



XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

| | | |
|--------------------------|--|---------------------------------------|
| JUAN CARLOS CEBRIAN | Sinapsis Inovação em Energia s/s Ltda | juan.cebrian@sinapsisenergia.com |
| Hernan Prieto Schmidt | Universidade Federal de São Paulo | hernanps@usp.br |
| Marcelo Lopes | Sinapsis Inovação em Energia s/s Ltda | marcelo.lopes@sinapsisenergia.com |
| Daniela V. Kondo | Sinapsis Inovação em Energia s/s Ltda | daniela.kondo@sinapsisenergia.com |
| Joao C. Guaraldo | Sinapsis Inovação em Energia s/s Ltda | joao.guaraldo@sinapsisenergia.com |
| Francisco Pereira Jr | Sinapsis Inovação em Energia s/s Ltda | francisco.pereira@sinapsisenergia.com |
| Benedito Vieira de Mello | AES Eletropaulo Metropolitana - Eletr. de São Paulo S.A. | benedito.mello@aes.com |
| Antonio P. Cunha | Sinapsis Inovação em Energia s/s Ltda | antonio.cunha@sinapsisenergia.com |

Aplicativo Computacional para Análise de Redes Elétricas de Distribuição Utilizando Modelos Térmicos e Elétricos Integrados

Palavras-chave

Capacidade de condução

Contingência

Curto-circuito

Gestão de ativos

Parâmetros elétricos

Resumo

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um aplicativo computacional para sistematizar os cálculos térmicos e elétricos associados aos principais componentes de redes de distribuição, isto é, transformadores aéreos ou subterrâneos e todos os tipos de cabos utilizados - nus, cobertos ou isolados, de baixa até alta tensão. Além da abrangência, o aplicativo tem características inéditas de integração entre os cálculos, com benefícios para a produtividade e acurácia durante a execução dos cálculos. Outra característica desenvolvida foi a determinação automática das temperaturas esperadas de todos os componentes de uma rede de distribuição pela combinação do cálculo de fluxo de potência com o cálculo térmico, tanto em condições de regime normal como de contingência. As funções desenvolvidas contribuem para diversas atividades de uma concessionária, desde o projeto até o monitoramento *on-line*.

1. Introdução

Embora numa distribuidora existam padrões e regras construtivas dimensionadas para o atendimento da

maior parte das necessidades previstas, há também situações específicas que requerem estudos adicionais, envolvendo cálculos térmicos e elétricos, executados de forma isolada ou conjunta.

Dentre esses estudos, existem alguns mais usuais e trabalhosos realizados durante a análise de redes, para o apoio a atividades de planejamento, engenharia e/ou operação, tais como:

- Avaliação de compatibilidade ou equivalência de padrões de materiais alternativos, necessários para evolução tecnológica ou reduções de custo;
- Projetos especiais de ligações de clientes ou extensões de redes não padronizadas;
- Cálculo de impedâncias em componentes de fase para cálculos de fluxo de potência e, conseqüentemente, avaliação das perdas elétricas;
- Cálculo de impedâncias em componentes de fase ou simétricas, para posterior determinação de correntes de curtos-circuitos e parametrização das proteções;
- Determinação de sobrecargas admissíveis e sua respectiva duração, notadamente em redes subterrâneas, em contingências previstas ou forçadas, para o planejamento de sua operação;
- Apoio à análise de situações atípicas ou falhas.

Nessas condições listadas anteriormente, a utilização de limites nominais e valores de catálogo de equipamentos, como transformadores e condutores, consiste numa simplificação nem sempre adequada, uma vez que não considera diversos aspectos, como o carregamento precedente a uma contingência e previsto após a mesma, distribuições reais de correntes, constantes de tempo de aquecimento e resfriamento.

Em particular, para instalações subterrâneas, caracterizadas por multicondutores instalados próximos, esses fatores podem ser muito relevantes.

Além disso, o padrão vigente no Brasil para o sistema de distribuição em média tensão (SDMT) aéreo consiste em redes compactas com cabos cobertos, cujas capacidades de condução foram estimadas com base em cabos nus de seção similar, sem o desenvolvimento de um método de cálculo dedicado.

Outro fator a ser considerado é a tendência esperada de se implantarem funções inteligentes de monitoramento térmico da capacidade de circuitos e componentes de rede. A essas medições devem estar associados modelos acurados para prognósticos de temperaturas e sobrecargas admissíveis em contingências, cujo domínio por parte da concessionária permite futura integração em Sistemas para Gerenciamento da Distribuição, independentemente de tecnologias proprietárias.

Em função das motivações descritas precedentemente, este trabalho é o resultado de um projeto para a extensão de modelos existentes e o desenvolvimento de novas metodologias de cálculo, que busquem atender às necessidades da AES Eletropaulo e que propiciem o aumento da produtividade, precisão e flexibilidade não encontradas nas soluções de mercado.

Dentro desse conceito, foi dada prioridade aos modelos aderentes aos padrões utilizados numa distribuidora brasileira e ao conceito de integração entre os cálculos térmicos e elétricos com a análise de redes. Essa abordagem visa obter benefícios diretos da aplicação do projeto, bem como fornecer subsídios para melhoria da precisão e agilidade das análises de rede.

a. Principais Métodos de Cálculo

A abordagem adotada neste trabalho fez uso de métodos de cálculo analíticos (mantendo a compatibilidade

com métodos normatizados existentes na literatura [1]-[8]), ao invés de mapeamentos de campo térmico, eletrostático ou magnético, o que minimiza o trabalho do usuário para a descrição e parametrização dos casos sob estudo.

Para o cálculo da elevação de temperatura de transformadores de redes de distribuição subterrâneas instalados em CT foi adotado um modelo previamente desenvolvido [9], porém com uma adaptação para o cálculo de temperaturas de CT semi-submersas.

Por outro lado, foi realizada a generalização da modelagem aplicável a condutores aéreos nus da IEEE 738 [7] para cabos com isolamento e cobertura, considerando-se os efeitos do vento sobre o cabo, diferentemente do método da IEC 60287 [2].

Para o caso dos cabos subterrâneos, o modelo térmico geral adotado permite a determinação simultânea das temperaturas e capacidades de corrente de um sistema multicondutor heterogêneo.

Na modelagem de impedâncias série consideraram-se as influências das impedâncias mútuas dos elementos metálicos do mesmo cabo, dos demais cabos, dos condutores adicionais de aterramento e do solo, segundo correções de Carson e Pollaczek.

Também foi desenvolvido um modelo geral para o tratamento de tensões e correntes induzidas de uma rede composta por diferentes tipos de cabos.

2. Desenvolvimento

O aplicativo desenvolvido chamado de TELIN contempla os diversos tipos de cálculo comentados anteriormente, organizados numa estrutura hierárquica de estudos e alternativas (Figura 1).

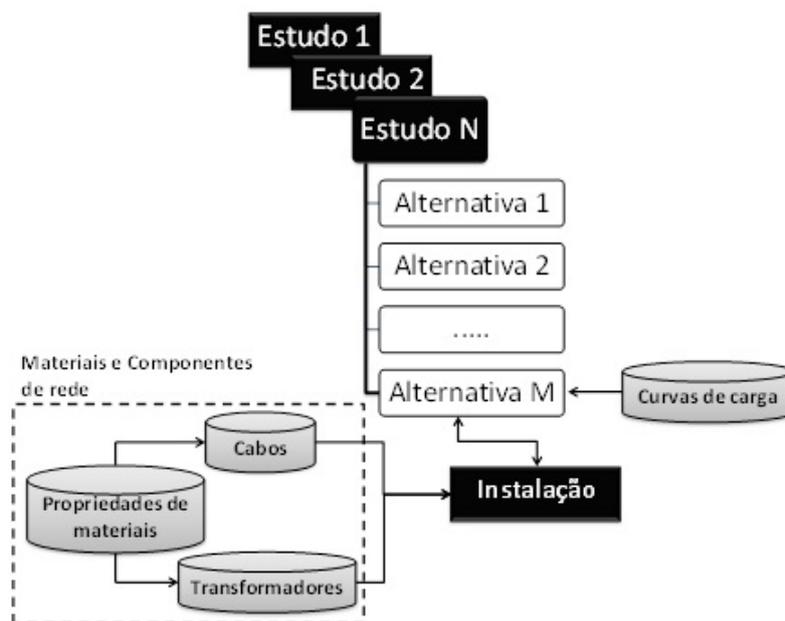


Figura 1. Diagrama esquemático da arquitetura do TELIN.

Um “Estudo” concentra os diferentes tipos de avaliação necessários para um projeto, como cálculos térmicos em regime, transitório ou condição de emergência, curto-circuito, determinação de parâmetros elétricos, tensões ou correntes induzidas. Por sua vez, cada estudo permite criar várias alternativas, de forma a realizar comparações e analisar diferentes comportamentos.

Para a composição das “Alternativas” são utilizadas bibliotecas internas de curvas de carga, propriedades térmicas e elétricas de materiais, componentes de rede e formas de instalação, as quais contêm os elementos padronizados mais usuais e empregados pela AES Eletropaulo, contribuindo para a produtividade e minimização de erros. Numa alternativa, alguns parâmetros - como curvas de carga, temperatura admissível, tipo de cabo, transposições e aterramentos - podem ser alterados, de forma a analisar diferentes comportamentos.

Cada estudo ou alternativa realizada permanece armazenado em uma base local, o que permite a sua rápida visualização posterior, conforme a Figura 2(a), bem como a emissão de um relatório detalhado com todas as informações inseridas e os resultados obtidos em função do tipo de cálculo escolhido.

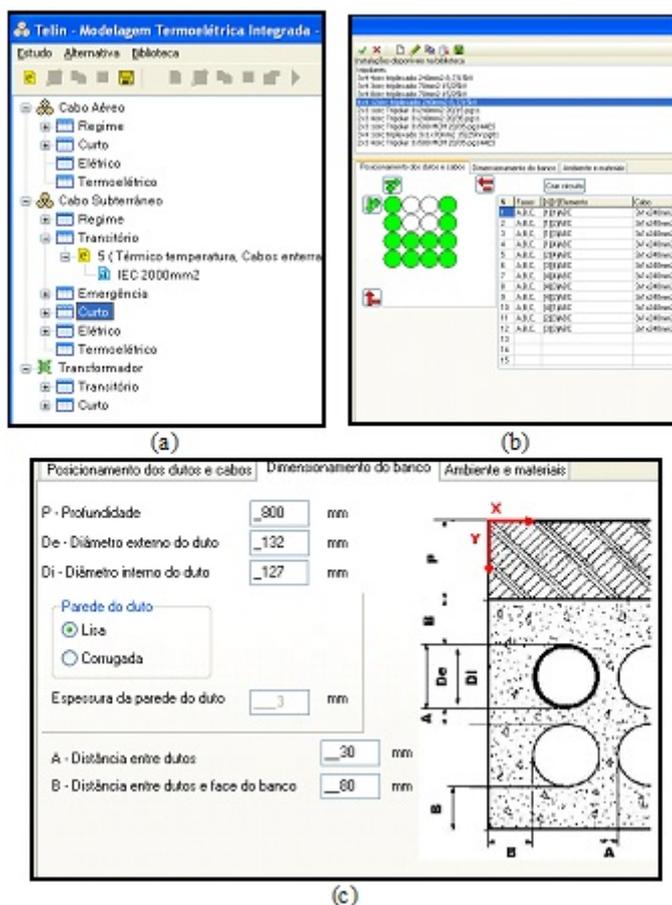


Figura 2. Interfaces do TELIN: a) Lista de estudos e alternativas, b) Visualização de uma instalação, c) Edição de um banco de dutos.

Na biblioteca “Materiais e Componentes de Rede” é possível inserir propriedades de materiais novos, embora ela já contenha valores normatizados para cobre, alumínio, XLPE, EPR, PVC, entre outros (Figura 2(b)(c)).

Os componentes de rede previamente carregados são os diferentes tipos de cabos (aéreos ou subterrâneos) e transformadores padronizados. A inserção de um novo tipo de cabo é realizada a partir do conhecimento da geometria de cada camada que o constitui (núcleo, condutor, isolamento, blindagem, etc.) e seu respectivo material.

Para transformadores: são armazenadas informações de potência nominal, tensão no primário e secundário e perdas no ferro.

No caso de curvas de carga, são armazenadas curvas típicas (por unidade ou em ampère) que são utilizadas em estudos em condições de regime ou em transitórios.

Em função do tipo de componente (cabo ou transformador) é possível seleccionar diferentes tipos de instalações: a) cabos aéreos: convencional e compacto; b) cabos subterrâneos: cabos diretamente enterrados, dutos enterrados e banco de dutos, ou c) transformadores: câmara seca ou semi-submersa e ao ar livre.

Para avaliar os valores das tensões e correntes induzidas é necessário criar uma rede conectando trechos com instalações iguais ou diferentes.

a. Integração com Análise de Redes

O TELIN foi desenvolvido visando a sua operação integrada com plataformas de cálculo de redes reais. Com essa finalidade, no presente projeto, os cálculos elétricos de impedâncias e térmicos em carga cíclica existentes no TELIN foram integrados com os módulos de fluxo de potência e modelamento de cargas do SINAP T&D [10]. Tal integração permite uma análise complexa de uma rede elétrica real (georreferenciada ou esquemática), considerando suas múltiplas variantes (tipos de cabos, de cargas, de transformadores, chaves de conexão, entre outras), de forma a diagnosticar o funcionamento da rede como um todo e detectar trechos ou transformadores próximos dos seus limites de carregamento, tanto em condição normal como de contingência.

A Figura 3 mostra o esquema de integração do TELIN com o SINAP T&D, incluindo um processo iterativo automático entre os aplicativos. Esse processo é necessário para correção das resistências elétricas, que são uma função das temperaturas de operação, que, por sua vez, dependem das correntes que circulam nos condutores de cada instalação, em cada parte da rede.

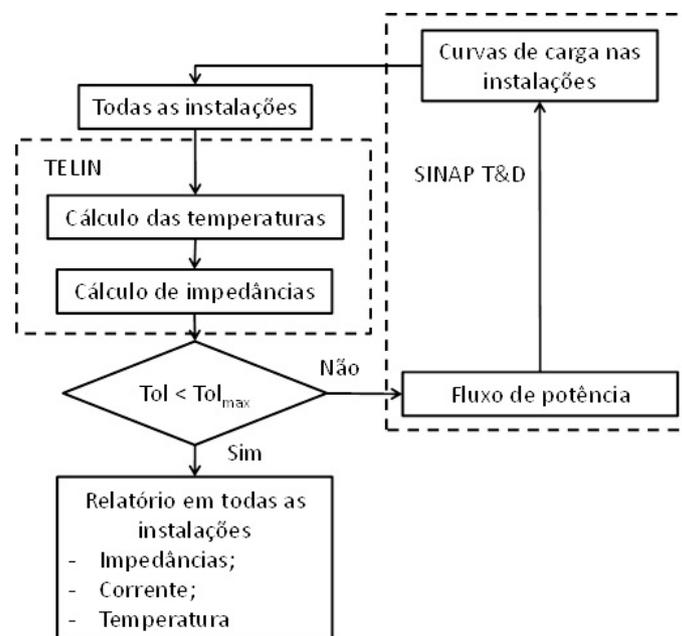


Figura 3. Diagrama de integração entre o TELIN e o SINAP T&D.

A Figura 4 ilustra algumas informações configuráveis pelo usuário ao escolher as instalações (tipo de banco de dutos e tipo da câmara dos transformadores) mais aderentes com a realidade das suas redes.

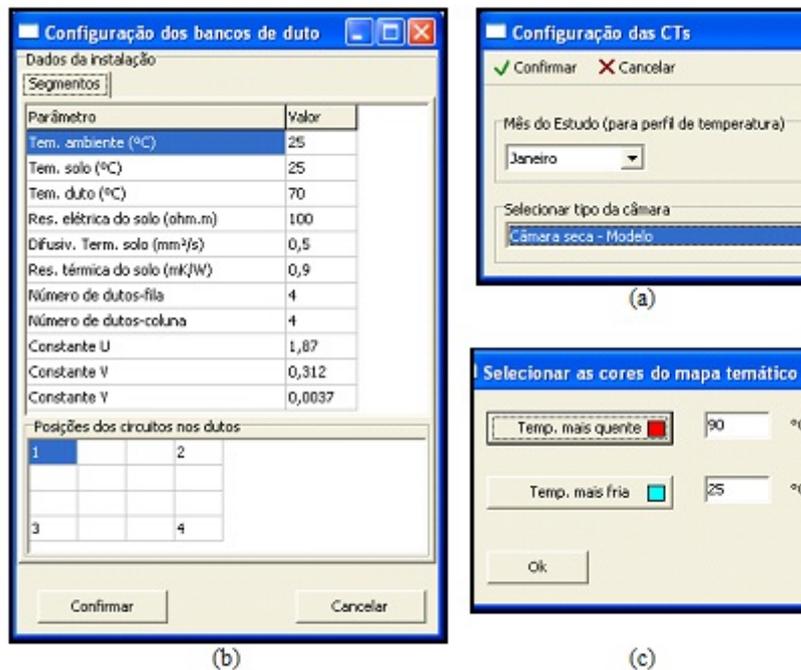


Figura 4. Interface para configuração de dados: a) câmara dos transformadores; b) banco de dutos e c) temperaturas máximas e mínimas.

b. Resultados da validação

b.1 Aplicativo independente

A validação do aplicativo desenvolvido baseou-se na comparação dos resultados obtidos pelo TELIN com cálculos alternativos em planilhas ou valores publicados em normas especializadas. Foram simulados 12 casos, vistos na Tabela I.

Os parâmetros adotados nos casos são os seguintes:

- Caso 1: Foi simulado 1 circuito. A temperatura de operação dos condutores foi fixada em 60 °C e das blindagens 70 °C.
- Caso 2 e 3: Temperatura ambiente de 25 °C, resistividade térmica da cobertura 5,0 K.m/W, do duto 6,0 K.m/W, do solo 0,9 K.m/W e do concreto 1,2 K.m/W.

Para ambos os casos, foram alocados 8 circuitos dentro do banco de dutos. Os dutos de PVC estão dentro de um envelope de concreto e não estão preenchidos. Para o caso 2, foi simulado o fator de carga (FC) de 100 % durante 24 h de operação normal. Para o caso 3, foi simulado o FC de 75 %; neste caso, o valor da corrente máxima opera constantemente durante 6 h.

- Caso 4, 5 e 6: Temperatura ambiente de 10°C, resistividade do solo 1,0 K.m/W. Profundidade do cabo diretamente enterrado 1000 mm e a distância entre os centros de dois cabos 300 mm, transposição “c rossbonded”.

- Caso 7 e 8: A temperatura de início 50 °C, temperatura final 250 °C e duração do curto circuito 1000 ms. Para o caso 7 a seção do condutor é 170,5 mm². Para o caso 8 a variável $Fator_{NAD}$ representa o fator no adiabático, a seção do condutor e da blindagem são 380 mm² e 20,9 mm² respectivamente.

- Caso 9, 10 e 11: A curva de temperatura ambiente escolhida foi do mês de Janeiro. A curva de carga escolhida em condição de operação normal representa 80 % da nominal. Para condições de contingência foi assumida uma curva de carga 120 % da corrente nominal por 24 h.

Para a câmara seca, foi escolhido o tipo de ventilação fixa. Para a câmara semi-submersa foi utilizada uma altura da água de 0,5 m.

- Caso 12: Corrente de curto circuito que um transformador de 500 kVA pode suportar por 1 s, com temperatura ambiente de 25 °C, temperatura inicial 70 °C, temperatura máxima após curto circuito 250 °C.

Tabela I. Estudos de caso para validação.

| No | Estudo | Instalação | Componente |
|---------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| Caso 1 | Elétrico | Banco dutos 3x4 | Cabo Subterrâneo 3x1x70 mm ² |
| Caso 2 | Regime | Banco dutos 3x4 Fator carga 100 % | Cabo Subterrâneo 3x1x70 mm ² |
| Caso 3 | Regime | Banco dutos 3x4 Fator carga 75 % | Cabo Subterrâneo 3x1x70 mm ² |
| Caso 4 | Regime | Diretamente Enterrado | Cabo 2000 mm ² - 400 kV |
| Caso 5 | Emergência | Diretamente Enterrado | Cabo 2000 mm ² - 400 kV |
| Caso 6 | Transitório | Diretamente Enterrado | Cabo 2000 mm ² - 400 kV |
| Caso 7 | Curto circuito Adiabático | ----- | Cabo aéreo nu 1x336 MCM Alumínio |
| Caso 8 | Curto circuito não adiabático | ----- | Cabo subterrâneo 3x1x750 MCM Alumínio |
| Caso 9 | Transitório | Ar livre | Transformador |
| Caso 10 | Transitório | Câmara seca | Transformador |
| Caso 11 | Transitório | Câmara semi-submersa | Transformador |
| Caso 12 | Curto circuito adiabático | ----- | Transformador |

A Tabela II e Tabela III mostram as matrizes de impedâncias completa e de sequência obtidas pelo módulo de cálculo elétrico do TELIN.

Tabela II. Matriz de impedâncias completa para o caso 1.

| | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0,574+0,930j | 0,059+0,777j | 0,059+0,776j | 0,059+0,835j | 0,059+0,777j | 0,059+0,776j |
| 0,059+0,777j | 0,574+0,930j | 0,059+0,770j | 0,059+0,777j | 0,059+0,835j | 0,059+0,770j |
| 0,059+0,776j | 0,059+0,770j | 0,574+0,930j | 0,059+0,776j | 0,059+0,770j | 0,059+0,835j |
| 0,059+0,835j | 0,059+0,777j | 0,059+0,776j | 2,792+0,835j | 0,059+0,777j | 0,059+0,776j |
| 0,059+0,777j | 0,059+0,835j | 0,059+0,770j | 0,059+0,777j | 2,792+0,835j | 0,059+0,770j |
| 0,059+0,776j | 0,059+0,770j | 0,059+0,835j | 0,059+0,776j | 0,059+0,770j | 2,792+0,835j |

Tabela III. Matriz de impedâncias de sequência para o caso 1

| | Z0 | Z+ | Z- |
|----|----------------|----------------|----------------|
| Z0 | 1,712 + 1,352j | 0,001 + 0,001j | 0,001 + 0,001j |
| Z+ | 0,001 + 0,001j | 0,516 + 0,155j | 0,001 + 0,000j |
| Z- | 0,001 + 0,001j | 0,001 + 0,000j | 0,516 + 0,155j |

A Tabela IV mostra os resultados obtidos para os casos 2 e 3. Foi escolhida a referência [11] para comparar os resultados.

Tabela IV. Resultado dos casos 2 e 3.

| Caso | Método | FC | I_{TELIN} (A) | I_{MC} (A) | Discrepância (%) |
|--------|--------|------|-----------------|--------------|------------------|
| Caso 2 | AES | 100% | 92 | 95 | 3,2 |
| Caso 3 | AES | 75% | 116 | 112 | 3,6 |

Para o caso de cabos diretamente enterrados, a Tabela V. mostra uma comparação entre os resultados do TELIN e a referência [4] para condições de regime e emergencial.

Tabela V. Resultado dos casos 4 e 5.

| Caso | Método de comparação (MC) | I_{TELIN} (A) | I_{MC} (A) | Discrepância (%) |
|--------|---------------------------|-----------------|--------------|------------------|
| Caso 4 | IEC | 1576 | 1550 | 1,7 |
| Caso 5 | IEC | 2072 | 2131 | 2,8 |

A Figura 5 e a Tabela VI mostram os resultados para o caso 6. Os resultados mostram o aumento da temperatura para diferentes tempos. A tabela também mostra os erros comparados com [4].

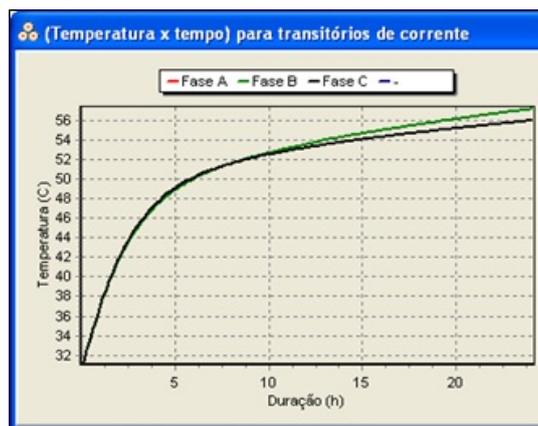


Figura 5. Curva tempo versus corrente para o caso 6.

Tabela VI. Resultados para o caso 6.

| Tempo (h) | Temp _{TELIN} (°C) | Temp _{IEC} (°C) | Discrepância (%) |
|-----------|----------------------------|--------------------------|------------------|
| 0 | 31,3 | 31,3 | 0,0% |
| 1 | 37,3 | 37,0 | 0,8% |
| 2 | 41,8 | 41,8 | 0,0% |
| 3 | 44,8 | 44,8 | 0,0% |
| 4 | 46,9 | 46,9 | 0,0% |
| 5 | 48,3 | 48,3 | 0,0% |
| 6 | 49,4 | 49,4 | 0,0% |
| 12 | 52,6 | 52,7 | 0,2% |
| 24 | 56,0 | 56,1 | 0,2% |

Subsequentemente, em um caso particular para o mesmo condutor do caso 6, com uma curva de carga transitória (Figura 6 (a)), o perfil da variação da temperatura pode ser obtida e apresentada na Figura 6 (b).

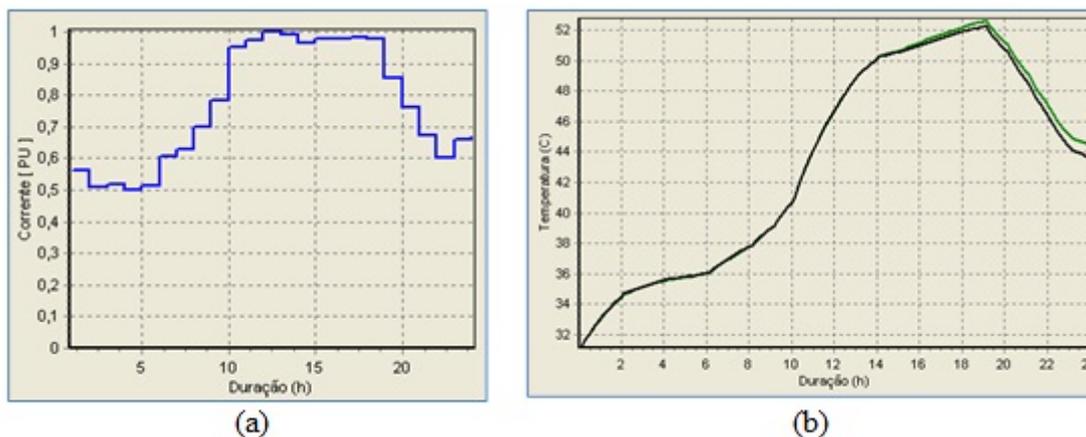


Figura 6. Curvas utilizadas no cálculo de transitório de temperatura: a) Curva de carga em pu, b) Curva de temperatura.

Os resultados do cálculo adiabático e não adiabático (caso 7 e 8) podem ser vistos na Tabela VII. A comparação foi realizada utilizando um método alternativo.

Tabela VII. Resultados para os casos 7 e 8.

| Caso | Camada | ICC _{TELIN} (A) | Fator _{NAD} | ICC _{NAD} (A) |
|--------|------------|--------------------------|----------------------|------------------------|
| Caso 7 | Condutor | 18577 | ---- | ---- |
| Caso 8 | Condutor | 41403 | 1,0135 | 41961 |
| | Blindagem. | 3446 | 1,1079 | 3817 |

Os resultados das temperaturas dos transformadores em diferentes instalações podem ser vistas na Tabela VIII para duas situações (normal de operação e contingência).

Tabela VIII. Resultados para os casos 9, 10 e 11.

| Tipo de instalação | Componente | Temperatura máxima (°C) | |
|----------------------|--------------|-------------------------|--------------|
| | | Normal de operação | Contingência |
| Ar livre | Óleo | 52,9 | 57,2 |
| | Ponto quente | 70,1 | 90,4 |
| Câmara seca | Câmara | 29,0 | 30,2 |
| | Óleo | 54,0 | 59,3 |
| | Ponto quente | 70,4 | 92,1 |
| Câmara semi-submersa | Câmara | 28,7 | 29,7 |
| | Óleo | 53,7 | 58,8 |
| | Ponto quente | 70,1 | 91,6 |

Para o caso 12, o valor da corrente de curto circuito obtido pelo TELIN para o transformador de 500 kVA foi de 47,85 kA. Este valor foi o mesmo obtido por meio de cálculos manuais.

b.1 Aplicativo Integrado

A Figura 7 mostra uma rede subterrânea reticulada AUGUSTA pertencente à AES-Eletropaulo. Esta rede possui quatro alimentadores primários (AUG-201, AUG-202, AUG-203 e AUG 204), 144 barras e 530 trechos, 173 câmaras transformadoras e 56 minis-reticulados. Os tipos de cabos usados são: 3x1x2/0 AWG Cu-Papel (439 trechos) e 3x500 MCM Cu-Papel (91 trechos).

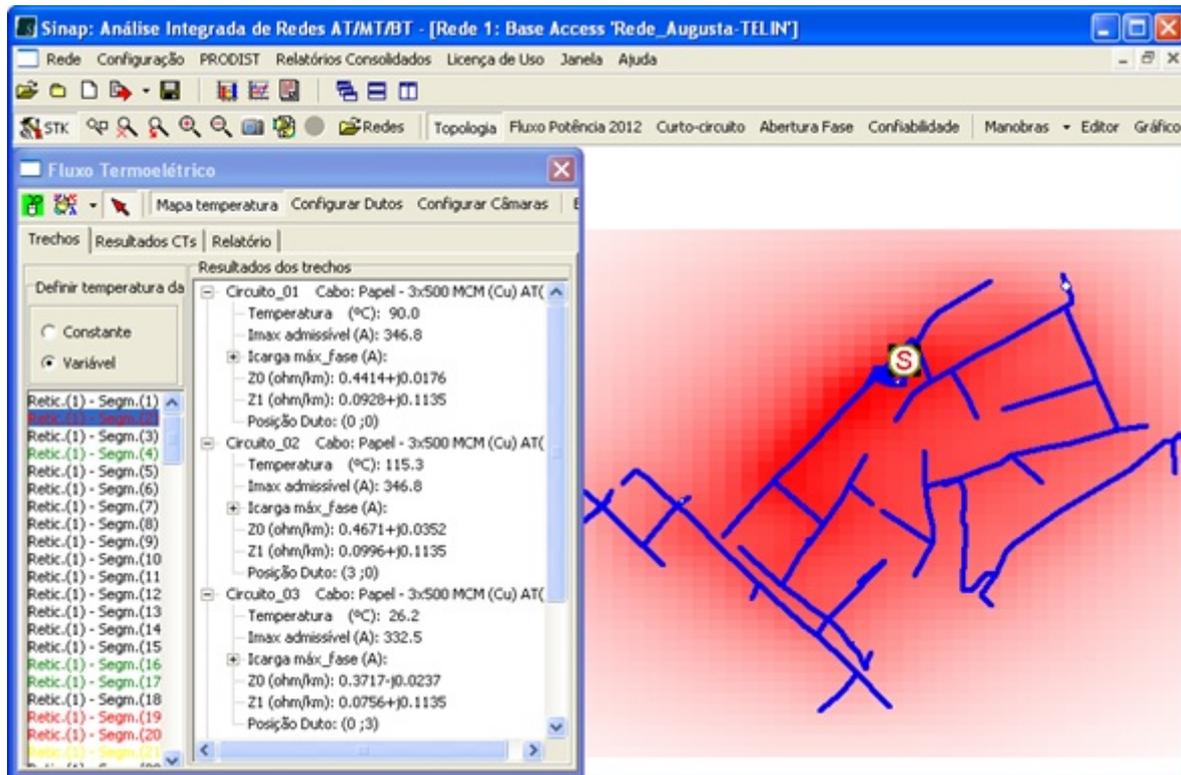


Figura 7. Interface entre o TELIN e o SINAP para visualização dos resultados

As simulações foram realizadas considerando um único tipo de banco de duto do tipo 4x4. Suas dimensões e suas condições operacionais são as mesmas detalhadas no caso 1.

Serão analisadas duas situações. A primeira analisa uma comparação entre as perdas elétricas dos cabos sobre duas diferentes condições operacionais (a temperatura avaliada segundo critério iterativo do TELIN e assumindo que todos os cabos estão operando na mesma temperatura máxima admissível de 90°C). A segunda analisa os perfis de temperatura nos condutores para um caso de contingência dupla.

Da primeira situação, os valores das perdas de energia no período de um dia obtidas para a primeira condição foi de 1042 kWh e para a segunda condição foi de 899 kWh. Para uma condição normal de operação, a faixa de temperatura de operação calculada dos trechos varia entre 25,5-50,5 °C, o que representa uma rede pouco carregada (Tabela IX). Dado que as resistências elétricas dos trechos (consequentemente as perdas elétricas) dependem da temperatura, sua redução em comparação com 90 °C é de aproximadamente 13 %.

Da Tabela IX, é possível visualizar que, em condições normais de operação, a grande maioria das câmaras transformadoras opera entre 50-70 °C e a maioria dos trechos operam abaixo de 30 °C. Por outro lado, este comportamento muda no caso de uma dupla contingência, quando alguns trechos operam acima dos seus limites admissíveis. Esses trechos podem ser vistos na Figura 8.

Tabela IX. Número de transformadores e trechos em diferentes faixas de temperatura.

| Condição de operação | Equip. | Temperatura (°C) | | | | |
|----------------------|---------|------------------|-------|-------|-------|-----|
| | | < 30 | 30-50 | 50-70 | 70-90 | >90 |
| Normal de operação | Trafos. | 0 | 0 | 161 | 12 | 0 |
| | Trechos | 416 | 112 | 2 | 0 | 0 |
| 1ª contingência | Trafos. | 0 | 147 | 26 | 0 | 0 |
| | Trechos | 409 | 100 | 21 | 0 | 0 |
| 2ª contingência | Trafos. | 0 | 120 | 53 | 0 | 0 |
| | Trechos | 428 | 48 | 29 | 18 | 7 |

A Figura 8 mostra os perfis de temperatura na rede AUGUSTA quando foi submetida a uma contingência dupla, ou seja, quando os alimentadores primários 201 e 202 foram desligados. Da figura é possível visualizar uma região onde a temperatura dos trechos atinge valores acima de 90 °C. Em função do número de horas de operação nesta condição, os isolamentos destes trechos podem ficar comprometidos, o que pode causar uma futura falta elétrica.

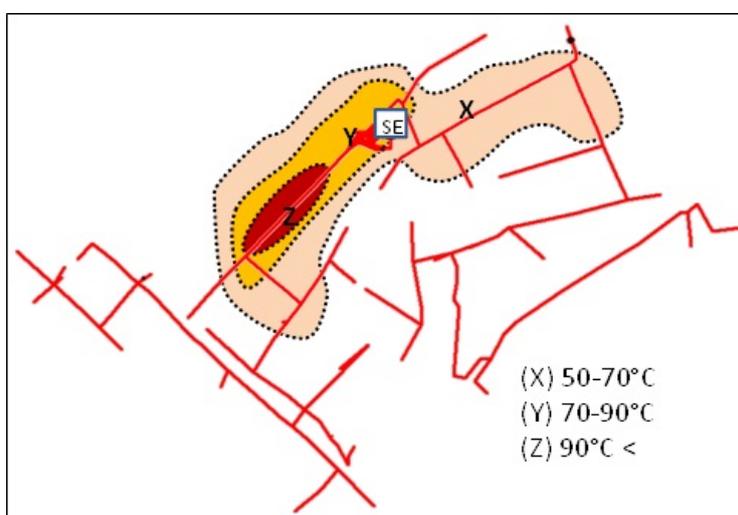


Figura 8. Perfil de temperatura na rede AUGUSTA submetida a dupla contingência.

c. Comentários

Após a execução dos 12 casos simulador no item 3(a) foram observadas discrepâncias abaixo de 4%. Estes valores das discrepâncias obtidos são considerados aceitáveis considerando que:

- i. Em muitos dos casos simulados, alguns parâmetros tiveram que ser estimados dado que os seus valores reais não foram detalhados ou documentados, e
- ii. Os métodos de cálculo aplicados em alguns casos são diferentes.

3. Conclusões

O presente trabalho abordou de forma ampla os aspectos de dimensionamento de cabos e transformadores, que se constituem nos principais componentes de redes de distribuição, aéreas ou subterrâneas, de baixa até alta tensão, por meio do desenvolvimento de um aplicativo amigável capaz de aumentar a produtividade e acurácia durante as avaliações e os diagnósticos realizados pelas equipes de planejamento, manutenção e operação.

O aplicativo apresentado integra de forma eficiente métodos de cálculo térmico e elétrico possibilitando o

diagnostico mais eficiente dos componentes da rede elétrica. Esta integração visa cobrir uma carência existente nos aplicativos comerciais existentes no mercado.

O aplicativo TELIN, armazena uma serie de informações padronizadas (tipos de instalações, tipos de cabos, entre outros) além de métodos de cálculo confiáveis que permitem obter resultados mais aderentes da realidade.

Além disso, foram apresentadas contribuições originais, as quais compreendem metodologia de capacidade de condução de cabos cobertos e isolados, tratamento simultâneo de múltiplos circuitos subterrâneos e simulação de transformadores em câmaras semi-submersas.

Outro aspecto inédito foi a integração de análise térmica com fluxo de potência, permitindo a execução de um “fluxo térmico e elétrico” automático para todos os componentes de uma rede de distribuição, com geração de mapas térmicos tanto em condição de regime normal como de contingência da rede de distribuição.

Finalmente, o aplicativo disponibiliza metodologias de cálculo de forma a qualificar as concessionarias durante a otimização de padrões construtivos e a melhoria da operação das suas redes.

4. Referências bibliográficas

1. IEC Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses –General, IEC 60287-1-1 Ed. 2.0 b, Dez. 2006.
2. IEC Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses —Section 2: Sheath eddy current loss factors for two circuits in flat formation, IEC IEC 60287-1-2 ed1.0, Nov. 1993.
3. IEC Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses –Current sharing between parallel single-core cables and calculation of circulating current losses, IEC 60287-1-3 ed1.0, May. 2002.
4. IEC Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables -Part 1: Cyclic rating factor for cables up to and including 18/30 (36) kV, IEC 60853-1, Jan. 1985.
5. IEC Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables - Part 2: Cyclic rating of cables greater than 18/30 (36) kV and emergency ratings for cables of all voltages, IEC 60853-2, Jul. 1989.
6. IEC Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects, IEC 60949 ed1.0, Nov. 1988.
7. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors, IEEE Standard 738-2006 (Revision of IEEE Std 738-1993), Jan. 2007.
8. ABNT Cálculo da capacidade de condução de corrente de cabos isolados em regime permanente (fator de carga 100%), NBR 11301, Set.. 1990.
9. M. R. Gouvea, E. J. Robba; J. R. S. Moreira, E. C. Belvedere and P. A. Brunheroto, "Thermal simulation for distribution transformers in underground vaults", CIRED 2005. 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Turin, Italy, Jun. 2005.
10. M. A. Pelegrini, C. M. V. Tahan, J. C. Guaraldo, H. Kagan e B. V. Mello, "Otimização do Sistema de Distribuição Subterrâneo Reticulado", P&D - Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL, vol. 1, pp. 49-51, Ago. 2011.