

# Desenvolvimento de Sistemas Especialista Para Determinação da Capacidade de Condução de Corrente Dinâmica de Cabos de Linhas de Transmissão Subterrânea Superiores a 69 kV.

Ivan T. de Oliveira, Ivo T. Domingues<sup>1</sup>, Geraldo R. de Almeida<sup>2</sup>, Walter Pinheiro<sup>3</sup>, Miguel Angel Hernandez Torres<sup>5</sup>, Sérgio L. S. Cabral

**Resumo**—A utilização de cabos secos em linhas de transmissão subterrâneas em altas tensões é uma tecnologia relativamente nova no Brasil, onde quase todas as linhas em tensões superiores a 69 kV são constituídas por cabos do tipo OF (óleo fluído). No investimento em novas linhas de transmissão de energia em alta tensão, vem sendo considerado pelas concessionárias a substituição por cabos com isolamentos sólidos (extrudados, como EPR e XLPE), também denominados secos em oposição ao isolamento por óleo fluído. Desta forma, nos eventuais acidentes ao longo das linhas, serão reduzidos os custos das emendas e período de indisponibilidade da linha, além de ecologicamente corretos (sem vazamentos de óleo no ambiente). Por outro lado, a fim de prolongar ao máximo a vida útil da linha de cabos secos (cuja expectativa de vida é menor que a de uma linha de cabos OF), é proposto um sistema especialista para determinação do carregamento dinâmico desses cabos, no qual sejam evitados carregamentos que levem os condutores a operarem em temperaturas prejudiciais a integridade do isolamento. Na implementação do sistema se faz necessário o modelamento térmico dos cabos e do ambiente ao seu redor, segundo métodos de cálculo sugeridos por normas da IEC. O desenvolvimento dessa metodologia para uso em linhas de cabos secos é apresentado neste trabalho. Também são mostrados alguns tópicos da integração do sistema à infra-estrutura da automação da Eletropaulo

**Palavras-chave**— TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEA – CABOS SECOS – MODELAMENTO TÉRMICO – CARREGAMENTO DINÂMICO

## I. INTRODUÇÃO

Um cabo de potência na sua forma mais ampla pode ser caracterizado por um condutor (geralmente cilíndrico) construído por fios encordoados. Este condutor é coberto por uma camada de material semicondutor (aqui semicondutor significa material condutor de baixa condutividade – geralmente carregado com negro de fumo). Após a camada semicondutora vem uma nova camada de material isolante plástico. No caso de cabos para média e alta tensão, este material tem sido o Elastômero EPR ou Polietileno reticulado (XLPE). Sobre a camada isolante é novamente aplicada outra camada de material semicondutor. Sobre esta última camada semicondutora é aplicada uma blindagem metálica de fios de cobre amarrada por fita também de cobre aplicada helicoidalmente sobre os fios. Algumas construções mais

avanzadas possuem ainda sobre esta fita de cobre de amarração uma outra cobertura metálica contra eventual penetração de água e finalmente é aplicada uma última cobertura plástica externa que geralmente é vista como barreira anti-corrosiva. A figura 1 ilustra a construção típica do cabo a ser modelado.

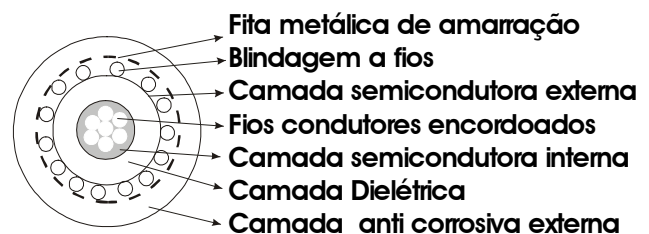


FIGURA 1 – CABO DE POTÊNCIA UNIPOLAR

O comportamento térmico dos cabos em linhas subterrâneas durante regimes de carregamento normal ou sob emergência depende não somente do conhecimento prévio das características construtivas dos cabos e do seu carregamento (curva de carga), mas também das condições de instalação no meio. Assim deverão ser conhecidos outros fatores como: quantidade de condutores carregados do sistema, configuração geométrica entre os cabos, tipo de aterramento das blindagens metálicas dos cabos, características térmicas dos materiais ao redor do cabo (solo, dutos, concreto, “backfill”, etc), efeitos da variação sazonal do meio ambiente (umidade e temperatura no terreno) e outras interferências causadas por fontes de calor externas.

As normas para avaliação da capacidade de corrente permitida nos cabos subterrâneos de alta tensão permitem modelar esses fatores sob parâmetros concentrados para as diversas situações possíveis, usando formulações empíricas internacionalmente aceitas. Na representação desses parâmetros, sempre que possível, serão utilizados as simbologias e nomenclaturas empregadas pela IEC 287-1-1 [1], IEC 287-2-1 [2] e IEC 853-2 [3].

## II. CARACTERÍSTICAS DA LINHA PILOTO

A modelagem do sistema teve por referência uma linha piloto, com trecho inicial de 1500 metros constituído por cabos em isolamento sólida de 138 kV, o qual é parte de um circuito duplo em cabos a óleo fluído (já existente). Na instalação da linha piloto, conforme especificações do projeto, os cabos estão sob as seguintes situações:

<sup>1</sup>ivo.domingues@aes.com

<sup>2</sup>geraldo.almeida@pea.usp.br

<sup>3</sup>walter.pinheiro@matrix.com.br

<sup>5</sup>miguel@pea.usp.br

- (1) Diretamente enterrados (nas caixas de passagem e caixas de emendas),
- (2) Em dutos preenchidos com bentonite (a maior parte da construção da linha).

Em cada modalidade é aplicável um modelamento do fluxo de calor que ocorre quando da dissipação de potência pelos condutores e dielétricos. Através do mesmo modelo gráfico é possível representar as duas situações, sendo todos os parâmetros concentrados comuns a ambas modalidades de instalação, mas com diferentes fórmulas de cálculo, conforme as condições existentes em cada região.

### III. CARACTERÍSTICAS DO CABO, DA INSTALAÇÃO E DE OPERAÇÃO.

Os dados de fabricação, operação e construção da linha e seus componentes (cabos, acessórios, tipo de instalação e materiais empregados na construção de civil), o que inclui suas dimensões, características físicas, limites e condições de operação sob regime normal e de sobrecarga (inclusive sob emergência), devem ser obtidos previamente junto aos respectivos fornecedores. Na impossibilidade de obtenção de algumas das informações necessárias, são adotados os valores, ou procedimentos para suas estimativas, segundo critérios sugeridos nas normas da IEC. A seguir destacamos os dados necessários aos cálculos, classificados nas três bases de informação:

#### A. Características de Operação do Circuito:

Frequência de alimentação do circuito (em Hz)  
 Curva de Carga (Fator de carga diário)  
 Condições de carga sob operação normal  
 Temperatura máxima no condutor sob regime contínuo  
 Corrente máxima permitível em regime contínuo  
 Limites para operação em condições de Emergência

#### B. Características do Cabo:

Tipo de cabo  
 Dimensões e área da seção transversal do condutor  
 Dimensões e área da seção transversal da blindagem  
 Dimensões das camadas internas  
 Diâmetro externo do cabo  
 Resistência DC do condutor a 20° C (em  $\Omega / m$ )  
 Resistência DC da blindagem a 20° C (em  $\Omega / m$ )  
 Fator de Perdas da isolação ( $\tan \delta$ )  
 Constante dielétrica da isolação ( $\epsilon_r$ )  
 Resistividade térmica dos componentes (em K.m/W)  
 Capacidade térmica específica dos componentes (em J/K.m $\geq$ )

#### C. Características da Instalação:

Profundidade de enterramento dos cabos  
 Distâncias axiais entre os condutores  
 Posicionamento dos cabos em cada instalação (configuração)  
 Aterramento das blindagens do cabo (tipo)  
 Dimensões das caixas de passagem e de emendas

Dimensões dos acessórios usados nas emendas  
 Dimensões dos dutos  
 Resistividade térmica dos materiais ao redor (em K.m/W)  
 Calor específico volumétrico dos materiais ao redor (em J/ K.m $\geq$ )  
 Resistividade térmica do solo (em K.m/W)  
 Difusidade térmica do solo (em m $^2$ /s)  
 Temperatura do solo

Nota: Na linha piloto o aterramento existente é do tipo “E-fetivamente Aterrado”, assim devem ser feitos os respectivos cálculos do fator de perdas na blindagem ( $\lambda_1$ ) e da resistência térmica do ambiente do cabo (T4) para considerar as perdas provocadas pelas correntes induzidas nas blindagens (no início do modelamento era considerado que o aterramento seria do tipo “Cross-Bonding”).

### IV. MODELO TÉRMICO ESTACIONÁRIO DOS CABOS (IEC 287)

O modelo térmico estacionário do cabo de potência é representado na Figura 2, onde as resistências térmicas T1 e T3 correspondem aos componentes internos do cabo, respectivamente, dielétrico (com ambas as camadas semicondutoras) e a cobertura de proteção externa. O parâmetro T4 complementa o circuito térmico, sendo dependente do tipo de instalação, correspondendo a resistência térmica na interface com o meio envoltório (solo, duto ou ar).

O fluxo térmico W no circuito é devido a dissipação de calor produzida pela corrente transmitida ( $W=R.I^2$ ), havendo também as contribuições devido a perdas no dielétrico  $W_d$  (pela alta tensão aplicada) e por perdas na blindagem  $\lambda_1.W$  (pelas correntes induzidas e do tipo de aterramento).

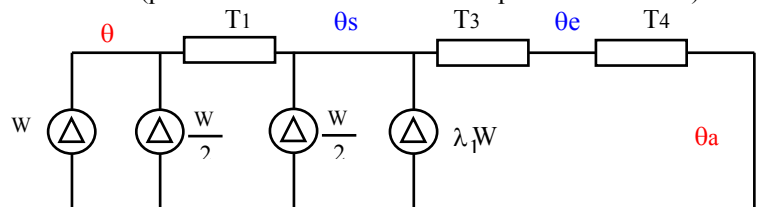


FIGURA 2 - MODELO TÉRMICO

Desta forma é derivada a expressão da corrente permitível em função do crescimento da temperatura no condutor em relação ao ambiente ( $\Delta\theta = \theta - \theta_a$ ), na qual as únicas variáveis que variam significativamente são a resistência AC do condutor (R) e resistência térmica externa (T4). Esta última depende diretamente dos materiais ao redor do cabo, sendo o solo o que apresenta as propriedades térmicas mais instáveis (como a variação sazonal da resistividade térmica).

#### Modalidade 1: Cabos diretamente enterrados

$$T4 = (\rho_T/2\pi) * \ln[(4L / De)(d'_{pk}/d_{pk}).(d'_{pq}/d_{pq})]$$

sendo:  $L > 5.De$

$\rho_T$  é a resistividade térmica do solo (K.m / W);

$L$  é a profundidade entre a superfície do solo e o eixo do cabo mais quente (mm);  
 $D_e$  é diâmetro externo do cabo (mm);  
 $d_{pk}$  e  $d_{pq}$  são as distâncias axiais dos cabos  $k$  e  $p$  em relação ao cabo  $p$  (mm);  
 $d'_{pk}$  e  $d'_{pq}$  são as distâncias axiais entre as imagens de  $k$  e  $q$  em relação ao cabo  $p$  (mm).

Nota: Nesse caso só há influência térmica dos outros dois cabos do circuito ( $p$  e  $q$ ), para uma configuração qualquer (plana ou não). O uso de “Backfill” (material com resistividade térmica mais estável que a do solo) serve para evitar  $W_c$  condição crítica de ressecamento do solo nas proximidades dos cabos (dentro da isoterma de 50°C).

#### Modalidade 2: Cabos em Dutos preenchidos com Bentonite

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4'''$$

$$T_4' = (\rho T / 2\pi) \ln[Dd / D_e]$$

$$T_4'' = (\rho d / 2\pi) \ln[Do / Dd]$$

$$T_4''' = (\rho d / 2\pi) \ln[(4L / Do)(d'_{pk} / d_{pk})(d'_{pq} / d_{pq})]$$

sendo:  $L > 5 \cdot Do$

$\rho T$ : é a resistividade térmica do solo ou bentonite (K.m / W);

$\rho d$ : é a resistividade térmica do material do tubo (K.m / W);

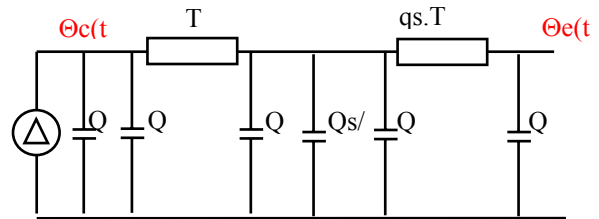
$Dd$  e  $Do$ : são os diâmetros interno e externo do duto (mm).

Nota: Na prática e como alternativa a IEC sugere que o modelamento possa ser feito para cabos diretamente enterrado (para casos de dutos preenchidos por material como a bentonite), sendo o cálculo da resistência térmica idêntica ao da modalidade 1, onde o pequeno erro existente é devido a negligência da camada formada pela parede do duto e por considerar o ambiente ao redor do cabo como homogêneo.

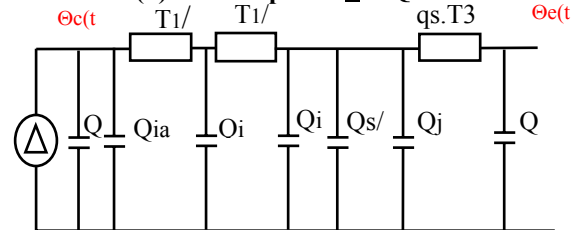
#### [1] MODELO TÉRMICO DINÂMICO DOS CABOS (IEC 853)

Para a modelagem do circuito térmico dinâmico do cabo são considerados os parâmetros concentrados já apresentados no modelo estático, sendo desconsideradas as perdas no dielétrico e acrescentados as capacitâncias térmicas dos componentes do cabo. Neste modelo é admitido que a energização em tensão do circuito já ocorreu antes de qualquer carregamento ou de variação na carga, isto é, em um período de tempo anterior ao início do transiente em análise.

(a) Modelo para  $t > T.Q / 3$



(b) Modelo para  $t \leq T.Q / 3$



Ond  $W_c$  = Potência de perdas no Conductor

$qs$  = Relação de perdas joule (cabo/conductor)

$Q_c$  Capacitância Térmica do Conductor

$\Sigma Q_i$  Capacitância Térmica do Die-

(c) Modelo equivalente de duas seções (simplificação)

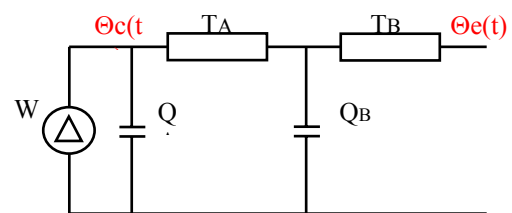


FIGURA 3 - MODELO TÉRMICO DINÂMICO

As capacitâncias e resistências térmicas apresentadas em 3(a) ou 3(b) são agrupadas sob as duas seções RC do modelo equivalente da figura 3(c), onde na “seção A” estão reunidas as contribuições do condutor e da maior parte do dielétrico, enquanto que na “seção B” o resto do circuito térmico do cabo até a interface de contato com o ambiente (resistência térmica da cobertura do cabo). As perdas joule na blindagem são incluídas nos parâmetros concentrados do modelo através do fator “ $qs$ ”.

A resposta do aumento da temperatura no cabo,  $\theta(t)$ , é calculada separadamente para o transiente do próprio cabo  $\theta_c(t)$  (aumento da temperatura do cabo do condutor em relação a superfície do cabo) e ao transiente do ambiente do cabo  $\theta_e(t)$  (aumento da temperatura da superfície do cabo em relação ao solo ambiente).

Nota: Para instalações subterrâneas há um grande diferença na duração do transiente térmico proveniente do próprio cabo e o transiente decorrente do ambiente do cabo, sendo no primeiro de algumas horas, enquanto que no segundo pode levar vários dias. Cabos ao ar livre têm um transiente térmico total idêntico ao do próprio cabo, pois a capacitância térmica do ar é desprezível, o que possibilita apenas sobrecargas de curta duração (de 1 a 3 horas), enquanto que para cabos enterrados a duração da sobrecarga pode ser bem mais longa.

#### A. CÁLCULO DOS PARÂMETROS DINÂMICOS

A capacitância térmica de cada camada (em J / K.m) é calculada como o produto da capacidade específica ( $\sigma$ ) pelo seu respectivo volume por unidade de comprimento, em geral sob forma de casca cilíndrica, assim para as camadas de distintos materiais do cabo, temos:

Condutor:  $Q_c = \sigma_c \cdot dc'' \cdot \pi / 4$

Dielétrico:  $Q_i = \sigma_i \cdot (Di'' - dc'') \cdot \pi / 4 + \Sigma Q$  (semicond)

Cobertura:  $Q_j = \sigma_j \cdot (De'' - Ds'') \cdot \pi / 4$

O produto do somatório dessas capacitâncias e o somatório das resistências térmicas, resulta na constante térmica do cabo (T.Q). Essa constante de tempo possibilita a escolha de um modelo simplificado, que leva em conta o transiente térmico de maior influência (cabo ou ambiente), para obter melhor precisão nos resultados para o período considerado.

#### B. CÁLCULO DA RESPOSTA DE TEMPERATURAS DURANTE O TRANSITÓRIO PARA UMA FUNÇÃO DEGRAU DE CORRENTE

A expressão do transiente do condutor em relação a superfície externa do cabo é dada por:

$$\theta_c(t) = Wc \cdot \{ Ta \cdot [1 - \exp(-a \cdot t)] + Tb \cdot [1 - \exp(-b \cdot t)] \}$$

$Wc$  (assumida constante durante o transiente, R.I'') é a perda de potência no condutor por unidade de comprimento na máxima temperatura de condutor.

O transiente do ambiente é estritamente dependente das condições de instalação no solo, tais como: profundidade, resistividade térmica, difusidade térmica, incluindo também as contribuições dos transientes devidos aos demais cabos.

Para  $t \leq (T.Q / 3)$ , o 2º e o 4º termo (imagens dos cabos) podem ser desprezados.

Nota: Será utilizado um valor inicial para a resistividade térmica do solo para cada região ao longo da linha (zona térmica), a qual será reavaliada periodicamente (horas) através de cálculos da resistência T4 realizados pelo sistema de monitoramento em tempo real, obtendo-se valor coerente com a atual condição do trecho monitorado.

Um fator de concordância variável no tempo deve ser aplicado para descontar do transitório térmico do ambiente a

parte proveniente do transitório térmico do próprio cabo (esses transitórios não são efeitos independentes), dado por:

$$a(t) = \theta_c(t) / [Wc \cdot (TA + TB)]$$

O transiente total é a soma dos dois transientes, momento a momento, sendo a parcela do ambiente  $\theta_e(t)$  corrigida pelo respectivo fator  $a(t)$ , assim:

$$\theta(t) = \theta_c(t) + a(t) \cdot \theta_e(t)$$

Nota: A influência mútua entre os dois transientes é desconsiderada após decorridas 12 horas do início do transiente ou após um período suficiente para o transiente térmico do cabo se estabilizar ( $\theta_c(t)$ , para  $t > 2.T.Q$ ), quando o fator  $a(t)$  assume um valor praticamente unitário.

Ao final é feita uma correção do transiente total ( $\alpha_R$ ) devido a variação das perdas joules (resistividade do condutor) com a temperatura, assim:

$$\theta_{\alpha}(t) = \theta(t) / 1 + \alpha_R \cdot [\theta(\infty) - \theta(t)]$$

$$\alpha_R = 1 / (B + \theta_i)$$

$\theta(\infty)$  é aumento máximo da temperatura do condutor sob regime permanente,

$\alpha_R$  é o coeficiente de temperatura da resistividade elétrica do material do condutor no início do transiente,

$B$  é o recíproco do coeficiente de temperatura a 0°C (valor tabelado na IEC 853-2)

$\theta_i$  é a temperatura do condutor no início do transiente

#### V. CÁLCULO DAS RESPOSTAS DE TEMPERATURAS DURANTE O TRANSITÓRIO PARA CARGA CÍCLICA

Este método é válido para determinar a capacidade de corrente para cabos enterrados no solo, diretamente ou em dutos, quando transportando uma carga que varia ciclicamente sobre um período de 24 horas, com uma forma de ciclo diário praticamente constante. É também considerado que o cabo já tenha sido energizado em tensão por um período suficiente para que o aumento da temperatura no condutor devido as perdas dielétricas atinja um estado de regime permanente, sendo os posteriores aumentos decorrentes das variações do transiente de temperatura devido as mudanças na corrente de carga.

O modelo de parâmetros concentrados adotado é o mesmo usado para períodos maiores que 1 hora ( $t > T.Q/3$ ), sendo também empregados os valores obtidos para a resposta de temperatura num transitório de uma função degrau de corrente (visto nos itens anteriores).

Por definição o fator de capacidade cíclica,  $M$ , determina o valor de pico da corrente admissível,  $I_R$ , durante um ciclo diário (24 h), em função da capacidade de corrente permissível em regime permanente a 100% de fator de carga ( $I$ ), tal que o condutor atinja, mas não exceda a temperatura máxima permissível ( $\theta_{máx}$ ) durante este ciclo.

$$I_R = I \cdot M$$

O fator  $M$  depende somente da forma do ciclo diário e é independente da real magnitude da corrente. Assim, um



segundo fator  $\mu$ , denominado fator de perda de carga do ciclo diário é determinado pela decomposição do ciclo em pulsos horários retangulares, onde os valores das ordenadas ( $Y_i$ ) são frações da unidade. Cada ordenada vale o quadrado da razão entre cada valor de corrente horária,  $I(i)$  e o valor da corrente máxima ( $I_R$ ), verificada no ciclo (24 horas).

$$\mu = (1 / 24) \cdot \sum_{i=0 \rightarrow 23} Y_i$$

$$Y_i = (I(i) / I_R)^2$$

$I(0)$  é tomada no fim de período de maior temperatura do ciclo (por inspeção), as demais correntes consideradas nas horas anteriores a partir deste momento, de forma que o  $I(23)$  é adjacente a  $I(0)$  do ciclo prévio.

As respostas de temperaturas do cabo e solo para o ciclo completo de perdas podem ser encontradas adicionando ambas as respostas para cada pulso retangular, tendo considerado o período de tempo entre cada pulso e o tempo da máxima temperatura. O detalhamento do ciclo de carga é necessário sobre um período de 6 horas antes do tempo de máxima temperatura, e os valores anteriores podem ser representados por uma média, sendo esta o próprio fator de perda de carga  $\mu$ .

$$\theta_{\text{máx}} = Y_0.[\theta R(1)] + Y_1.[\theta R(2) - \theta R(1)] + Y_2.[\theta R(3) - \theta R(2)] + Y_3.[\theta R(4) - \theta R(3)] + Y_4.[\theta R(5) - \theta R(4)] + Y_5.[\theta R(6) - \theta R(5)] + \mu.[\theta R(\infty) - \theta R(6)]$$

$\theta R(i)$  corresponde ao crescimento de temperatura após um tempo de  $i$  horas da aplicação da função degrau de perdas da corrente  $I_R$ .

O valor de  $M$  é calculado a partir da expressão geral:

$$M = [\theta R(\infty) / \theta_{\text{máx}}]$$

Substituindo  $\theta_{\text{máx}}$  na expressão acima, obtemos o cálculo de  $M$  para qualquer ciclo de carga com forma conhecida:

$$M = 1 / \left\{ \sum_{i=0 \rightarrow 5} Y_i \cdot [\theta R(i+1) / \theta R(\infty) - \theta R(i) / \theta R(\infty)] + \mu \cdot [1 - \theta R(6) / \theta R(\infty)] \right\}$$

Sendo:

$$\theta R(i) / \theta R(\infty) = [1 - k_1 + k_1 \cdot \gamma(i)] \cdot a(i)$$

$$\gamma(i) = \left\{ \left[ -E_i(-De'' / 16.t.\delta) - [-E_i(-L'' / t.\delta)] \right] + 2 \cdot \left[ -E_i(-df'' / 16.t.\delta) - [-E_i(-L'' / t.\delta)] \right] \right\} / 2 \cdot \ln(4LF/De)$$

Onde:

$$\theta R(0) = 0$$

$$F = (d'pk / dpk) \cdot (d'pq / dpq)$$

$$df = 4.L / \square F$$

$$k_1 = W_1.(T_{4P} + \Delta T_4) / [W_c.(T_A + T_B) + W_1.(T_{4P} + \Delta T_4)]$$

$$\Delta T_4 = (\rho T \cdot \ln F) / 2 \cdot \pi$$

$$\theta(\infty) = [W_c.(T_A + T_B) + W_1.(T_{4P} + \Delta T_4)]$$

$\theta R(\infty)$  seria o valor alcançado do crescimento da temperatura em regime permanente, caso fosse aplicado continuamente a corrente de sobrecarga  $I_R$ .

$W_c$  é o total de perdas joule no condutor mais quente

$W_1$  é o total de perdas joule no cabo (+ perdas na blindagem)

$T_{4P}$  é o a resistência térmica externa do cabo mais quente do grupo, quando isolado

$[T_{4P} + \Delta T_4]$  é a resistência térmica externa do cabo mais quente do grupo levando em conta as perdas dos demais

cabos, assumidas como iguais. Os demais parâmetros são os mesmos já citados nas seções anteriores.

## VI. CÁLCULOS DE SOBRECARGAS PERMISSÍVEIS E EM EMERGÊNCIAS

### A. Conceituação

Uma sobrecarga permissível é caracterizada por um valor da corrente superior ao valor da corrente nominal em regime permanente ( $I_R$ ) transportada no cabo, mas com uma duração no tempo insuficiente para que o aquecimento produzido no condutor o leve a ter ultrapassado sua temperatura máxima de operação (ex.: 90°C), de forma a evitar qualquer limitação na vida útil do cabo. Exemplo típico é uma carga cíclica, cujo fator de carga é menor que 100%, onde então é determinado valor de pico de corrente maior que o valor da corrente em regime contínuo, durante um limitado período de tempo e em função das condições específicas do ambiente ao redor do cabo e de seu carregamento prévio.

Uma sobrecarga de emergência é caracterizada por uma corrente de amplitude ou de duração maior que a da sobrecarga permissível no cabo, alcançando temperaturas maiores que a temperatura máxima no condutor, que podem levar a diminuição da vida útil do cabo ou da capacidade de carregamento do circuito (por mudanças térmicas no ambiente do cabo), caso determinados limites sejam ultrapassados. As situações de emergência abrangem as seguintes situações:

- Operação além da sobrecarga permissível para uma determinada duração, em cabos de construção e tamanho específicos, sob condições de enterramento específicas e transmitindo uma específica carga antes da aplicação da sobrecarga;
- Operação além da duração que pode ser aceitável para uma determinada sobrecarga em cabos como acima;
- Operação além da duração que pode ser aceitável para a transmissão da potência total referente a um grupo de circuitos de cabos em paralelo, a partir do momento que um deles (ou mais) não pode mais transmitir sua carga por qualquer razão.

Notas: Durante as especificações da linha, a concessionária deve requerer do fabricante dos cabos os limites de emergência (máxima temperatura e duração) para situações críticas de operação sob emergência. Nas normas internacionais não há recomendações envolvendo valores de temperaturas permissíveis sob emergência para cabos de alta tensão, sendo que cada fabricante possui seus próprios valores de referência. Assim a temperatura do condutor pode atingir um valor máximo de emergência após um determinado período da aplicação da sobrecarga (sem diminuição da vida útil do cabo), limitado em função da degradação em cada tipo de cabo.

### B. Sobrecargas para cabos com carga contínua

Seja um circuito enterrado termicamente isolado de outros do grupo, carregado previamente por uma corrente constante  $I_1$ , aplicada por um período suficientemente longo para atingir as condições de regime permanente. Se subsequentemente, a partir de um tempo definido  $t = 0$ , uma corrente

de carga de emergência  $I_2$  (maior que  $I_1$ ) for aplicada por um tempo específico “t”, o maior valor desta corrente, sem exceder um determinado valor de temperatura no condutor e por considerar a variação da resistividade elétrica do condutor com a temperatura, é dado por:

$$I_2 = IR \cdot \left\{ (h_1 \cdot R_1 / R_{m\acute{a}x}) + [(RR / R_{m\acute{a}x}) \cdot (r - h_1 \cdot R_1 / RR)] / [\Theta R(t) / \Theta R(\infty)] \right\}$$

Onde:  $I_2 \leq 2,5 \cdot IR$      $h_1 = I_1 / IR$      $r = \Theta_{m\acute{a}x} / \Theta R(\infty)$

$I_1$  é uma corrente constante aplicada anteriormente ao carregamento de emergência;

$IR$  é a corrente nominal sustentada (a 100% de fator de carga) para o condutor alcançar, mas não exceder a máxima temperatura permissível padronizada;

$I_2$  é a corrente de emergência, a qual pode ser subsequentemente aplicada pelo tempo t, tal que o crescimento da temperatura do condutor acima do ambiente no final do período do carregamento de emergência seja  $\Theta_{m\acute{a}x}$ ;

$R_1$  é a resistência A.C. do condutor antes da aplicação da corrente de emergência, isto é, na temperatura de condutor correspondente a  $I_1$ ;

$R_{m\acute{a}x}$  é a resistência A.C. do condutor no final do período do carregamento de emergência;

$RR$  é a resistência A.C. do condutor com a aplicação da corrente nominal sustentada  $IR$ , isto é, na temperatura máxima permissível padronizada;

$\Theta_{m\acute{a}x}$  é o crescimento máximo permissível da temperatura do condutor acima do ambiente no final do período do carregamento de emergência;

$\Theta R(t)$  é o crescimento da temperatura do condutor acima do ambiente, após a aplicação da corrente  $IR$ , desprezando a variação da resistência elétrica do condutor.

$\Theta R(\infty)$  é o valor de  $\Theta R$  em regime permanente, isto é, o crescimento máximo permissível na temperatura padronizada (tabelada).

Nota: O efeito do aquecimento devido as perdas dielétricas  $\Delta\theta_d$  deve ser subtraído dos valores originais de  $\Theta_{m\acute{a}x}$ ,  $\Theta R(\infty)$  e  $\Theta R(t)$ , sendo utilizados estes valores modificados na equação acima, de forma a não serem alterados as respectivas resistências elétricas. Lembrando que:

$$\Delta\theta_d = Wd \cdot (0,5 \cdot T_1 + T_3 + T_4) \quad (\text{IEC 287})$$

## VII. SIMULAÇÃO PARA A MODELAGEM

Para a simulação dos cálculos do comportamento térmico a serem usados a partir dessa modelagem, foram elaboradas planilhas utilizando o aplicativo MS-Excel, usando dados contidos em um exemplo da IEC 853-2 [3].

Embora as características do cabo sejam diferentes do usado no protótipo (seção do condutor e nível de tensão), os dados fornecidos neste exemplo servem para ilustrar o comportamento térmico do cabo e para testar a metodologia de cálculos a ser implementada no algoritmo (software).

No exemplo é representado um circuito único de 400 kV formado por 3 cabos unipolares em óleo fluido (SCOF), condutor de cobre com 2000 mm<sup>2</sup> de seção, diretamente

enterrados a uma profundidade de 1000 mm, espaçamento de 300 mm entre os centros dos cabos e aterramento em “Cross-Bonding”. O solo tem resistividade térmica de 0,9 K.m/W, difusidade de  $5 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  e temperatura ambiente de 10°C (máxima).

## VIII. INTEGRAÇÃO À INFRA-ESTRUTURA DA AUTOMAÇÃO

Para validação da modelagem térmica do cabo apresentada anteriormente, foi necessária a instalação de equipamentos de monitoração e controle, assim como o desenvolvimento de um software que implementasse a metodologia proposta.

Estes equipamentos são:

- Power 7330: Medidor eletrônico de corrente para monitorar, armazenar e enviar a corrente instantânea circulando pelo cabo. Permite estimar os valores futuros possíveis de carregamento;
- LIOS OTS: Medidor ótico-eletrônico de temperatura. Monitora as três fibras óticas embutidas em cada uma das fases do circuito com o intuito de determinar o perfil de temperatura do cabo ao longo da linha.
- UPC Concentrador: Computador para coletar as medições dos equipamentos e realizar o processamento utilizando a metodologia proposta;
- Cabeamento para comunicação RS-485;
- Cabeamento para comunicação TCP/IP.

### A. Descrição

O medidor 7330 ION oferece mais de 200 medições de alta precisão, data logging controle de I/O e opções de portas de comunicação, sendo ideal para o uso na indústria, comércio com aplicações tão diversas quanto tarifação da rede, monitoração e comando.

Também é capaz de memorizar 32 parâmetros definidos pelo usuário; 16 desses parâmetros podem ser memorizados de 15 em 15 minutos durante 30 dias.

No 7330 é possível usar o operador lógico e os setpoints para ativar alarmes e implementar um avançado sistema de proteção de backup para o equipamento.

#### 1) Parâmetros disponíveis:

- Tensão: fase/fase e fase/neutro (por fase média) e desbalanço.
- Corrente: Por fase média e desbalanço.
- Potências: Ativa (kW), Reativa (kVAR) e Aparente (kVA). (Por fase total).
- Fator de potência: capacitivo e indutivo por fase e total.
- Energia: Todas importadas e exportadas, (medição Bilateral).

- Demanda: Janela deslizante, preditiva e térmica.
- Distorção Harmônica: Total e individual até 15ª harmônica.
- Time in Use (Tarifação): É possível acumular os valores estabelecidos conforme a necessidade do usuário até 2 anos.
- Data Logging: Leitura por tempo ou evento até 32 parâmetros definidos pelo usuário.

## 2) Tipo de comunicação:

- Duas portas de comunicação RS-485.
- Suporta Modbus, protocolo ION e DNP 3.0.

Especificamente no caso da ETD Vila Formosa, foi estabelecida uma conexão com o UPC via RS-485 e par trançado com posterior conversão para porta RS-232 mediante o adaptador i-7520.

Este tipo de conexão garante envio de informação numa velocidade máxima de 9600 bps, sendo necessário o correto isolamento contra interferência eletromagnéticas oriundas do ambiente de qualquer ETD.

Para consultar o medidor 7330 foi utilizado o protocolo DNP na versão 3.0, o qual permite referenciar cada um dos parâmetros amostrados mediante a tabela de alocação do medidor, fornecida pelo fabricante para o caso da versão 3.0 do protocolo.

Após a conversão para RS-232, o sinal proveniente do medidor 7330 é inserido na unidade processadora onde é interpretado mediante o algoritmo apropriado.

### B. Saída UPC – Automação:

Os resultados de algumas das medições e de todos os cálculos realizados pelo software de previsão são enviados ao sistema Scada através do concentrador da Automação.

A comunicação entre o UPC concentrador das medições e o sistema da Automação da AES Eletropaulo, implementado pela Atech é realizado via TCP/IP, utilizando protocolo DNP versão 3.0.

Nesta modalidade da comunicação DNP, foi implementado no UPC um servidor DNP, com endereço IP fixo e monitorando a porta 7070.

Toda requisição nesta porta é validada do ponto de vista a garantir uma correta comunicação; isto é:

- Checagem da CRC;
- Verificação de qual função esta sendo consultada;
- Verificação de formato dos valores de saída;
- Sistema de prioridades para responder as requisições;

Uma vez validada a consulta é implementada a resposta apropriada para ela. Isto compreende:

- Captura dos parâmetros solicitados;

- Adequação ao formato solicitado;
- Implementação da palavra de resposta em DNP;
- Atualização do servidor DNP com esta palavra;
- Envio de aviso depois de terminada a consulta;

Alem deste mecanismo, também foi implementado um sistema de alarmes em DNP, caso alguns indicadores ultrapassem os valores limites prefixados.

Este sistema funciona da seguinte maneira:

Um parâmetro ultrapassa o limite preestabelecido;

O servidor envia à automação um sinal de resposta não solicitada (Unsolicited Response);

Dependendo do estado do concentrador da automação e do grau do alarme esta resposta é repetida;

Após atendimento do concentrador, o tratamento é o mesmo de uma consulta normal.

Todo este processo de troca de mensagens descansa sobre um sofisticado sistema de validação da comunicação composto de três camadas:

Camada do aplicativo: a mais próxima do usuário onde são implementadas as funções de consulta e resposta;

Data Link Layer: camada de validação dos dados enviados e recebidos;

Transport Layer: camada física onde circula a informação (para trançado, cabo de rede, etc)

## IX. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após o modelamento, segundo essas condições de enteramento e adotando-se as mesmas constantes do cabo empregadas na referência [5], foram constatados resultados praticamente idênticos aos esperados, onde os desvios se deram em função das aproximações entre valores calculados manualmente no exemplo e os obtidos na planilha eletrônica.

Além da dificuldade normal causada pela quantidade de cálculos requeridos para obtenção dos parâmetros básicos, como perdas e resistências térmicas e a complexidade dos cálculos envolvidos (como no transitório do ambiente do cabo) foram constatadas ambigüidades entre o exemplo e a metodologia indicada na IEC 853, quanto aos cálculos das respostas para sobrecargas (dependentes ou não da variação da resistência elétrica do condutor durante o transitório). As dúvidas foram esclarecidas ao serem analisados um estudo acadêmico sobre capacidade de corrente [4] e o manual de um fabricante de cabos de alta tensão [6], prevalecendo assim as orientações da IEC 853 nos cálculos de sobrecarga empregados na simulação (item 7.2 deste relatório).

Também foram desconsideradas discrepâncias decorrentes dos valores das potências de perdas, calculadas erroneamente no exemplo para uma capacidade de corrente de 1550

A, ao invés do valor indicado de 1580 A (aproximação para 1577 A, confirmado por cálculo da IEC 287).

Verificou-se a possibilidade de monitoração online de diversos parâmetros utilizando equipamentos inovadores, e o controle de grandezas originárias do sistema para apoio à gestão e operação.

O sistema foi integrado com sucesso à plataforma SCADA da concessionária, sendo que atualmente a informação do estado atual e previsto do cabo encontra-se disponível para a tomada de decisões por parte do operador do sistema.

## X. CONCLUSÃO

O modelamento do cabo requer um levantamento inicial e criterioso dos detalhes construtivos do cabo e de sua instalação, bem como das constantes físicas dos materiais aplicados, sem os quais não haveria a adequada precisão na resposta do comportamento térmico do sistema para o carregamento em tempo real, visto a grande variedade de constantes e variáveis envolvidas e o diferente grau de influência nos cálculos dos principais parâmetros do modelo, como visto nesta simulação. Fatos que ressaltam a importância de interação com os fabricantes, projetistas e instaladores da linha para obtenção de dados coerentes com a realidade.

Foram realizadas simplificações nos cálculos apresentados, visto que as temperaturas reais nas blindagens metálicas são medidas pelas fibras ópticas conectadas ao OTS ao longo dos cabos da linha piloto, evitando assim cálculos recursivos na determinação das temperaturas dos condutores (empregados nas planilhas iniciais do modelamento sob o MS-Excel).

Para efeito comparativo e de segurança na operação da linha é recomendável a utilização dos valores das constantes físicas do cabo sugeridas pelas normas da IEC, entretanto para uma maior precisão do modelamento da linha com a situação real, além das dimensões internas dos elementos constituintes do cabo, é importante requerer dos fabricantes algumas características físicas dos materiais do cabo, tais como: resistências elétricas do condutor e da blindagem em corrente contínua a 20°C, fator de perdas dielétricas (tangente Delta) e permissividade relativa do dielétrico ( $\epsilon$ ), bem como dos materiais usados na instalação (ex: backfill e dutos) quanto a suas propriedades térmicas.

## XI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEC Standard: Electric Cables – Calculation of Current Rating – Part 1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – Section 1: General. Publication IEC-287-1-1, 1994.
- [2] IEC Standard: Electric Cables – Calculation of Current Rating – Part 2: Thermal resistance – Section 1: Calculation of thermal resistance. Publication IEC-287-2-1, 1994.
- [3] IEC Standard: Electric Cables – Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables – Part 2: Cyclic rat-

ing of cables greater than 18/30 (36)kV and emergency ratings for cables of all. Publication IEC-853-2, 1989.

[4] Cicarelli, L. D.: “Estudo da Capacidade de Corrente dos Cabos Subterrâneos” - Dissertação de Mestrado, Ref: FD-1432, EPUSP, São Paulo, 1991.

[5] Cigré Working Group 21.02: Computer method for the calculation of response of single-core cables to a step function thermal transient. Electra, n.º 87, pp. 41-64. Mar./1983.

[6] Standard Pirelli - High Voltage Cables - Thermal Transient for Underground Cables