

Desenvolvimento de aplicativo computacional para a determinação da capacidade de corrente em tempo real

Eduardo Amadeu Dutra MORESI

Vagner Gulim DAMACENO

Jair Alves BARBOSA

Candido Guerrero SALGADO

Mário de Oliveira BRAGA FILHO

Jeysel de Paula MARTINS

Gabriel Alexandre de Freitas SILVA

Késsia Cristina Alves BARBOSA

Jessica Luanne dos Santos OLIVEIRA

Kelvin de Assis Ferreira Dias NEVES

Curso de Ciência da Computação

Mestrado em Gestão do Conhecimento e Tecnologia da Informação

Universidade Católica de Brasília

Brasília, DF, 71966-700, Brasil

y

José Henrique de Oliveira VILELA

Companhia Energética de Brasília

Brasília, DF, 71.215-902, Brasil

RESUMO

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um aplicativo computacional para a determinação da capacidade de corrente em tempo real. O aplicativo será utilizado pela Companhia Energética de Brasília para planejar a alocação de cabos em banco de dutos subterrâneos. Descreve-se o modelo de processos, compreendendo as seguintes atividades que serão executadas de forma iterativa: planejamento; requisitos, modelagem, construção, integração e outros. A seguir, é apresentada uma descrição do projeto que, através da modelagem do circuito térmico dos cabos instalados em banco de dutos, possibilitará determinar com precisão: os valores de capacidade de condução de corrente em regime permanente dos circuitos no tempo real; os carregamentos econômicos dos condutores considerando os custos envolvidos (instalação e, principalmente, perdas); as faixas ótimas de carregamento que serão subsídios para a escolha do condutor econômico num projeto de rede subterrânea; a distribuição otimizada dos condutores no banco de dutos. A versão atual do protótipo permite a criação de um circuito e planejar a sua alocação em um banco de dutos.

Palavras-chave: Algoritmos Computacionais, Condução de Corrente, Ampacidade, Banco de Dutos Subterrâneos.

1. INTRODUÇÃO

O cálculo da ampacidade é realizado através de um Projeto de P&D executado pela Universidade Católica de Brasília (UCB) e Fundação Universa, especializadas em desenvolvimento de projetos científicos, e a Companhia Energética de Brasília (CEB), a fomentadora. Este projeto com duração prevista de 18 meses envolve estudo científico nas áreas de engenharia e computação. A fase atual do projeto, de acordo com o cronograma estabelecido, está executando a implementação computacional dos algoritmos na plataforma de testes.

Nesta fase, considera-se como etapa principal a especificação dos requisitos, onde são traduzidas as necessidades operacionais em descrição das funcionalidades a serem executadas, levantadas as restrições funcionais e são apresentadas as interfaces gráficas de interação com os usuários.

É importante lembrar que ainda não há uma visão de todas as funcionalidades que serão contempladas no sistema, mas acredita-se que esta visão se tornará próxima da ideal à medida que acontecerem os ciclos de desenvolvimento e futuras interações dos usuários com os módulos disponibilizados para testes e correções.

Portanto, o objetivo desse artigo é apresentar o estado atual de desenvolvimento do aplicativo computacional para a determinação da capacidade de corrente em

tempo real, visando apoiar a alocação de cabos de energia em dutos subterrâneos.

2. DESCRIÇÃO DO MODELO DE PROCESSO

No desenvolvimento desse projeto de P&D será utilizado o Rational Unified Process (RUP) [1]. O RUP é um processo proprietário de engenharia de software criado pela Rational Software Corporation, adquirida pela IBM.

O RUP usa a abordagem da orientação a objetos em sua concepção e é projetado e documentado utilizando a notação UML (*Unified Modeling Language*) [2] para ilustrar os processos em ação.

É um processo considerado pesado e preferencialmente aplicável a grandes equipes de desenvolvimento e a grandes projetos, porém o fato de ser amplamente customizável torna possível que seja adaptado para projetos de qualquer escala. Para a gerência do projeto, o RUP provê uma solução disciplinada de como assinalar tarefas e responsabilidades dentro de uma organização de desenvolvimento de software.

A customização do processo de software a ser adotado será o iterativo e incremental, realizada tomando como ponto de partida o próprio RUP, de acordo com as necessidades atuais do projeto. Uma iteração envolve as atividades de desenvolvimento que levam ao *release* de uma versão estável e executável do produto, junto com qualquer outro elemento periférico necessário para utilizar esse *release* [3].

Portanto, uma iteração de desenvolvimento é, de alguma forma, uma passagem completa por pelo menos todas as disciplinas: Requisitos, Análise e Design, Implementação e Teste. É como um pequeno projeto cascata em si mesmo.

Deve-se observar que os critérios de avaliação são estabelecidos quando cada iteração é planejada. A duração de uma iteração variará de acordo com o tamanho e a natureza do projeto, mas é provável que várias construções sejam feitas em cada iteração, conforme especificado no Plano de cada iteração. Essa é uma consequência da abordagem de integração contínua recomendada no RUP: conforme os componentes testados da unidade ficam disponíveis, eles são integrados, em seguida, uma construção é produzida e sujeita ao teste de integração.

Dessa maneira, a capacidade do software integrado cresce quando a iteração continua em direção às metas definidas quando a iteração foi planejada. Pode ser demonstrado que cada construção representa uma mini-iteração por si mesma. A diferença está no planejamento necessário e na formalidade da avaliação realizada.

Como vantagens deste modelo, pode-se destacar:

- os riscos são reduzidos mais cedo, pois os elementos são integrados progressivamente;
- os requisitos variáveis são acomodados com mais facilidade;
- a melhoria e o refinamento do produto são facilitados, resultando em um produto mais robusto;
- as organizações podem aprender a partir dessa abordagem e melhorar seus processos;
- a capacidade de reutilização aumenta.

Uma abordagem interessante no uso da definição do tamanho das iterações, e que será usada neste projeto, é a denominada *timebox*, isto é, a programação de uma iteração será considerada fixa e o escopo do conteúdo da iteração gerenciado para atender a essa programação. No referido projeto a *timebox* será de 2 semanas, podendo, a critério da gerência, ser reduzida para 1 semana.

De acordo com o processo definido, as seguintes atividades serão executadas em cada iteração: planejamento; requisitos, modelagem, construção, integração e outros.

A atividade de planejamento enfoca o plano do projeto, o gerenciamento de riscos, o monitoramento do progresso e métricas. A finalidade do Planejamento do Projeto é:

- fornecer uma estrutura para gerenciar projetos de software intensivo;
- fornecer orientação prática para planejar, formar a equipe, executar e monitorar projetos;
- fornecer uma estrutura para gerenciar riscos.

A atividade de Planejamento fornece a estrutura pela qual um projeto é criado e gerenciado. Assim, todas as outras atividades são utilizadas como parte do trabalho do projeto.

A atividade de requisitos suporta a elicitação dos requisitos dos clientes e a sua transformação em um conjunto de requisitos de Produtos de Trabalho, no escopo do sistema a ser construído e fornece requisitos detalhados sobre o que faz o sistema.

A finalidade da disciplina requisitos é:

- estabelecer e manter concordância com os clientes e outros investidores sobre o que o sistema deve fazer;
- oferecer aos desenvolvedores do sistema uma compreensão melhor dos requisitos do sistema;
- definir os limites do sistema (ou delimitar o sistema);
- fornecer uma base para planejar o conteúdo técnico das iterações;
- fornecer uma base para estimar o custo e o tempo de desenvolvimento do sistema;
- definir uma interface de usuário para o sistema, focando nas necessidades e metas dos usuários.

A atividade de modelagem define como transformar os Requisitos dos Produtos de Trabalho em Produtos de Trabalho especificando a Análise e o Design do software que o projeto desenvolverá.

As finalidades de Análise e Design são:

- transformar os requisitos em um design do sistema a ser criado;
- desenvolver uma arquitetura sofisticada para o sistema;
- adaptar o design para que corresponda ao ambiente de implementação, projetando-o para fins de desempenho.

Nessa atividade os principais diagramas do sistema serão produzidos, bem como o projeto de banco de dados. Todos os artefatos gerados na modelagem irão constar do Documento de Arquitetura de Software

A atividade de construção define como desenvolver, organizar, testar a unidade e integrar os componentes implementados de acordo com as especificações do design.

A finalidade da implementação é:

- definir a organização do código em termos de subsistemas de implementação organizados em camadas;
- implementar os elementos de design em termos de elementos de implementação (arquivos de origem, executáveis e outros);
- testar os componentes desenvolvidos como unidades;
- integrar os resultados produzidos por implementadores individuais (ou equipes) ao sistema executável.

A disciplina Implementação limita o seu escopo a como as classes individuais devem ser testadas em unidade. O teste de integração é descrito a seguir.

Durante esta atividade de integração, o responsável pelo repositório irá conferir os padrões de codificação, a correta execução dos casos de teste e, estando tudo em conformidade, irá realizar uma atualização do novo código com o código do repositório, gerando a última versão estável.

A atividade outros foi pensada como uma atividade para contemplar as atividades administrativas do projeto, tais como a elaboração periódica de relatórios e apresentações.

3. DESCRIÇÃO DO PROJETO

O sistema subterrâneo da rede de distribuição da CEB é constituído de cabos isolados instalados em banco de dutos agrupados com os mais diversos tipos e bitolas de condutores. A determinação da capacidade de condução pelos métodos convencionais, aplicação de fatores de agrupamentos obtidos de tabelas e normas, não produzem resultados otimizados. Além disso, nesses cálculos não se considera a possibilidade dos circuitos operarem com carregamentos e fatores de carga diferenciados. Na maioria das vezes, o resultado destes cálculos apresenta valores conservadores, não

refletindo a real capacidade de condução de corrente suportada pelos cabos.

Esse projeto de P&D tem por objetivo o desenvolvimento de um aplicativo computacional que, através da modelagem do circuito térmico dos cabos instalados em banco de dutos, possibilitará determinar com precisão:

- os valores de capacidade de condução de corrente em regime permanente dos circuitos no tempo real;
- os carregamentos econômicos dos condutores considerando os custos envolvidos (instalação e, principalmente, perdas);
- as faixas ótimas de carregamento que serão subsídios para a escolha do condutor econômico num projeto de rede subterrânea;
- a distribuição otimizada dos condutores no banco de dutos.

Assim, serão calculadas as perdas elétricas para diversas situações de carregamento e distribuição, seus custos associados e a determinação das faixas mais adequadas. Nesses cálculos serão incorporadas técnicas de análise de riscos e incertezas, considerando as variações comuns no comportamento da carga.

Para a determinação em tempo real da capacidade de condução serão considerados os parâmetros da configuração física da instalação, as características dos cabos, os carregamentos dos circuitos adjacentes, o fator de carga, o estado do disjuntor e a temperatura da capa externa do cabo. Através de um processo iterativo serão determinadas as conduções máximas de corrente permitida para os circuitos escolhidos.

Os carregamentos dos circuitos e o valor da temperatura da capa externa do cabo de referência serão verificados no tempo real e obtidos através do sistema de supervisão da CEB. A supervisão de corrente é uma grandeza já existente, a supervisão da temperatura será agregada através deste projeto onde sensores serão instalados nas saídas dos dutos da subestação, sendo que os dados gerados serão integrados à remota da subestação.

O aplicativo para a determinação da capacidade de condução de corrente em tempo real será integrado ao sistema de supervisão e controle da CEB e através de uma interface o despachante do sistema poderá selecionar o circuito ao qual se quer determinar a capacidade de condução, simulando contingências ou carregamentos adversos aos circuitos adjacentes.

Necessidades

Atualmente a CEB opera seus circuitos subterrâneos tendo os valores limites de condução obtida através de procedimento de cálculo dado pela norma NBR 11301:90 - Cálculo da Capacidade de Condução de Corrente de Cabos Isolados em Regime Permanente (fator de carga 100%). Esse método resulta valores de condução de corrente que podem ser considerados como conservadores.

O software em desenvolvimento terá como objetivo a obtenção dos seguintes resultados:

- determinação da ampacidade de cabos em banco de dutos com diversidades de bitolas e tipos de cabos;
- determinação em tempo real da capacidade de condução de corrente de cabos com diversidades de carregamentos e fatores de carga dos circuitos adjacentes;
- avaliação do carregamento máximo admissível de circuitos em contingências;
- determinação das perdas elétricas;
- determinação da distribuição otimizada dos condutores no banco de dutos;
- determinação do carregamento econômico dos condutores incorporando técnicas de análise de riscos e incertezas.

Baseado no cenário acima explicitado, o software centralizará as informações e será capaz de realizar cálculos que visam a alocação e/ou definição de banco de dutos para que atendam os requisitos de engenharia. No nível do usuário, terá uma interface gráfica intuitiva, que forneça funcionalidades que possibilitam a realização deste processo de forma eficiente e eficaz.

O software incluirá em seus cálculos os seguintes atributos:

- resistências térmicas externas aos dutos – incluindo as resistências térmicas próprias e mútuas associadas às diversas seções do banco de dutos;
- resistências térmicas externas para cabos diretamente enterrados – considerando as resistências térmicas próprias e mútuas externas aos cabos para instalações diretamente enterradas;
- acoplamentos térmicos associados à configuração de banco de dutos - determinará os acoplamentos térmicos relacionados a cada duto da instalação em bancos, de forma que estes possam ser utilizados para o *load flow* térmico visando identificar a alocação de cabos que resultará em uma maximização da transmissão da corrente;
- alocação de cabos em banco de dutos – definirá a alocação dos cabos em uma instalação de banco de dutos de forma a otimizar as correntes admissíveis para os diversos cabos;
- fator de carga dos circuitos - determinará a influência da variação cíclica da carga no modelo térmico dos cabos e de suas instalações;
- resistências térmicas e elétricas dos cabos - calculará as resistências térmicas elétricas dos cabos;
- perdas no cabo - determinará as equações matemáticas para o cálculo das diversas perdas nos cabos em uma instalação subterrânea;
- cálculo das ampacidades e das temperaturas – determinará, através de um sistema de equações, as ampacidades e as temperaturas nos diversos condutores da instalação;
- contingências - determinará as ampacidades para perdas de circuitos de uma instalação;
- dimensionamento do condutor - determinará a bitola do condutor dado à máxima potência a ser transmitida

e o tipo de isolamento baseado no critério da temperatura máxima admissível;

- medições em tempo real – o sistema deverá fazer uso de método iterativo para as correções das variáveis de contorno (resistividades térmicas do solo, temperatura ambiente, resistividades do concreto, etc.) tendo como referência as medições de temperaturas e correntes em tempo real.

Características

Até o momento foram identificadas as seguintes funcionalidades a serem fornecidas pelo sistema:

- definir um banco de dutos;
- alocar Cabos em banco de dutos;
- simular cabos em um banco de dutos, para realização desta funcionalidade o sistema deverá fazer comunicação com sistemas internos da CEB. Em etapa posterior do projeto serão estabelecidos os critérios desta comunicação;
- reaproveitar alocações existentes;
- gerenciar os dados das configurações dos cabos;
- gerenciar os dados dos técnicos que utilizarão o sistema.

Foram levantados os seguintes requisitos suplementares (não-funcionais):

- o software deverá ser multiplataforma, ou seja, ser possível de ser executado em qualquer tipo de sistema operacional, exceto sistemas operacionais de tecnologia móvel;
- o sistema deve ser implementado em linguagem de programação não proprietária e desktop;
- o sistema deverá ser auditável através de logs e trilhas de auditoria.

4. ALGORITMOS COMPUTACIONAIS

A tabela I apresenta os algoritmos desenvolvidos na segunda etapa do Projeto. Foram definidos onze algoritmos para permitir alcançar os objetivos propostos. Esses algoritmos estão sendo implementados no aplicativo computacional que está sendo desenvolvido.

Antes da implementação, todos os algoritmos foram testados com valores de referência para possibilitar a depuração de possíveis erros. Para ilustrar esse desenvolvimento, a próxima seção apresenta o algoritmo de alocação de cabos em banco de dutos.

O algoritmo de alocação de cabos em banco de dutos busca o posicionamento ideal dos vários circuitos dentro de um banco de dutos. O aplicativo possibilita alocar os vários circuitos dentro do banco de dutos a fim de que:

- a ampacidade dos circuitos no banco de dutos seja maximizada;
 - a ampacidade de um dado circuito seja maximizada.
- Podem ainda apresentar as seguintes condições:
- todos os circuitos são de mesmo carregamento;
 - os circuitos apresentam carregamentos distintos.

Tabela 1. Algoritmos desenvolvidos para o Projeto de P&D.

Algoritmo	Descrição
Resistências Térmicas Externas aos Dutos	Determinação das resistências térmicas próprias e mútuas associadas às diversas seções do banco de dutos.
Resistências Térmicas Externas para cabos diretamente enterrados	Determinação das resistências térmicas próprias e mútuas externas aos cabos para instalações diretamente enterradas.
Acoplamentos térmicos associados a configuração de banco de dutos	Determinação dos acoplamentos térmicos relacionados a cada duto da instalação em bancos, de forma que estas possam ser utilizadas para o loadflow térmico para a determinação da alocação de cabos que resultem numa maximização da transmissão da corrente.
Alocação de cabos em banco de dutos	Definição da alocação dos cabos de energia em uma instalação de banco de dutos de forma a resultar a otimização das correntes admissíveis dos diversos cabos.
Fator de carga dos circuitos	Determinação da influencia da variação cíclica da carga no modelo térmico dos cabos e suas instalações.
Resistências térmicas e elétricas dos cabos de energia	Calculo das resistências térmicas e elétricas dos cabos
Perdas no cabo	Determinação das equações matemáticas para o cálculo das diversas perdas nos cabos para instalação subterrânea
Calculo das ampacidades e temperaturas	Sistema de equações para a determinação das ampacidades e temperaturas nos diversos condutores da instalação
Contingências	Determinação das ampacidades para perdas de circuitos de uma instalação
Dimensionamento do condutor	Determinação da bitola do condutor dado à máxima potência a ser transmitida e o tipo de isolamento baseado no critério da temperatura máxima admissível
Medições em tempo real	Método iterativo para as correções das variáveis de contorno (resistividades térmicas do solo, temperatura ambiente, resistividades do concreto, etc.) tendo como referencia as medições de temperaturas e correntes em tempo real

Esta alocação não verifica as interações de campos magnéticos ou perdas por indução de cabos paralelos, o objetivo é ocupar os espaços físicos do banco de dutos que resultem num melhor aproveitamento térmico. O algoritmo é baseado no acoplamento térmico associado aos dutos.

Acoplamento térmico dos dutos

Considerando um sistema de banco de “n” dutos, cada duto é uma fonte de calor $Q(j)$, onde j varia de 1 até n . Um duto “p” apresenta uma elevação de temperatura $\Delta\theta(p)$, que é o resultado das contribuições das diversas fontes de calor $Q(j)$. Cada fonte de calor está termicamente acoplada a este banco através de suas resistências térmicas $R(p,j)$, que podem ser representadas como em (1).

$$\Delta\theta(p) = Q(j) \sum_{j=1}^n R(p,j) \quad P=1,n \quad (1)$$

O acoplamento térmico é o equivalente térmico associado ao duto “p” considerando todas as fontes térmicas de mesma amplitude. Assim, associa-se a cada duto um valor de resistência de acoplamento que é o resultado da soma de sua resistência térmica própria, e as mútuas relacionadas. A equação (2) apresenta o acoplamento $R_{Ac}(p)$ do duto “p”.

$$R_{Ac}(p) = \sum_{j=1}^n R(p,j) \quad P=1,n \quad (2)$$

Observe que num sistema de “n” dutos, ter-se-á “ n^2 ” valores de resistências externas aos dutos e “n” valores de resistências de acoplamentos.

As resistências de acoplamento fornecem valores relativos de aquecimento nos diversos dutos da instalação, assim quanto maior o valor destas resistências maior será a elevação da temperatura neste duto. Como será visto no algoritmo de alocação, os cabos de maior condução deverão ser alocados nos dutos que apresentem menor valor de acoplamento.

Cabos com carregamentos iguais

Para a configuração em banco de dutos, onde todos os cabos são de mesmo carregamento (mesmo tipo e bitola), a alocação será feita associando-se a cada duto uma resistência de acoplamento térmico. Os primeiros dutos a serem ocupados serão aqueles com valores de resistências de acoplamentos menores. Assim, ordenam-se as resistências de acoplamentos dos dutos do menor para o maior valor, resultando nas correspondentes alocações dos circuitos. Essa forma de alocação é válida para cabos tripolares.

Para cabos singelos, a alocação deve atender a requisitos de manutenção e projeto, uma vez que as fases dos circuitos devem atender a arranjos físicos definidos pela concessionária de distribuição de energia elétrica. Os arranjos típicos de cabos singelos podem ser: horizontal, vertical e triangular.

Para possibilitar a distribuição dos cabos no banco, as coordenadas de cada duto devem ser conhecidas.

Através destas, um sistema de busca deve pesquisar os dutos ainda não alocados e suas resistências de acoplamentos e distribuir os cabos de forma a atender os arranjos físicos apresentados na figura 1. Nesse caso, é associado a cada cabo “i” um duto “j” que será representado por C(i,j), ou seja, o cabo “i” é alocado ao duto “j”. Observe que em uma instalação onde $j \geq i$, a quantidade de dutos é maior ou igual à de cabos a serem alocados.

Cabos com carregamentos diferentes

Para uma configuração em banco de dutos onde os cabos apresentam carregamentos distintos, as resistências de acoplamento são modificadas pelo fator de carregamento dos circuitos – QC(i).

Esse fator é a relação do carregamento do circuito C(i) pelo menor valor de carregamento dos circuitos instalados no banco de dutos Min C, que é dado pela relação apresentada em (3).

$$QC(i) = \frac{C(i)}{\text{Min } C} \quad (3)$$

As resistências de acoplamento serão modificadas na medida em que os cabos forem sendo alocados no banco. No caso de cabos já alocados, as resistências deverão ser modificadas com a mesma tratativa da metodologia que segue.

Dada a matriz de resistências térmicas externas aos dutos, a alocação de um cabo no banco modifica a matriz multiplicando a coluna correspondente ao duto do cabo alocado pelo fator de carregamento do mesmo. A inclusão de um único circuito modificará todas as resistências de acoplamento, sendo mais significativa no duto correspondente.

Para o exemplo apresentado abaixo, acrescentou-se um circuito no duto 1, de acordo com o apresentado na figura 1. As resistências externas foram modificadas multiplicando-se a coluna 1 pelo fator de carregamento do circuito, resultando uma nova resistência de acoplamento. A cada circuito acrescentado este processo se repete.

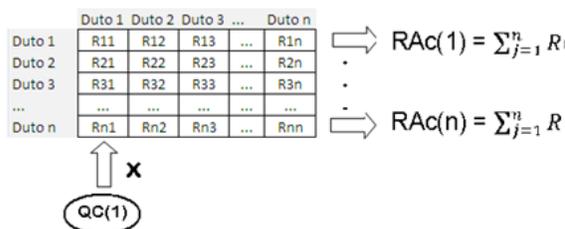


Figura 1. Exemplo de alocação de circuito em um banco de dutos.

A alocação para cabos com carregamentos distintos será feita da mesma forma da realizada para cabos com carregamentos iguais. É importante lembrar que, nesse último caso, as resistências de acoplamento serão recalculadas a cada alocação.

Descrição do algoritmo

O algoritmo para alocação dos cabos em um banco de dutos segue as seguintes etapas:

1. A partir da configuração dos dutos é calculada a matriz das resistências térmicas externa aos dutos, que servirá de insumo para o cálculo da matriz de resistência de acoplamento (RAC);
2. Além da configuração básica, também será informado os dutos que já estão ocupados, pois serão ignorados no processo de alocação;
3. Para a alocação dos cabos nos dutos será considerada a existência de cabos trifásicos ou monofásicos. É importante salientar que para os monofásicos sempre serão alocados dutos para três cabos, que deverão obedecer a um desenho de arranjo pré-definido conforme mostrado na figura 2. Esses arranjos podem ser na vertical, horizontal ou triangular;
4. A alocação terá como entrada os seguintes atributos:
 - a) Descrição do Circuito;
 - b) Tipo – Se o cabeamento é Trifásico ou Monofásico;
 - c) Carregamento;
 - d) Possibilidade de arranjo para tipos monofásicos: Horizontal, Vertical, Triangular ou Todos;
5. Calcular os fatores de carregamento de cada circuito;
6. Fazer as correções nas resistências de acoplamentos considerando os cabos já alocados;
7. Listar, em ordem crescente, as resistências térmicas de acoplamento, associando cada uma ao seu duto;
8. Identificar os dutos com cabos já alocados;
9. Alocar o primeiro cabo ao duto que esteja desocupado e que tenha a menor resistência;
10. Verificar se o cabo alocado é singular, caso positivo aloque as outras fases obedecendo ao critério 9 e que atenda ao critério de arranjo apresentado na figura 1. No caso do cabo ser tripolar, repita o passo 6 até concluir a alocação de todos os cabos;
11. Para casos que impossibilite a implementação das regras descritas anteriormente, o algoritmo deverá apresentar a possibilidade de edição e realizar um processo semi-automática de alocação.

Interfaces

A representação da seção do banco de dutos será a interface onde o usuário informará a alocação dos cabos de energia da instalação. Nessa interface, o usuário poderá também fazer alterações nos

parâmetros dos dutos bem como nas suas características.

A figura 2 mostra como realizar a edição da seção do banco de dutos. Um duplo click sobre a área cinza da seção do duto abrirá uma janela com as informações que deram a origem à configuração do banco de dutos, onde as alterações dos parâmetros poderão ser feitas.

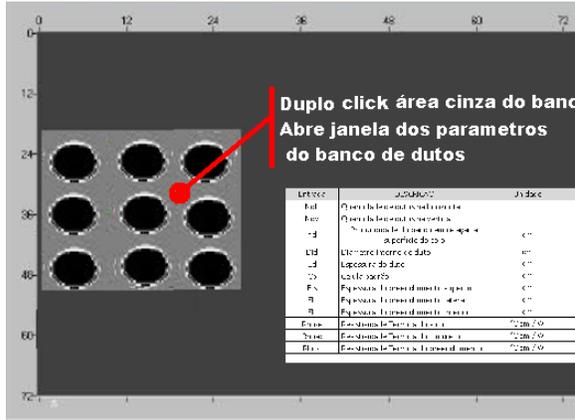


Figura 2. Edição da seção do banco de dutos.

A alocação dos cabos de energia no banco de dutos pode ser feita com um duplo click na área preta do duto, conforme mostrado na figura 3. Uma janela abrirá com as opções de cabos de energia que será alocada no duto escolhido. Ao alocar o cabo no duto, a descrição do circuito/cabo é listada na área de trabalho. A alocação do cabo vincula as coordenadas bem como as resistências térmicas próprias e mútuas associadas ao duto.



Figura 3. Alocação dos cabos no banco de dutos

A edição dos cabos de energia alocados no banco de dutos pode ser efetuada com um duplo click no respectivo cabo ou na lista de cabos alocados, conforme mostrado na figura 4. Uma janela abrirá com os parâmetros do cabo, onde as alterações poderão ser feitas na escolha dos cabos.



Figura 4. Edição da alocação no banco de dutos.

Exemplo numérico

O algoritmo apresentado é aplicado a uma instalação constituído de 15 dutos e quatro circuitos de cabos singelos, num total de 12 cabos. A figura 5 apresenta a matriz do banco de dutos.

Duto 1	Duto 2	Duto 3	Duto 4	Duto 5
Duto 6	Duto 7	Duto 8	Duto 9	Duto 10
Duto 11	Duto 12	Duto 13	Duto 14	Duto 15

Figura 5. Matriz do banco de dutos.

Um dos circuitos já está alocado, ocupando a posição nos dutos 1,2 e 6. As correntes dos circuitos $C(i)$ e o fator de carregamento $Q(i)$ são apresentados na tabela II.

O resultado da alocação é apresentado na figura 6. Observe que os dutos 7, 8 e 9 ficaram vagos. Isso significa que estes dutos correspondem aos mais acoplados.

Tabela II. Carregamento e Fator de Carregamento.

Circuito	Corrente do circuito - $C(i)$	Fator de Carregamento $QC(i)$
cct-01	128	1
cct-02	170	1,328125
cct-03	260	2,03125
cct-04	128	Alocado posição 1-2-6

cct-04	cct-04	cct-03	cct-03	cct-03
cct-04	Duto 7	Duto 8	Duto 9	cct-02
cct-01	cct-01	cct-01	cct-02	cct-02

Figura 6. Resultado da alocação.

5. CONCLUSÃO

O objetivo desse artigo foi apresentar o projeto de P&D de desenvolvimento de um aplicativo computacional que, através da modelagem do circuito

térmico dos cabos instalados em banco de dutos, possibilite a determinação precisa dos valores de capacidade de condução de corrente em regime permanente.

Para alcançar este objetivo, foi desenvolvido, com base na metodologia RUP/UML e através da modelagem do circuito térmico dos cabos instalados em banco de dutos, um aplicativo computacional que determina com precisão: os valores de capacidade de condução de corrente em regime permanente dos circuitos no tempo real; os carregamentos econômicos dos condutores considerando os custos envolvidos (instalação e, principalmente, perdas); as faixas ótimas de carregamento que serão subsídios para a escolha do condutor econômico num projeto de rede subterrânea; a distribuição otimizada dos condutores no banco de dutos.

Para a medição da temperatura em tempo real foram instalados sensores na capa externa de cabos em banco de dutos para a determinação dos valores reais das respectivas temperaturas. Os dados são integrados às remotas existentes nas subestações, para que possam ser incluídos nos cálculos da determinação da capacidade máxima de condução de corrente.

A grande vantagem do uso do aplicativo na alocação de cabos em um banco de dutos é a obtenção otimizada da distribuição de carga. Nesse sentido, o aplicativo computacional possibilita a determinação precisa dos valores da capacidade de condução de corrente em regime permanente dos circuitos; a avaliação e o diagnóstico do desempenho da rede subterrânea tendo as correntes e os fatores de carga do sistema como parâmetros de aferição; o apoio ao projeto para o dimensionamento e a alocação de cabos em instalações em banco de dutos.

Como extensão desta pesquisa para trabalhos futuros, sugere-se aprofundar o algoritmo incluindo as interações de campos magnéticos ou perdas por indução de cabos paralelos, que não foram considerados nesse Projeto. Outra possibilidade é o desenvolvimento de aplicativo para o cálculo de ampacidade de linhas não subterrâneas.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho é financiado pela Companhia Energética de Brasília (CEB), sendo executado pela Fundação Universa e pela Universidade Católica de Brasília (UCB).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JACOBSON, I.; BOOCH, G.; RUMBAUGH, J. **The Unified Software Development Process**. Addison-Wesley Longman, Inc, 1999.
- [2] LARMAN, C. **Utilizando UML e padrões**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

[3] JACOBSON, I.; BOOCH, G.; RUMBAUGH, J. **UML Guia Do Usuário**. Editora Campus, 2000.

[2] MOUTASSEM, Wael; ANDERS, George J. Configuration optimization of underground cables for best ampacity. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 4, p. 2037-45, 2010.

[3] MEY, G. DE; CHATZIATHANASIOU, V. A theoretical model for effective thermal conductivity of multicore power cables. **Electric Power Systems Research**, v.87, p. 10-12, 2012.

[4] PILGRIM, J. A.; SWAFFIELD, D J.; LEWIN, P. L.; PAYNE, D. Thermal Performance of High Voltage Power Cables In: **UHVnet 2011**, Winchester, UK, 18 - 19 Jan 2011.

[5] VOLLARO, Roberto de Lieto; FONTANA, Lucia; VALLATI, Andrea. Thermal analysis of underground electrical power cables buried in non-homogeneous soils. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, p. 772-78, 2011.

[6] SHANKLIN, G. B.; BULLER, F. H. Cyclical loading of buried cable and pipe cable. Power Apparatus and Systems, Part III. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 72, n. 2, p. 535 - 562 , 1953.

[7] ANDERS, G. J.; EL-KADY, M. A.; GANTON, R. W. D.; HORROCKS, D.J.; MOTLIS, J. Calculations of power cable load capability on a desktop computer: a review. **IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution**, v. 133, n. 7, p. 43136, 1986.

[8] DAMACENO, V. G. Mapeamento das temperaturas e correntes de cabos isolados para a avaliação e diagnóstico de sistemas subterrâneos. In: **XI SENDI**, Blumenau, 1992.

[9] KANSOG, J. O. C.; BROWN, M. T. Ampacity calculations for mixed underground cable systems in the same ductbank. In: **Proceedings of the 1994 IEEE Power Engineering Society**, p. 535-43, 1994.

[10] PATTON, R. N.; KIM, S. K.; PODMORE, R. Monitoring and rating of underground power. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-98, n. 6, p. 2285 - 2293, 1979.

[11] MARAZZATO, Hilary; BARBER, Ken; JANSEN, Mark; BARNEWALL, Graeme. Cable condition monitoring to improve reliability. In: **Conf. TechCon.**, pp. 1-14, 2004.

[12] LEON, F. de. Calculation of underground cable ampacity. **CYME International T&D**, p. 1-6, 2005.

[13] LI, H. J.; TAN, K. C.; SU, Qi. Assessment of underground cable ratings based on distributed temperature sensing. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 4, p. 1763-69, 2006.

[14] LIANG, Y. C.; LI, Y. M. On-Line dynamic cable rating for underground cables based on DTS and FEM. **WSEAS TRANSACTIONS on Circuits and Systems**, v. 7, n. 4, p. 229-38, 2008.

[15] SINGH, Kuljit; WATLEY, Dan. Cable monitoring solution - predict with certainty. In: **Segundo Seminário Sobre Utilização de Cabos em**

Redes Subterrâneas de Distribuição de Energia Elétrica - November 2011, Maceió, Alagoas, Brazil.

[16] ABNT. **NBR 11301:1990**. Cálculo da capacidade de condução de corrente de cabos isolados em regime permanente (fator de carga 100%), 1990.

[17] IEC. **IEC 60287-1-1**. Ed. 2.0 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses, 2006.

[18] IEC. **IEC 60028:1925** - Norma internacional de resistência para o cobre, 1925.

[19] IEC. **IEC 60502:1983** - Dielétrico sólido extrudado cabos isolados de potência para tensões nominais de 1 kV até 30 kV, 1983.

[20] ALMEIDA, G. R. **Tecnologia para linhas de transmissão instaladas diretamente enterradas em solos sujeitos a instabilidade térmica e hidrológica**. 1v., 207p. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2011.

[21] MOREIRA, F. S. **Influência do Cálculo da Ampacidade no Despacho da Operação**. 1v., 159p. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2006.