

Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão

M.H.M.Vale, F.S.Chaves, B.A.C.Silva e L.Mariano Jr., UFMG
J.R.Valadares, CEMIG

Resumo—Este artigo apresenta os resultados obtidos com o desenvolvimento do Projeto P&D intitulado *Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão*, desenvolvido numa parceria entre a UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais e a CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Um dos principais produtos do projeto consiste da ferramenta computacional denominada PlanEx. O presente trabalho apresenta as Políticas, os Critérios e os Procedimentos de Compensação Reativa e Controle de Tensão propostos no Projeto, bem como a filosofia e o desenvolvimento do aplicativo PlanEx.

Palavras-chave— Planejamento da Expansão – Compensação Reativa – Controle de Tensão.

I. INTRODUÇÃO

Este trabalho refere-se ao Projeto P&D intitulado **Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão**, desenvolvido numa parceria entre a UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais e a CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. O projeto foi concluído, e este artigo apresenta seus objetivos, os resultados esperados e alcançados, a descrição da metodologia adotada para seu desenvolvimento e a estratégia de difusão tecnológica dos resultados da pesquisa.

A Compensação Reativa (CR), aliada ao Controle de Tensão (CT), é uma das alternativas de expansão que se apresentam aos planejadores do Sistema de Energia Elétrica (SEE). Esta se mostra como uma das mais atrativas, sob o ponto de vista econômico, além de trazer inúmeros benefícios para as redes elétricas. Com relação ao controle de tensão, no contexto atual do setor elétrico, onde uma maior e melhor utilização dos recursos existentes no SEE é exigida, este deve ser tratado dentro de um contexto de controle sistêmico de *Potência Reativa* (injeção e fluxo).

No que diz respeito à expansão, procura-se a alocação *ótima* de equipamentos para CR/CT. A formulação e a solução do problema não são triviais: há vários objetivos a serem alcançados e inúmeras restrições a serem obedecidas.

Neste projeto P&D, a pesquisa partiu de investigações direcionadas ao estabelecimento de *Políticas, Critérios e Procedimentos* de CR/CT, e projetou/implementou um *aplicativo de apoio ao planejador*, para a elaboração dos planos.

As etapas do projeto foram cumpridas de acordo com o previsto e os resultados esperados integralmente obtidos. Na realidade, o aplicativo PlanEx não havia sido previsto inicialmente neste projeto de P&D, superando as expectativas.

II. OBJETIVOS E RESULTADOS ESPERADOS DO PROJETO

O objetivo deste projeto P&D, de acordo como a proposta aprovada pela ANEEL, foi o estabelecimento de Políticas, Critérios e Procedimentos para CR/CT de SEE, nas áreas de Transmissão e Distribuição, de forma clara e objetiva. Seus objetivos específicos foram assim identificados:

- Caracterização da necessidade de CR/CT e da definição de uma margem de potência reativa;
- Levantamento dos critérios, filosofias, ferramentas e regulamentações existentes, relativas ao tema, bem como da influência da reestruturação do setor;
- Elaboração de critérios, considerando os requisitos de do sistema: carga (pesada, média e leve) e regime;
- Preparação de procedimentos, para que os critérios desenvolvidos possam ser adotados pelos planejadores.

Os resultados esperados para o projeto, foram:

- Metodologia para CR a ser aplicada na expansão;
- Filosofia para controle de tensão.

Tais resultados têm influência direta em questões relativas às etapas de planejamento da CEMIG e do setor elétrico nacional, bem como reflexos positivos para a sociedade. Dentre os benefícios diretos e indiretos, podem ser citados:

- Menor tempo de trabalho das equipes de expansão com relação ao planejamento das obras de CR e CT;
- Melhor perfil de investimentos, tendo em vista a máxima utilização dos sistemas existentes;
- Possibilidade de aplicação da metodologia desenvolvida em sistemas de diferentes empresas do setor elétrico;
- Aumento de confiabilidade e maior segurança na operação dos sistemas elétricos;
- Maior utilização dos sistemas existentes, resultando menores investimentos, que seriam repassados para as tarifas, possibilitando sua modicidade;
- Impacto benéfico no meio ambiente, tendo em vista os prazos, custos e interferência de obras de compensação reativa se comparadas com a construção de novas linhas de transmissão e/ou novas usinas (hidráulicas, térmicas).

III. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

A metodologia adotada para o desenvolvimento do projeto partiu da experiência prática e acadêmica da equipe no tema Compensação Reativa/Controle de Tensão.

Partindo desta larga experiência, optou-se por atuar em duas frentes de desenvolvimento: uma delas dedicada à in-

investigação dos Critérios, Políticas e Procedimentos de CR/CT, e a outra objetivando a concepção de uma ferramenta computacional de apoio ao planejador na elaboração de planos de expansão.

Como ponto inicial do projeto, foi preparado um *Banco Digital de Referências* sobre o tema [10]. Tal banco foi organizado de tal maneira a subsidiar tanto as investigações sobre CR/CT quanto a criação do aplicativo computacional.

A fase de investigação sobre os Critérios, Políticas e Procedimentos de CR/CT incluiu o estudo teórico e prático sobre as questões envolvidas, estabelecendo o processo a ser considerado. A Política se relaciona com as diretrizes que orientam as atividades (ações) de planejamento e de operação do sistema. Critérios são regras básicas estabelecidas, que retratam os limites e restrições a serem respeitados. Procedimentos são passos a serem seguidos de acordo com a política proposta, respeitando-se os critérios estabelecidos.

Como resultado desta investigação, foram gerados procedimentos para a elaboração dos planos de CR/CT. Nesta etapa, duas dissertações de mestrado foram defendidas. Da primeira [8] originou-se o Procedimento Padrão e, na segunda [9], evoluiu-se para o Procedimento Otimizado.

O Procedimento Padrão foi selecionado para implementação do aplicativo denominado **PlanEx**.

O desenvolvimento desta ferramenta envolveu passos específicos. O primeiro foi a definição da Equipe de Desenvolvimento do *software*. Uma vez definida a equipe, partiu-se para a elaboração de uma Especificação Técnica onde o **PlanEx** foi estruturado nas suas definições básicas. Com a Especificação detalhada, teve início o Projeto Executivo. Posteriormente à fase de Projeto, o PlanEx passou pelas etapas de Implementação e Operacionalização.

A gerência e o acompanhamento das atividades foram fundamentais para o sucesso da metodologia aqui descrita.

IV. RESULTADOS ALCANÇADOS

Todos os resultados previstos na proposta do projeto P&D foram alcançados, conforme detalhado nos Relatórios Técnicos das etapas [10, 11, 12, 13, 14]. Além destes, foi desenvolvida a ferramenta **PlanEx**.

Foram elaborados e apresentados diversos artigos técnicos e defendidas dissertações de mestrado, conforme detalhado no item relativo à estratégia de difusão tecnológica.

Foi gerado um *Banco Digital de Referências* [10] contendo, de forma estruturada, a documentação técnica relacionada. Cada trabalho é caracterizado sob diferentes aspectos, o que facilita a consulta à documentação.

A melhor maneira de mostrar os resultados deste projeto P&D é através da apresentação dos **Critérios, Políticas e Procedimentos propostos** e do aplicativo **PlanEx**, um dos seus produtos mais significativos.

V. POLÍTICAS DE CR/CT

As políticas propostas resultam de uma seqüência de investigações conjuntas entre empresa e universidade, conforme histórico relatado em [10]. São propostas as seguintes diretrizes para a elaboração dos planos de expansão:

- Visão integrada dos sistemas de transmissão e distribuição, com o objetivo de distinguir diferentes necessidades em termos de CR e CT.
- A CR será indicada para sistemas cujos reforços de transmissão de potência ativa já estejam definidos, não sendo aplicada onde há esgotamento de capacidade de atendimento (MW).
- Para análise das necessidades de CR é necessária a avaliação de, pelos menos, cinco níveis de carga.
- A CR deve ser encarada como uma obra de curto prazo. Entretanto, a compatibilização com as necessidades de médio/longo prazo também é recomendada.
- A CR deverá ser alocada o mais próximo possível do local onde é necessária, evitando circulação de reativos.
- Para a CR poderão ser utilizados: capacitores, reatores, geradores, compensadores síncronos e estáticos.
- Para o CT, além das manobras e ajustes dos equipamentos acima, poderão ser utilizados equipamentos tais como reguladores de tensão e LTC.
- Todas as ações de CT deverão ser integradas, considerando os sistemas de transmissão e distribuição.
- A filosofia de controle deverá ser hierarquizada em três níveis: local (subestação ou alimentador), regional (distribuição) e global (Rede Básica).
- Para controle de tensão deverão ser respeitadas as portarias da ANEEL e os Procedimentos de Rede (ONS).
- Deverá ser bem definida a função do banco de capacitores: CR ou CT, em nível local, regional ou sistêmico.
- É recomendável que os bancos de capacitores sejam manobráveis de forma automática.
- Os sistemas regionais deverão atender às suas próprias necessidades de controle de tensão.

VI. CRITÉRIOS PARA CR/CT

Uma vez definida a Política a ser adotada, são propostas regras básicas a serem respeitadas, ou seja, são estabelecidos os Critérios de planejamento. Os pontos descritos abaixo sintetizam questões tratadas acerca da sua consistência e aplicação prática [8]. São propostos neste projeto os seguintes critérios para a elaboração dos planos de expansão:

- O dimensionamento da CR deverá garantir o critério N-1 para a transmissão e N para a subtransmissão.
- Deverão ser consideradas, para o sistema de transmissão, as contingências mais severas de linhas e equipamentos. Sugere-se aquelas que produzirem maior corte de carga por subtensão. Deverão ser avaliadas contingências nas linhas que se caracterizam como estruturais para os sistemas regionais.
- Na transição de condição normal para emergência, não será permitida a alteração de tensão das barras controladas, ligação de capacitores, desligamento de reatores, alteração da posição do *tap* dos transformadores fixos, como também o redespacho do sistema. Será permitida a atuação dos compensadores síncronos e estáticos e dos reguladores e LTC.

- Na transição da carga leve para média e pesada será permitida a atuação em bancos de capacitores e reatores, mudança do valor de tensão de referência e, como último recurso, o desligamento de linhas.
- Os compensadores síncronos e estáticos deverão ser ajustados para que, em condição normal, gerem o mínimo possível e, nas situações de contingências, não ultrapassem suas capacidades. Entende-se que foram planejados para atender ao controle diário de tensão e situações de contingências, e não para compensar carga.
- O fator de potência de grandes consumidores (tensão acima de 34,5kV) deverá ser no mínimo igual a 92%. Na interface transmissão/distribuição e entre distribuidoras, este deverá estar próximo de 1,0, a menos que exista interesse, devido a "sobra" de potência reativa em um e "deficiência" em outro sistema.
- Os limites de tensão (ANEEL) deverão ser respeitados.
- A manobra de bancos não poderá provocar flutuações de tensão maiores que 5%.
- Para chaveamento de bancos de capacitores, deverão ser identificadas as melhores variáveis de controle (tensão, corrente, fator de potência).

VII. PROCEDIMENTOS DE CR/CT

Os *Procedimentos* constituem-se em passos a serem seguidos pelo planejador de acordo com a política proposta, respeitando-se os critérios estabelecidos. Neste projeto P&D, dois procedimentos foram tratados:

- **Procedimento Padrão:** Idealizado inicialmente em [8], refere-se à elaboração do plano de expansão utilizando basicamente o Fluxo de Potência Convencional, onde os passos inseridos se baseiam na prática da Empresa.
- **Procedimento Otimizado:** Como uma extensão do Procedimento Padrão, inicialmente tratado em [9], introduz o Fluxo de Potência Ótimo na elaboração do plano.

Na realidade, tais procedimentos se constituem em *ferramentas facilitadoras* para a elaboração de alternativas de expansão de CR/CT. O planejador, assim, terá, à disposição, diferentes proposições de planos de CR/CT, a partir dos quais poderá decidir sobre a melhor alternativa.

A. Procedimento Padrão

A figura 1 mostra os passos do Procedimento Padrão proposto a seguir caracterizado.

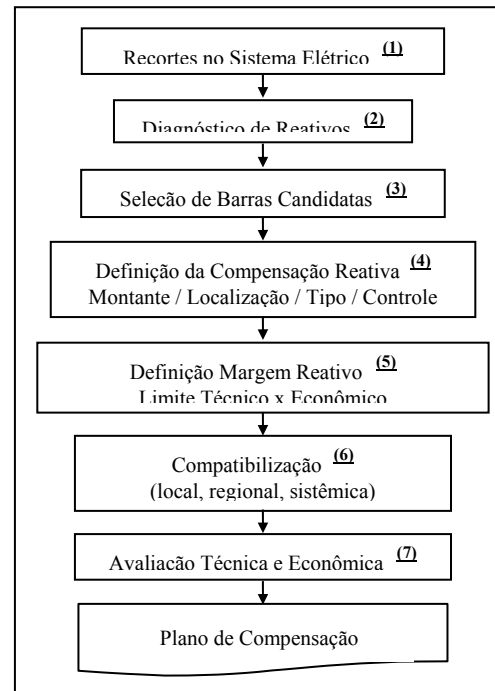


Figura 1 - Procedimento Padrão

(1) - Recortes do Sistema: Identificação das áreas semelhantes que compõem o SEE (regiões de atendimento de uma empresa, por exemplo).

(2) - Diagnóstico de Reativo: Elaboração do Balanço de Potência Reativa da área sob análise, identificando os consumidores e fontes de reativo.

(3) - Seleção de Barras Candidatas: Para seleção destas barras, utilizam-se alguns critérios para atendimento do balanço de reativo e do controle de tensão:

- *Critério para atender ao Balanço de Potência Reativa - Análise do fator de potência da barra:* barras cujos fatores estiverem abaixo de determinado valor (0,98) são naturalmente candidatas. O consumo de reativo do transformador deve ser representado como carga. Deve-se fazer um balanço de reativo nos níveis local, regional e sistêmico, para ver o Fator de Potência Global.
- *Critério para atender ao Controle de Tensão - Análise de sensibilidade:* determinar as barras que mais influenciam o SEE, para variação do perfil de tensão e menor geração de potência reativa dos síncronos e estáticos.

(4) - Definição da Compensação Reativa:

Montante

Representa o mínimo necessário de CR para manter a operação do sistema dentro dos limites adequados. Para a sua definição, propõe-se um fator de potência unitário, para as barras de 13,8kV pois, além de suprir o reativo demandado pelas cargas, deve-se prover as perdas reativas nas transformações (138-13,8kV, 69-13,8kV).

Localização

A compensação de potência reativa deverá ser alocada próximo ao local onde ela é necessária, evitando-se sua circulação, que provoca aumento de perdas e dificuldades de controle de tensão, além de ocupar os equipamentos da rede, restringindo sua capacidade de transporte de potência ativa.

Deverá ser definida, além da localização geográfica, a localização elétrica, seguindo basicamente uma ordem de priorização, ou seja, compensa-se em primeiro lugar a carga (13,8kV), em seguida o sistema de distribuição (138kV) e, finalmente, o sistema de transmissão. Para garantir o controle de tensão recorre-se em primeiro lugar aos recursos da transmissão e, em seguida, da distribuição.

Tipo: Compensação Fixa x Controlada

Após a definição do montante de compensação, deve-se identificar as parcelas do tipo *fixa* e *manobrável* (controlada). A controlada é calculada através da diferença dos montantes de reativo necessários nas transições do SEE (carga pesada para leve; estado normal para emergência etc.). Da parcela manobrável é necessário definir o tipo de controle - *manual* ou *automático*, e qual será o tipo de *automatismo*. Deve-se compatibilizar as necessidades do controle local com o regional, priorizando-se a hierarquia de atuação.

(5) – Margem de Potência Reativa: O limite técnico equivale ao mínimo de compensação necessária para atender ao balanço e garantir tensões acima dos limites mínimos definidos pela ANEEL. A partir deste ponto, a alocação adicional de reativos é permitida até um limite onde o ganho de redução de perdas e de energia não suprida ainda for maior que os custos da instalação, operação e manutenção dessa compensação, ou seja, a relação benefício/custo ainda é maior que 1 (limite econômico). Tal sobrecompensação objetiva garantir uma margem de segurança, dentro de uma avaliação econômico/financeira.

(6) – Compatibilização da Compensação: Deve-se avaliar a simultaneidade de instalação da CR (local, regional e sistêmica). Pode ocorrer redimensionamento ou mesmo dispensa de equipamentos, devido à influência de melhoria do perfil de tensão de uma área sobre a outra.

(7) – Avaliação Técnica e Financeira

Avaliação técnica

Avaliar a disponibilidade física das SE e a compatibilização da instalação da CR com outras obras previstas, definindo um cronograma de obras. Realizar estudos de regime permanente e transitório (energização/desligamento de bancos, harmônicos, estabilidade de tensão, rejeição de carga etc.).

Avaliação econômica

A CR e os equipamentos de controle devem ser avaliados economicamente, considerando custos e benefícios.

Os *custos* referem-se à *instalação, operação e manutenção* dos equipamentos. Como *benefícios*, são considerados os ganhos de atendimento adicional de mercado, a redução de perdas e a redução de energia não suprida, proporcionados pela compensação. Deve-se avaliar o benefício no caso de adiamento de obras planejadas. Com a reestruturação do setor elétrico, outros custos e benefícios deverão ser avaliados, tais como o custo da indisponibilização de equipamentos, a tarifação da energia reativa etc.

Após definidos os montantes, a localização, o tipo de compensação e seu automatismo, e a avaliação técnica e econômica das obras, deverá ser prevista a análise do cronograma de obras, envolvendo as etapas de projeto, construção, instalação e comissionamento do plano.

B. Procedimento Otimizado

Como uma continuidade da versão anterior, o procedimento otimizado explora pontos da estratégia básica, através de ferramentas de otimização. São feitas modificações nos procedimentos de seleção de barras candidatas e definição da CR (montante e localização) do procedimento padrão.

Passos Básicos do Procedimento Otimizado

Os passos estão indicados no fluxograma da figura 2.

(1) Dados

Este passo inclui:

- Entrada de informações do SEE (barras, ramos etc.);
- Seleção do conjunto inicial de barras onde devem ser alocados Mvar para se fazer a CR/CT;
- Indicação das restrições relativas ao SEE (tensões, fluxo, *taps*, fator de potência etc.);
- Escolha dos parâmetros da otimização.

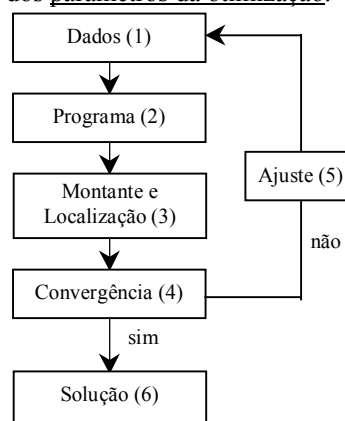


Figura 2 - Passos Básicos para o Procedimento Otimizado

(2) Programa

Este passo compreende um conjunto de programas:

- programa para conversão dos limites de fator de potência em máximo e mínimo de alocação de Mvar;
- programa de otimização para controle de tensão;
- programa convencional de fluxo de potência.

(3) Montante e Localização

Com os resultados da execução dos programas do passo (2), é gerado relatório por meio do qual tornam-se disponíveis as indicações da localização e do montante de potência reativa a ser introduzida no sistema, considerando o conjunto de barras selecionadas no passo (1).

(4) Convergência

Consiste da análise dos valores apresentados no relatório. Os resultados são avaliados quanto à sua aceitação (tensões, fator de potência, convergência etc.). Caso os resultados sejam admissíveis, a solução foi encontrada; se não, deve-se ajustar os dados de entrada (ir para o passo 5).

(5) Ajuste

Pode-se optar pelas alternativas: (a) 1º Laço: ajustar os parâmetros de otimização; (b) 2º Laço: alterar as restrições; (c) 3º Laço: modificar o conjunto de barras selecionadas.

(6) Solução

Solução ótima obtida ou finalização causada por algum critério de parada (limite de tentativas, por exemplo).

VIII. A FERRAMENTA PLANEX

Objetivos do PlanEx

O *PlanEx* é uma ferramenta aplicada à Expansão de SEE, mais especificamente ao Planejamento de Compensação Reativa e Controle de Tensão. Esta se constitui em ferramenta facilitadora à elaboração de planos por parte das equipes de planejamento das empresas.

O Processo de Tomada de Decisão do PlanEx

O processo de decisão, na sua versão atual, baseia-se no Procedimento Padrão. Através de uma interface amigável, o planejador poderá gerar um ou vários planos de expansão, auxiliado pela ferramenta, para análise e tomada de decisão.

A figura 3 ilustra a tela inicial, a partir da qual o usuário poderá, de forma interativa, elaborar o plano de CR.

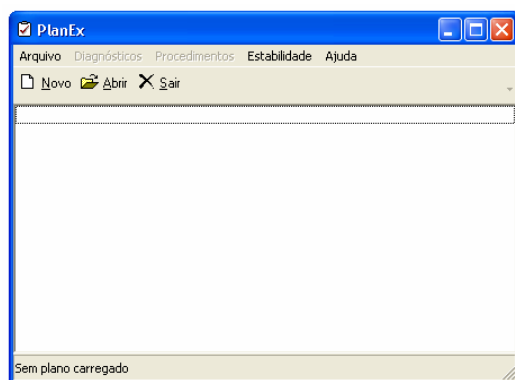


Figura 3 - Tela Inicial do PlanEx

MENU ARQUIVO

O ícone *Arquivo* (figura 4) possibilita ao usuário abrir arquivo já existente, construir novo arquivo, definir configurações (cores, limites etc.), salvar arquivos e sair do aplicativo.

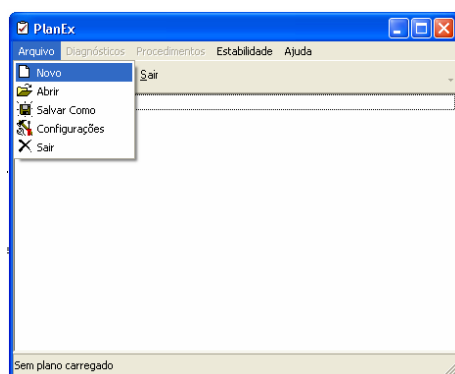


Figura 4 - Menu "Arquivo"

Ao selecionar a opção "Novo", neste menu, surgem telas específicas à entrada de informações sobre o plano a ser construído (identificação e anos relativos aos casos de simulação, descrição do plano) e sobre a seleção dos arquivos correspondentes aos casos a serem analisados. O ícone "Abrir" permite ao usuário selecionar o arquivo, já no formato adequado ao PlanEx. O ícone "Salvar como" permite salvar

arquivos. Já a opção "Configurações" chama uma tela (figura 5), que permite: (i) informar a localização dos arquivos PSS.EXE e do IPLAN.EXE, necessários aos procedimentos; (ii) definir as faixas de tensão e de fator de potência normal, precária e crítica a serem adotadas, bem como as cores indicativas do PlanEx, para identificar as diferentes situações.

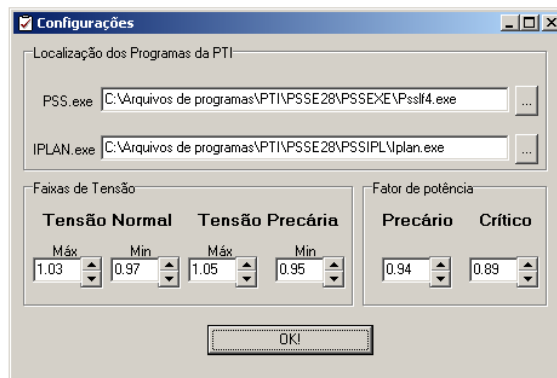


Figura 5 - Tela de configurações do PlanEx

De posse das informações solicitadas, a ferramenta constrói o banco de dados do plano. Os cálculos de fluxo de potência são feitos pelo PSS, aplicativo ao qual o PlanEx se comunica. A busca dos resultados do PSS é feita a partir de Iplans: (i) *Iplan Subistemas* - obtém os subistemas que fazem fronteira com os subistemas definidos pelo usuário; (ii) *Iplan Barras* - obtém os dados das barras dos subistemas escolhidos e os coloca em relatório de saída; (iii) *Iplan Ramos* - obtém os dados das linhas e transformadores dos subistemas escolhidos e os coloca em relatório de saída. Após a execução dos Iplans, o PlanEx lê a saída do PSS e armazena informações em banco de dados próprio

MENU DE DIAGNÓSTICOS DO SISTEMA

Como mostrado na figura 6, o PlanEx apresenta várias funções de diagnóstico do SEE: barras, ramos e subistemas.

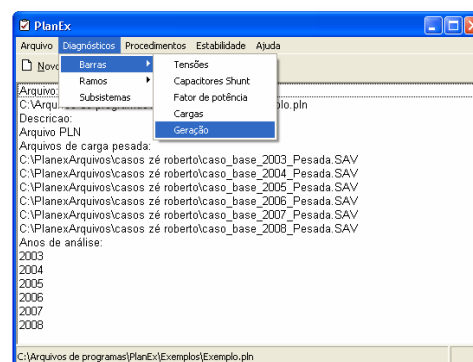


Figura 6 - Menu de diagnósticos de barras

Com relação ao Diagnóstico de Barras, apresenta informações sobre o diagnóstico dos valores de tensão e de fator de potência dos barramentos, bem como dos *shunts*, das cargas e da geração a eles conectados.

O documento [14] apresenta todo o detalhamento das telas e do processo de decisão. Neste artigo, optou-se por mostrar o potencial da ferramenta, através do processo relativo ao diagnóstico de tensões. Ao solicitar esta função, o usuário poderá escolher as barras para as quais se deseja o

diagnóstico. A figura 7 ilustra uma tela característica desta função.

No	NOME	VBase	ÁREA	2003	2004	2005	2006	2007	2008
2425	CISLUZIR13.8	13.8	51	1.026	1.03	1.022	1.024	1.033	1.026
2429	LSANTA R13.8	13.8	51	1.026	1.024	1.024	1.025	1.035	1.025
2430	NGRANJAR13.8	13.8	51	1.019	1.015	1.015	1.015	1.021	1.011
2431	PAMPULHR13.8	13.8	51	1.017	1.02	1.021	1.016	1.021	1.02
2432	SLUZIA1R13.8	13.8	51	1.017	1.021	1.023	1.013	1.022	1.014
2434	SLUZIA2R13.8	13.8	51	1.016	1.018	1.018	1.012	1.024	1.017
1137	CISLUZ-1 138	138	51	1.023	1.028	1.028	1.032	1.026	1.021
1146	PAMPUL-1 138	138	51	1.016	1.028	1.023	1.027	1.022	1.02
1153	SLUZ1-1 138	138	51	1.026	1.036	1.031	1.038	1.03	1.025
1157	SLUZ2-1 138	138	51	1.028	1.039	1.034	1.038	1.033	1.031
1171	NGRANJ-1 138	138	51	1.016	1.028	1.023	1.026	1.021	1.016
1173	VESPAS12 138	138	51	1.031	1.042	1.037	1.041	1.036	1.031
1178	DEM.F 138	138	51	1.016	1.028	1.023	1.027	1.022	1.02
2423	BBEKAE-D 138	138	51	1.019	1.031	1.026	1.029	1.024	1.019

Figura 7 - Tela de diagnósticos de tensão

A tela da figura 7 inclui informações sobre número, nome, subsistema e tensão nominal das barras, além de seus níveis de tensão em cada ano do plano. Tais informações podem ser ordenadas de acordo com o interesse do usuário. Clicando-se sobre a tabela, em colunas que apresentam os níveis de tensão, outros detalhes da barra e do ano selecionados são mostrados: (i) detalhes fixos da barra - nome, número, tensão nominal e subsistema; (ii) variáveis associadas à barra - potência ativa, reativa e aparente da carga conectada à barra, shunt conectado e fator de potência da barra, calculado sobre o conjunto da carga com o shunt instalado.

O botão "linhas" mostra todos os ramos conectados à barra selecionada e a situação de carregamento destes. Adicionalmente, clicando-se sobre a tabela com o botão direito do *mouse*, surge um menu de exportação de tabela (figura 8).

No	NOME	VBase	ÁREA	2003	2004	2005	2006	2007	2008
2425	CISLUZIR13.8	13.8	51	1.026	1.03	1.022	1.024	1.033	1.026
2429	LSANTA R13.8	13.8	51	1.026	1.024	1.024	1.025	1.035	1.025
2430	NGRANJAR13.8	13.8	51	1.019	1.015	1.015	1.015	1.021	1.011
2431	PAMPULHR13.8	13.8	51	1.017	1.02	1.021	1.016	1.021	1.02
2432	SLUZIA1R13.8	13.8	51	1.017	1.021	1.023	1.013	1.022	1.014
2434	SLUZIA2R13.8	13.8	51	1.016	1.018	1.018	1.012	1.024	1.017
1137	CISLUZ-1 138	138	51	1.023	1.028	1.028	1.032	1.026	1.021
1146	PAMPUL-1 138	138	51	1.016	1.028	1.023	1.027	1.022	1.02
1153	SLUZ1-1 138	138	51	1.026	1.036	1.031	1.038	1.03	1.025
1157	SLUZ2-1 138	138	51	1.028	1.039	1.034	1.038	1.033	1.031
1171	NGRANJ-1 138	138	51	1.016	1.028	1.023	1.026	1.021	1.016
1173	VESPAS12 138	138	51	1.031	1.042	1.037	1.041	1.036	1.031
1178	DEM.F 138	138	51	1.016	1.028	1.023	1.027	1.022	1.02
2423	BBEKAE-D 138	138	51	1.019	1.031	1.026	1.029	1.024	1.019

Figura 8 - Menu de exportação de tabela

O menu de "exportação" permite que os dados da tabela sejam exportados para arquivo do Excel (exemplo da figura 9), para o chamado Relatório Simples (com opções de visualizar, imprimir ou exportar o relatório para um arquivo de Word, Acrobat ou HTML) ou para o Relatório Composto (cria a possibilidade de armazenar em um único arquivo, exportar ou imprimir várias tabelas de uma só vez). A possibilidade de se exportar os valores para gráficos também se encontra disponível, como mostra a figura 10.

No	Nome	VBase	ÁREA	TENSÃO (p.u.)				
				2003	2004	2005	2006	2007
2425	CISLUZIR13.8	13.8	51	1.033	1.034	1.033	1.029	1.034
2429	LSANTA R13.8	13.8	51	1.039	1.031	1.037	1.03	1.031
2430	NGRANJAR13.8	13.8	51	1.038	1.03	1.031	1.025	1.03
2431	PAMPULHR13.8	13.8	51	0.991	1.003	0.995	0.991	1.003
2432	SLUZIA1R13.8	13.8	51	0.99	1.025	1.014	1.01	1.025
2434	SLUZIA2R13.8	13.8	51	1.04	1.036	1.037	1.034	1.036
1170	C.IGAR-R13.8	13.8	56	0	1.036	1.022	1.021	1.036
2705	BETIM1 R13.8	13.8	56	1.041	1.032	1.009	1.008	1.032
2706	BETIM2 R13.8	13.8	56	1.045	1.037	1.033	1.032	1.037
2707	BETIM3 R13.8	13.8	56	1.045	1.035	1.021	1.021	1.035
2710	BRUMADIR13.8	13.8	56	1.039	1.033	1.024	1.023	1.033
2716	UHIGARARI3.8	13.8	56	1.004	1.004	0.998	0.997	1.004
2891	MLEMER1 13.8	13.8	56	1.038	1.035	1.021	1.02	1.035
1137	CISLUZ-1 138	138	51	0.991	1.031	1.033	1.03	1.031

Figura 9 - Tabela exportada para Excel

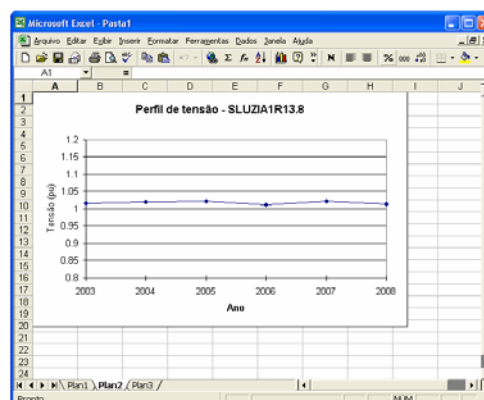


Figura 10 - Gráfico produzido pelo PlanEx

O ícone Diagnóstico de Ramos reúne os diagnósticos de grandezas relacionadas às linhas e transformadores do sistema. Ao ser acionado, pode-se escolher as opções: diagnóstico de carregamentos, de perdas e de intercâmbios.

Para ilustrar tal facilidade, as figuras 11 e 12 mostram a tela para escolha de subsistemas e a tela de grandezas a serem diagnosticadas (potências ativa, reativa e aparente), para linhas e transformadores, e a tela de diagnóstico de carregamentos. Clicando-se sobre a tabela nas colunas das grandezas, outros detalhes do ramo escolhido são mostrados, tais como perdas e fator de potência do fluxo.

A opção Diagnóstico de Subsistemas fornece ao planejador os somatórios de grandezas de interesse. Feita a seleção do subsistema, através de tela própria, os resultados são mostrados em tabela do tipo daquela ilustrada na figura 13.

A tabela mostra, ano a ano, os valores totais de carga, capacitores *shunt*, intercâmbio, perdas (em linhas, transformadores e totais) e geração reativa em linhas de transmissão. Caso seja de interesse saber detalhes sobre estes valores, o usuário poderá clicar a tabela desejada com o botão direito do *mouse* e selecionar o ícone "detalhes", o que faz mostrar a tabela detalhada da grandeza selecionada (figura 14).

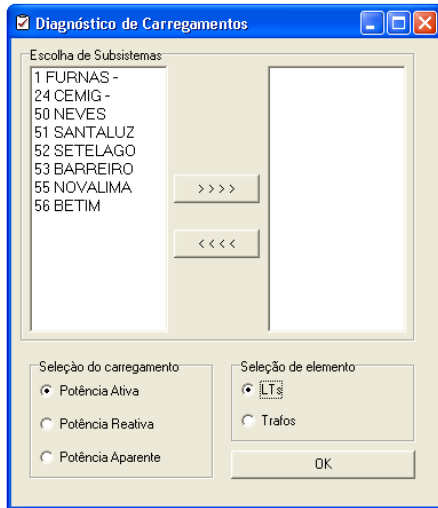


Figura 11 - Escolha de diagnóstico de carregamentos

Linha	DE	PARA	Vbase	circuito	2003	2004	2005	2006	2007	2008
1147	CDMNC-1 138	PLEOP3-1 138	138	1	54.73	66.2	66.56	65.06	60.76	63.32
1167	CDMNC-1 138	SLAGO3-1 138	138	1	47.53	49	49.36	51.86	53.57	56.12
2581	CDMNC-1 138	CONCREBR 138	138	1	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
2500	MAT02-1 138	SLAGOAS 138	138	1	60.02	60.37	61.78	63.23	65.61	67.81
1195	PLEOP3-1 138	VESPAS-1 138	138	1	-33.45	-37.66	-38.22	-39.78	-40.14	-43.29
2582	PLEOP3-1 138	COORREA 138	138	1	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4
2583	PLEOP3-1 138	HOLCM 138	138	1	9	9	9	9	9	9
1166	SLAGO2-1 138	SLAGO1-1 138	138	1	-24.34	-24.34	-25.38	-25.85	-27.15	-28.04
1167	SLAGO2-1 138	SLAGO3-1 138	138	1	-3.17	-3.89	-3.40	-10.35	-10.41	-10.89
2429	VESPAS-1 138	ITAU-1 138	138	1	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
2435	VESPAS-1 138	SOEICO-1 138	138	1	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
1167	PARADP-1 138	SLAGO2-1 138	138	1	-15.72	-16.28	-16.87	-17.82	-18.89	-19.94
2500	SLAG01-1 138	SLAGOAS 138	138	1	54.92	55.28	56.66	58.07	60.39	62.91
2025	SLAGO3-1 138	UTCUMMIN 138	138	1	0	0	0	0	0	0
2589	SLAGOAS 138	FIAT SL 138	138	1	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
2578	CORDISUBU630	SLAGOAS26930	69	1	-3.53	-3.54	-3.55	-3.35	-2.41	-2.46

Figura 12 - Diagnóstico de carregamentos

CARGA		2003		2004		2005		2006		2007	
MW	MVA	FP	MW	MVA	FP	MW	MVA	FP	MW	MVA	
120.8	80.7	0.904	175.5	83.1	0.903	180.5	85.4	0.903	183.7	87.3	

Figura 13 - Diagnóstico de subsistema – Tela principal

TOTAIS DAS CARGAS		2003		2004		2005		2006		2007	
MW	MVA	FP	MW	MVA	FP	MW	MVA	FP	MW	MVA	
168.4	77.7	0.903	175.2	82.8	0.907	184.6	85.3	0.907	184.6		

Figura 14 - Diagnóstico de subsistema – Detalhes

MENU DE PROCEDIMENTOS

É a partir do menu Procedimentos que serão desenvolvidos os planos de expansão de CR. O Procedimento Padrão se baseia na correção do fator de potência do subsistema escolhido. A partir de um fator de potência especificado, o PlanEx calcula o montante de reativo a ser injetado nas barras de carga, de modo a se atingir o valor desejado, em cada ano da análise. O planejador decide quais destes reativos calculados serão simulados nas barras.

Escolhendo-se o Procedimento Padrão, há as opções de iniciar um novo plano ou abrir um já existente (*.pln).

Acionando o ícone “Novo”, surgem telas para a entrada de dados relativos ao plano (fator de potência desejado, nome do plano, subsistema de interesse). Feitas tais escolhas, a tela inicial do procedimento é mostrada (figura 15).

S	PL	NBARRA	NOMEBARRA	VNOMINAL	2003	2004	2005	2006	2007	QNEC2003	QNEC2004	QNEC2005	QNEC2006	QNEC2007
4	2584	CORDISUBR138	138	138	1.04	1.02	1.007	0.996	0.989	0.88	0.5	0.9	1.49	-0.9
4	2578	PARADPER138	138	138	1.018	1.002	1.007	0.996	0.989	2.7	3.41	3.91	6.81	3.41
4	2576	SLAGOASR138	138	138	1.04	1.042	1.038	0.932	1.043	-7.16	-6.7	-6.37	8.02	-6.7
4	2577	SLAGOASR138	138	138	1.043	1.041	1.034	0.934	1.041	0.6	1.85	2.47	14.47	1.05
4	2579	SLAGOASR138	138	138	1.04	1.037	1.031	0.934	1.037	-3.05	-3.20	-3.05	8.94	-3.20
4	2580	MAT02NR138	138	138	1.041	1.038	1.037	0.994	1.038	1.97	2.46	2.61	5.61	2.46
4	2584	PLEOPOLR138	138	138	1.042	1.034	1.034	0.989	1.034	1.62	2.18	2.4	6	2.18
4	2595	CORDISUBR0	69	138	1.021	0.996	1.014	0.996	0.996					
4	2578	SLAGOAS26930	69	138	0.998	1.022	0.998	0.989	1.022					
4	1138	CDMNC-1 138	138	138	0.999	1.011	1.006	0.989	1.011					

Figura 15 - Tela Principal do procedimento padrão

A tela contém uma tabela com os dados: nome da barra, número do plano, indicador de seleção da barra para simulação, tensões em cada ano analisado e a potência reativa calculada para se atingir o fator de potência desejado.

Assim como para os diagnósticos, ao se clicar na tabela, outros detalhes sobre a barra são mostrados na parte de baixo da tela (potência ativa e reativa da carga, shunt instalado, fator de potência atual e fator de potência desejado).

A tela é dividida em várias “fichas de resultados” informando sobre valores de fator de potência e perdas. Estas apresentam os resultados das simulações, comparando as tensões e fatores de potência iniciais com os obtidos após a instalação dos reativos especificados.

O usuário seleciona em quais barras serão simulados os reativos sugeridos pelo PlanEx, através da própria tela.

Caso o planejador deseje modificar o valor de algum dos reativos calculados pelo PlanEx, basta clicar duas vezes sobre o número a ser modificado. Aparecerá uma lista de valores comerciais de capacitores para que o usuário escolha aquele que julgar ser mais adequado (detalhe na figura 16).

	v2006	v2007	QNEC2003	QNEC2004
4	0.927	1.037	-0.88	-1.2
7	0.915	1.026	2.7	3.0
8	0.923	1.042	1.2	-1.0
4	0.936	1.041	2.4	1.0
4	0.934	1.037	3.6	-3.0
7	0.994	1.038	4.8	2.0
6	0.999	1.034	6	1.8
4	0.947	0.996	18	2.0
4	0.988	1.022	50	

Figura 16 - Detalhe da lista de capacitores comerciais

Feitas as escolhas, aciona-se o botão “Simular”, dando início ao processo do cálculo de fluxo de potência, via PSS, com os reativos especificados. As fichas de resultados mostram os novos valores de tensão e fator de potência.

Finalizada a simulação, o indicador de *status* do procedimento é alterado de “Dados não Simulados” para “Dados atualizados”. Caso algum dado de entrada seja alterado, tal indicador volta à posição inicial, informando que os resultados não estão atualizados. As figuras 17 e 18 ilustram a condição anterior e a posterior a uma nova simulação.

Este processo de escolha de injeção de reativo, simulação da rede e análise de resultados, pode ser feito quantas vezes forem necessárias à elaboração dos planos de expansão.

NomeBarr	Nbarr	Subsistema	Vnominal
SPRITO R13.8	2004	50	13.8

	2003	2004	2005	2006
MVf	5.91	5.99	6.72	6.54
MVAf	89.01	72.67	81.29	85.4
MVA	4.28	22.57	18.76	27.33

Figura 17 - Simulação do procedimento padrão

NomeBarr	Nbarr	Subsistema	Vnominal
PARADPE R13.8	2575	52	13.8

	v2003	v2004	v2005	v2006	v2007	v2007					
SUEICO-13.8	2435	0.993	0.989	1.029	1.028	1.025	1.025	1.019	1.022	1.029	1.028
SLAGGAS5 13.8	2500	0.999	0.993	1.002	1.001	0.995	0.995	0.992	0.973	1.002	1.001
CONFIDGR13.8	2564	1.042	1.029	1.027	1.036	1.034	1.034	1.027	0.995	1.027	1.026
CONFIDSR13.8	2565	1.021	1.013	1.036	0.995	1.014	1.014	1.047	0.974	0.996	0.995
PARADPE R13.8	2575	1.008	1.029	1.026	1.024	1.007	1.006	1.011	0.998	1.005	1.024
SLAGGAS R13.8	2576	1.04	1.033	1.042	1.041	1.039	1.038	1.033	1.042	1.042	1.041
SLAGGAS R13.8	2577	1.043	1.037	1.041	1.047	1.034	1.044	1.035	1.017	1.041	1.047
SLAGGAS209.0	2570	1.045	1.038	1.022	1.021	1.04	1.04	0.980	1.012	1.022	1.021
SLAGGAS R13.8	2573	1.04	1.013	1.037	1.019	1.04	1.023	1.034	1.001	1.037	1.019
MATOCOR R13.8	2580	1.041	1.036	1.038	1.038	1.037	1.037	0.994	1.006	1.038	1.038

Figura 18 - Simulação do procedimento padrão

IX. ESTRATÉGIA DE DIFUSÃO TECNOLÓGICA DOS RESULTADOS DA PESQUISA

A estratégia adotada foi a elaboração de artigos técnicos para publicação em eventos nacionais e internacionais, a apresentação de palestras nos eventos e em fóruns da área, e o desenvolvimento de pesquisa de mestrado e de doutorado.

Quanto às publicações, a equipe preocupou-se em registrar diferentes etapas do projeto. Destacam-se as referências [1], [2], [3], [4], [5], [6] e [7]. Ressalta-se que o trabalho [6] recebeu o **Prêmio de Primeiro Lugar no Grupo de Planejamento e Desenvolvimento de Sistemas do X ERLAC**.

Com relação à participação em eventos, em todos os fóruns relacionados aos trabalhos acima, houve participação de algum membro da equipe deste projeto P&D.

Quanto às dissertações, há as defendidas por *José R. Valadares* [8] e *Fabricio S. Chaves* [9]. Atualmente, encontram-se em andamento uma dissertação de mestrado e uma tese de doutorado no tema do projeto.

X. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto P&D aqui tratado foi finalizado, suas etapas cumpridas e os resultados pretendidos todos alcançados. As particularidades acerca do cronograma e do orçamento encontram-se detalhadas no seu relatório final [15].

Tendo em vista a importância da alternativa Compensação Reativa/Controle de Tensão para a Expansão dos sistemas elétricos, os ganhos obtidos com a implementação da ferramenta computacional PlanEx e o cumprimento de toda a proposta feita a ANEEL, pode-se considerar que este Projeto P&D chegou ao seu final com sucesso.

XI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições da equipe da CEMIG para a implementação deste projeto P&D.

XII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E.M.A.ARAÚJO, J.R.VALADARES, M.H.M.VALE, "Políticas, Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão", Anais do VII SEPOPE, Curitiba, Brasil, 2000.
- [2] J.R.VALADARES, M.H.M.VALE, "Compensação Reativa e Controle de Tensão – Estratégia Aplicada ao Sistema CEMIG", Anais do IX ERLAC, CE 39, Foz do Iguaçu, Maio de 2001.
- [3] J.R.VALADARES, M.H.M.VALE, "Políticas, Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão", Outubro de 2001, XVI SNPTEE, Campinas, 21 a 26 de outubro de 2001.
- [4] F. S CHAVES., M.H.M.VALE, "Controle de Tensão e Compensação Reativa – Procedimento Aplicado à Expansão de Sistemas Elétricos", XIV CBA, 2002, Natal/ RN.
- [5] M. H. M. VALE, F. S. CHAVES, B. A. C. SILVA, A. N. CORTEZ, J. R. VALADARES, J. C. TEIXEIRA, "Avaliação Técnica de Alternativas de Expansão-Compensação Reativa e Estabilidade de Tensão", IX SEPOPE, maio de 2004, Rio de Janeiro, Brasil
- [6] M. H. M. VALE, F. S. CHAVES, B. A. C. SILVA, J. R. VALADARES; "PLANEX - Ferramenta Computacional Aplicada à Expansão CR/CT", X ERLAC, Argentina, 2003.
- [7] M. H. M. VALE, F. S. CHAVES, B. A. C. SILVA, J. R. VALADARES, "PlanEx – Ferramenta Computacional Aplicada à Expansão – Compensação Reativa / Controle de Tensão", Revista Eletroevolução, nº 32, pp. 47 a 52, setembro 2003.
- [8] J. R. VALADARES; "Proposta de Políticas, Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência", Dissertação de Mestrado, 2001, UFMG.
- [9] F. S. CHAVES, "Proposta de Procedimento para Compensação Reativa e Controle de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência", Dissertação de Mestrado, 2001, PPGEE, UFMG.
- [10] Projeto P&D - RELATÓRIO 1 – " Revisão Bibliográfica".
- [11] Projeto P&D - RELATÓRIO 2–"Metodologia Aplicada à Expansão".
- [12] Projeto P&D- RELATÓRIO 3–"Políticas, Critérios e Procedimentos".
- [13] Projeto P&D - RELATÓRIO 4 –"Resultados de Aplicação Prática".
- [14] Projeto P&D – "Manual de Instalação e Operação do PlanEx".
- [15] Projeto P&D – "Relatório Final".