBox "O valor do termo D é de " & DD

' -----Resolvendo pelo método de Biseção-----
Dim a As Single, b As Single, c As Single
Dim k As Integer, Nmax As Integer
Dim epsilon As Single
'-----Necessidade de definir CC e DD para usar Function-----
Dim CCC As Single, DDD As Single
epsilon = 0.1
Nmax = 1000
a = 0
b = 50000
CCC = CC
DDD = DD
Fa = f010(a, CCC, DDD)
Fb = f010(b, CCC, DDD)
If Fa * Fb > 0 Then
    MsgBox ("Para a = " & str(a) & " e b = " & str(b) & ", f(a)*f(b)>0." &
        & " Tente com novos valores de a e b - Rotina Biseção/TENSLT.")
    Exit Sub
End If
c = 0.5 * (a + b)
k = 0
Do While Abs(f010(c, CCC, DDD)) > epsilon And k < Nmax
    k = k + 1
    c = 0.5 * (a + b)
    Fc = f010(c, CCC, DDD)
    Fbc = f010(b, CCC, DDD) * f010(c, CCC, DDD)
    If Fbc > 0 Then
        b = c
    Else
        a = c
    End If
Loop
'MagBox "O valor da tensão de esticamento é de " & a
'MagBox "O valor do termo b é de " & b
Worksheets("Rascunho").Range("F2").Value = a
Worksheets("Rascunho").Range("y6").Value = a
'MagBox "O valor do termo f00 é de " & f00

Private Function f010(x As Single, CCC As Single, DDD As Single) As Single
    f010 = x ^ 3 + CCC * x ^ 2 - DDD
End Function

```

FIGURA 4 – Algoritmo parcial para resolver a equação de mudança de estado (catenária)

3.3 Testes de funcionamento do AVACALT

O AVACALT foi testado para duas linhas de transmissão distintas, com características bem diferentes entre si (tamanho dos vãos, cabos condutores, tamanho da cadeia de isoladores, etc.).

Uma destas linhas era na tensão de 230 kV e a outra na tensão de 69 kV (LT 69kV MAO-FLR).

Os resultados obtidos pelo AVACALT mostraram-se corretos para todos os vãos das LTs testadas e, nenhum tipo de problema de convergência ou instabilidade numérica foi detectado, conforme pode ser visto na Tabela 1.

I diurna (sem limites da norma)	I noturna (sem limites da norma)	I diurna emergência (sem limites da norma)	I noturna emergência (sem limites da norma)	I diurna (com limites da norma)	I noturna (com limites da norma)	Temperatura com limites da norma	I emergência diurna (sem limites norma)	tempo sobrecarga (minutos - diurna)	I emergência noturna (sem limites norma)	tempo sobrecarga (minutos - noturna)				
456,2	611,3	627,9	910,5				1068,2	10,0	1128,2	11,0				
Estrutura Analisada	Tipo de Travessia	Tamanho Vão	Horas Medição	Temperatura na Hora da Medição	Alterna Medida Fase A	Alterna Medida Fase B	Alterna Medida Fase C	Corrente na Hora da Medição	Alterna final fase A calculada para condições medidas	Alterna final fase B calculada para condições medidas	Alterna final fase C calculada para condições medidas	Acréscimo de alterna Fase A para atender a normalização	Acréscimo de alterna Fase B para atender a normalização	Acréscimo de alterna FaseC para atender a normalização
102 Linhas de energia elétrica		95	13	29	0,9	0,9	0,9	510	0,87	0,87	0,87	0,33	0,33	0,33
111 Rodovias, ruas e avenidas		150	11	31,5	6,8	6,8	6,8	505	6,71	6,71	6,71	1,29	1,29	1,29
115 Rodovias, ruas e avenidas		144	10	31	6,8	6,8	6,8	500	6,73	6,73	6,73	1,27	1,27	1,27
116 Rodovias, ruas e avenidas		118	10	33	5,4	5,4	5,4	500	5,35	5,35	5,35	2,65	2,65	2,65
117 Rodovias, ruas e avenidas		138	10	32	5,1	5,1	5,1	500	5,03	5,03	5,03	2,97	2,97	2,97
118 Rodovias, ruas e avenidas		154	9	29	6,9	6,9	6,9	500	6,84	6,84	6,84	1,16	1,16	1,16
127 Linhas de energia elétrica		83	14	30	2,1	2,1	2,1	480	2,07	2,07	2,07			
333 Linhas de energia elétrica		95	13	29	0,9	0,9	0,9	510	0,87	0,87	0,87	0,33	0,33	0,33
334 Rodovias, ruas e avenidas		150	11	31,5	6,8	6,8	6,8	505	6,71	6,71	6,71	1,29	1,29	1,29
335 Rodovias, ruas e avenidas		144	10	31	6,8	6,8	6,8	500	6,73	6,73	6,73	1,27	1,27	1,27
336 Rodovias, ruas e avenidas		118	10	33	5,4	5,4	5,4	500	5,35	5,35	5,35	2,65	2,65	2,65
337 Rodovias, ruas e avenidas		138	10	32	5,1	5,1	5,1	500	5,03	5,03	5,03	2,97	2,97	2,97
338 Rodovias, ruas e avenidas		154	9	29	6,9	6,9	6,9	500	6,84	6,84	6,84	1,16	1,16	1,16
339 Linhas de energia elétrica		83	14	30	2,1	2,1	2,1	480	2,07	2,07	2,07			
433 Linhas de energia elétrica		95	13	29	0,9	0,9	0,9	510	0,87	0,87	0,87	0,33	0,33	0,33
434 Rodovias, ruas e avenidas		150	11	31,5	6,8	6,8	6,8	505	6,71	6,71	6,71	1,29	1,29	1,29
435 Rodovias, ruas e avenidas		144	10	31	6,8	6,8	6,8	500	6,73	6,73	6,73	1,27	1,27	1,27
436 Rodovias, ruas e avenidas		118	10	33	5,4	5,4	5,4	500	5,35	5,35	5,35	2,65	2,65	2,65
437 Rodovias, ruas e avenidas		138	10	32	5,1	5,1	5,1	500	5,03	5,03	5,03	2,97	2,97	2,97
438 Rodovias, ruas e avenidas		154	9	29	6,9	6,9	6,9	500	6,84	6,84	6,84	1,16	1,16	1,16
439 Linhas de energia elétrica		83	14	30	2,1	2,1	2,1	480	2,07	2,07	2,07			

TABELA 1 – Vãos críticos da linha de 69kV testada

Este fato parece comprovar que a programação VBA - voltada para a utilização de planilhas – é bastante eficaz e deverá ser mais bem explorada como alternativa também, em utilizações mais complexas que a apresentada neste trabalho (AVACALT).

Algumas melhorias se fazem necessárias para alguns aspectos, que não foram abordados nesta versão do programa; como por exemplo:

- Limite de carregamento a ser adotado quando de violações das alturas de segurança contidas em normatização onde exista a necessidade de redução da temperatura de limite térmico da linha (operação com restrição).

4.0 - CONCLUSÃO

É apresentado neste informe técnico, uma ferramenta computacional para a definição dos limites operacionais de carregamento de linhas de transmissão e para controle das alturas de segurança (clearances) fase- solo.

A ferramenta computacional desenvolvida - tem um caráter inédito - pelo fato de ter sido desenvolvida utilizando-se da linguagem de programação técnica conhecida como Visual Basic Application (VBA) que já vem embutida no Excel; orientando-a para a utilização de planilhas eletrônicas.

A programação voltada à utilização de planilhas permite entre outras coisas, a importação de insumos (vento, temperatura ambiente, etc.) provenientes de bancos de dados de estações meteorológicas (sensoriamento remoto).

Desde que disponha dos dados de temperatura ambiente e de velocidade do vento ao longo da linha, pode-se estabelecer os limites de carregamento da linha de transmissão em tempo real.

Isto pode ser bastante vantajoso, por exemplo, em regiões costeiras; onde se poderia explorar bem mais, a capacidade de transporte das linhas de transmissão.

Também fica claro, que a ferramenta poderá ser utilizada em estudos de recapacitação de linhas de transmissão principalmente, em linhas de transmissão com menores vãos médios; como é o caso das linhas de transmissão de menores níveis de tensão como as de 69 kV.

Nas situações onde obras de transmissão tenham que se postergadas pode-se, por exemplo: efetuar pequenos acréscimos nas alturas de segurança dos vãos críticos; de forma a se conseguir um ganho de transporte considerável nas linhas de transmissão alterando um projeto onde o limite térmico da linha de transmissão passe de 60° C para 80° C.

Atualmente, novas ferramentas computacionais estão surgindo, baseando-se em abordagem estatística para o estabelecimento das capacidades operativas das linhas de transmissão.

O objetivo deste informe técnico, era mostrar a possibilidade de utilização de planilhas eletrônicas para a realização de tarefas; que hoje, são realizadas por softwares específicos provenientes de centros de excelência.

Ferramentas computacionais cuja programação é voltada ao uso de planilhas eletrônicas são facilmente replicáveis em qualquer instalação do sistema elétrico brasileiro, haja visto que; na maioria das instalações existentes existe o Excel instalado.

Algumas melhorias ainda se fazem necessárias no AVACALT, para alguns aspectos, que não foram abordados nesta versão do programa; como por exemplo:

- Estabelecer o limite de carregamento a ser adotado quando de violações das alturas de segurança contidas em normatização onde exista a necessidade de redução da temperatura de limite térmico da linha (operação com restrição).
- Estabelecer a formulação necessária para utilização do programa computacional em condutores termo-resistentes (alumínio misturado com ligas especiais, etc.).

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Projeto CARELT 1ª e 2ª fases – *Limites de carregamento de linhas de transmissão em regime e em contingências de longa e curta duração*– J.M.B. Bezerra, 1987.
- (2) Nota Técnica ANEEL nº38 – *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* – 2005.
- (3) NBR 5422 – *Projetos de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica* – 1985.
- (4) Relatório SCEL-GTEE-GCOI 07/86 – *Critérios para Carregamento de Linhas de Transmissão* – 1986.
- (5) Projetos Mecânicos de Linhas Aéreas de Transmissão – R.D.Fuchs.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Dirceu de Almeida

Nascido em 1961 em Bela Vista do Paraíso - PR
Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do MT (UFMT) em 1987.
Especialista em Proteção de Sistemas Elétricos pela UNIFEI em 2012.
Especialista em Sistemas de Energia pela UFMT em 2007.
Atualmente, Engenheiro da Pós-Operação do Mato Grosso desde 2005.