

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Discente: Paulo Henrique Volpato Garcia
Orientador: Prof.Dr. Raphael Augusto de Souza Benedito

PRIMEIROS PASSOS:
FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO ANAREDE

CURITIBA
Outubro de 2014

1. Aspectos Gerais do ANAREDE e Fluxo de Potência Continuado

O Programa de Análise de Redes ou ANAREDE é um programa computacional desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) o qual possibilita a realização de estudos em operação e planejamento de sistemas elétricos de potência. O CEPEL disponibiliza junto com o ANAREDE um manual do usuário onde podem ser encontradas informações como as dispostas entre outras em Cepel (2013).

A versão utilizada nesse estudo é numerada como V10.00.01, os seguintes programas compõem o ANAREDE:

- Programa de Fluxo de Potência;
- Programa de Equivalente de Redes;
- Programa de Análise de Contingências;
- Programa de Análise de Sensibilidade de Tensão;
- Programa de Análise de Sensibilidade de Fluxo;
- Programa de Fluxo de Potência Continuado;
- Programa de Definição das Redes Complementares e Simulação;
- Programa de Análise de Corredores de Recomposição.

O ANAREDE pode ser inicializado por um prompt de comando o qual necessita de um arquivo *.pwf* (ou *.txt*) para ser executado, esse arquivo ou algoritmo pode ser criado através de um simples bloco de notas desde que siga o modelo de leitura do programa.

Ele também possui uma interface gráfica intuitiva e que torna a sua utilização simplificada e que será apresentada neste estudo. A figura 1 mostra a interface inicial do programa.

Através dessa tela inicial é possível inicializar qualquer um dos programas descritos anteriormente, entretanto, para este trabalho, torna-se necessário apenas o conhecimento do funcionamento do Programa de Fluxo de Potência Continuado, já que este é o alvo do estudo proposto. Enfatiza-se, porém, que caso o usuário se sinta tentado a conhecer o funcionamento dos outros programas, que consulte o manual disponibilizado pelo CEPEL ou outras obras acadêmicas.

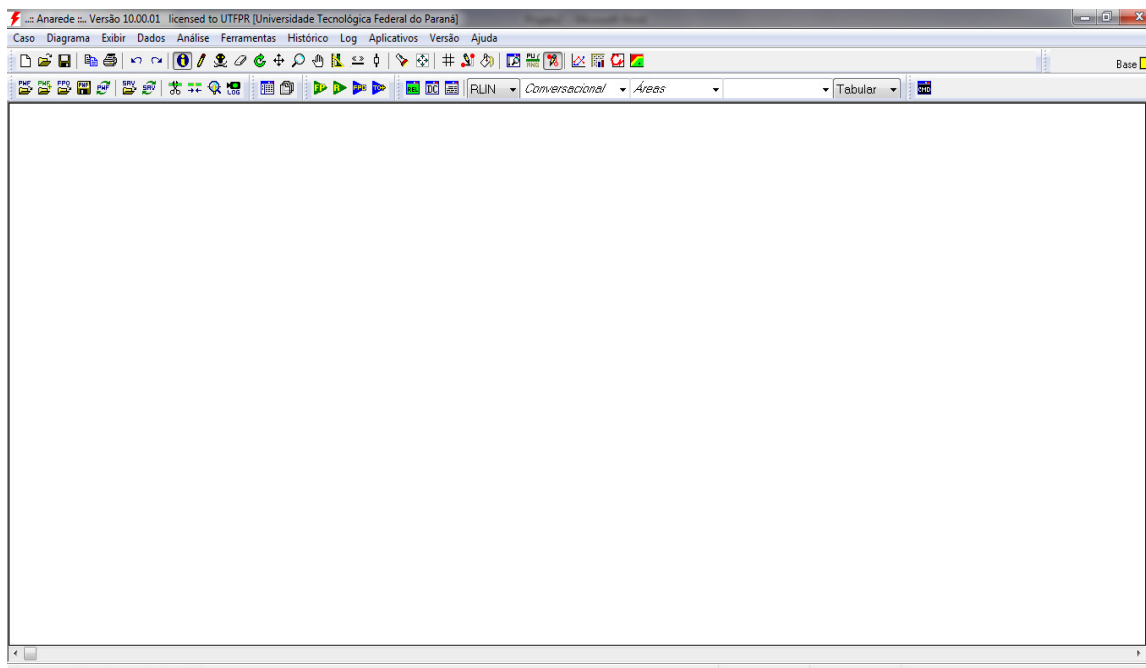


Figura 1 – Tela Inicial do ANAREDE

O CEPEL disponibiliza junto com o ANAREDE alguns arquivos .pwf de casos já estudados e conhecidos na literatura, como, por exemplo, o *IEEE 14 Barras* e o *IEEE 30 Barras* entre outros.

Para utilização desses arquivos que estarão disponíveis junto ao diretório onde foi instalado o ANAREDE, na pasta “Exemplos”, por exemplo, caso o ANAREDE tenha sido instalado no diretório “C:” do computador, a pasta “Exemplos” deve se encontrar em “C:\CEPEL\ANAREDE\V100001\Exemplos”.

Além dos arquivos disponibilizados pelo CEPEL o usuário pode criar redes através da interface gráfica utilizando o botão “Inserir ou Desenhar Elemento”.

Neste trabalho não será exposto um passo a passo para **a criação de redes pelo usuário através da interface gráfica, porém recomenda-se ao usuário que queira criar novas redes que consulte Santos *et al.* (2013)**. Em Santos *et al.* (2013) é exposto o passo a passo para a criação de redes e, também, a explicação da utilização do programa de fluxo de potência.

Para a inicialização de um novo caso através de um arquivo existente deve-se clicar em “Caso”, em seguida em “Carregar”. Irá surgir uma caixa de diálogo onde você deve navegar até o diretório/pasta onde o arquivo está salvo, selecioná-lo e clicar em “Abrir”. Com isso o caso selecionado será carregado no programa e a tela inicial irá desenhar o sistema referente ao arquivo.

Por exemplo, as imagens abaixo mostram a adição do caso “*IEEE 14 Barras*” disponibilizado pelo CEPEL:

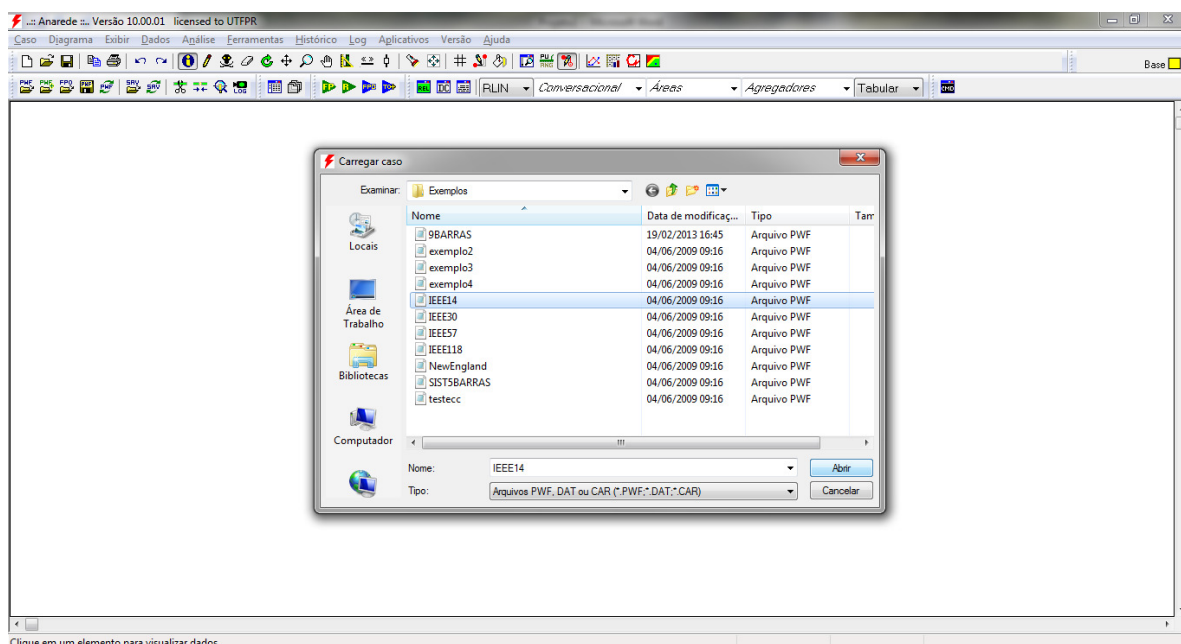


Figura 2 – Adicionando “IEEE 14 Barras” ao ANAREDE

Com isso o programa irá representar graficamente o sistema no espaço da interface gráfica.

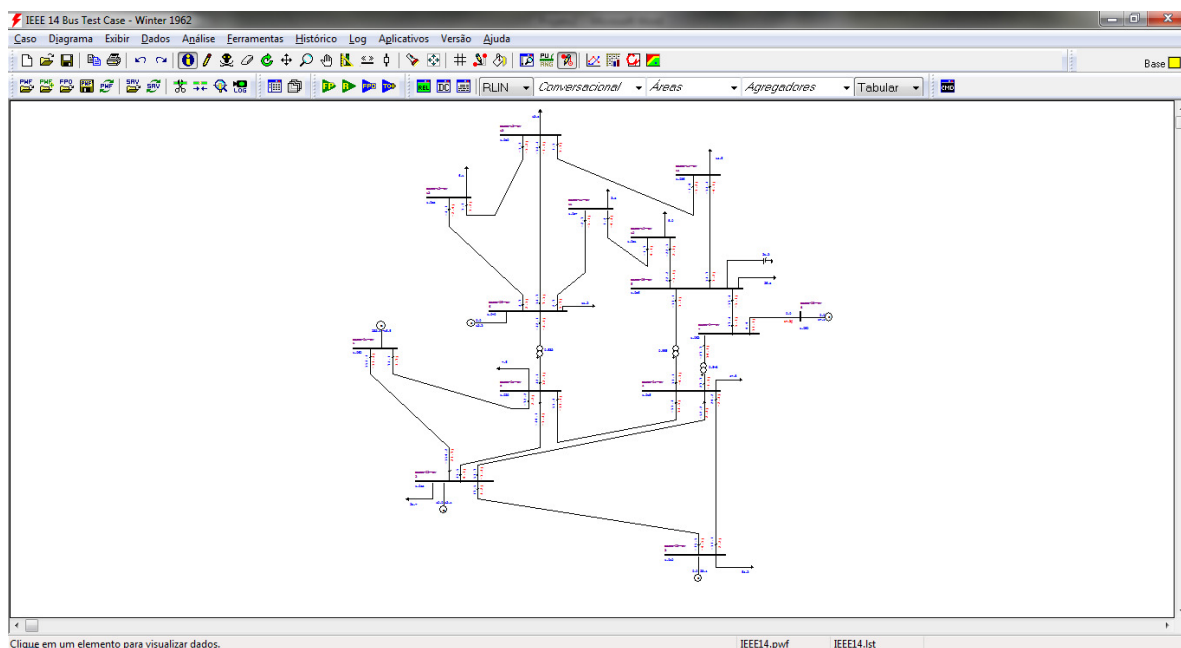


Figura 3 – Representação Gráfica “IEEE 14 Barras” ao ANAREDE

As ferramentas da interface gráfica como zoom e movimentação da área de trabalho podem auxiliar no entendimento do sistema como, por exemplo, a nomenclatura das barras e os fluxos de potência partindo da mesma através de cada linha em que está conectada. Essas ferramentas simples podem ser utilizadas através de seleção na segunda linha de menus do programa representadas por uma pequena lupa

(zoom) e uma pequena mão (mover área de trabalho). Outras ferramentas disponíveis nos menus principais da interface gráfica do programa possuem uma breve descrição de função caso o mouse seja posicionado em cima do botão desejado.

A partir do carregamento de um arquivo é possível executar o Programa de Fluxo de Potência Continuado do ANAREDE.

1.1 Programa de Fluxo de Potência Continuado do ANAREDE

O Programa de Fluxo de Potência Continuado do ANAREDE utiliza de vários fluxos de potência calculados sequencialmente, onde a carga de um conjunto de barras é aumentada seguindo uma direção especificada. Dessa forma sabe-se que o programa segue como parâmetro de continuação a carga nas barras especificadas.

Com isso podem ser observados os pontos de instabilidade de tensão seguindo da tensão nas barras relacionadas ao crescimento da demanda nesse barramento. Podem ser, portanto, obtidas as curvas PV para as barras especificadas.

O algoritmo segue 4 critérios de parada para o cálculo do fluxo de potência, são eles:

- O usuário deve especificar uma constante de número máximo de resoluções de fluxo de potência a ser atingido, quando esse número de resoluções é atingido o programa para. Parâmetro *ICIT*;
- O usuário deve especificar uma constante de máximo incremento de carga, quando esse número é atingido o programa para. Parâmetro *DINC*;
- O usuário deve especificar uma constante de mínimo incremento de carga, quando o incremento de carga for menor que o mínimo especificado o programa para. Parâmetro *ICMN*;
- O usuário deve especificar uma constante de número máximo de vezes em que o programa irá repetir o fluxo de potência sem encontrar convergência, quando o programa chegar a esse número de resolução de fluxos de potência sem convergência, o programa para. Parâmetro *DMAX*.

Quando os dois últimos critérios são atendidos, isso significa que o sistema atingiu o seu máximo carregamento.

Todas essas constantes e onde inserir seus valores serão mostradas mais a frente.

Ao se executar o programa de fluxo de potência continuado, o ANAREDE automaticamente pode gerar cinco arquivos que serão automaticamente salvos na mesma pasta do arquivo *.pwf* da rede. Os arquivos serão gerados com nomes genéricos,

o que significa que se existir algum arquivo com o mesmo nome e extensão na pasta ele será substituído. Os principais arquivos gerados são os seguintes:

- RELAT.OUT: é um relatório que contém, para todos os fluxos de potência calculados, os dados das 10 primeiras barras que mais sofreram desvios de tensão quando relacionada ao fluxo de potência anterior. Este arquivo pode ser lido através de um bloco de notas do *WINDOWS*;
- QLIM.OUT: quando a opção QLIM está marcada este arquivo é gerado, e consiste de um relatório onde são expostas as gerações reativas de cada máquina síncrona relacionada com a sua capacidade nominal. Este arquivo pode ser lido através de um bloco de notas do *WINDOWS*;
- PV.PLT: são as curvas PV das barras selecionadas para monitoramento. Essas curvas devem ser visualizadas através do *software* PLOT CEPEL, que é distribuído com o ANAREDE pelo CEPEL.

Para se executar o programa de fluxo de potência continuado para o sistema carregado no ANAREDE deve-se clicar no menu principal em “Análise” e depois em “Fluxo de Potência Continuado...”, através disso a seguinte Janela irá abrir:

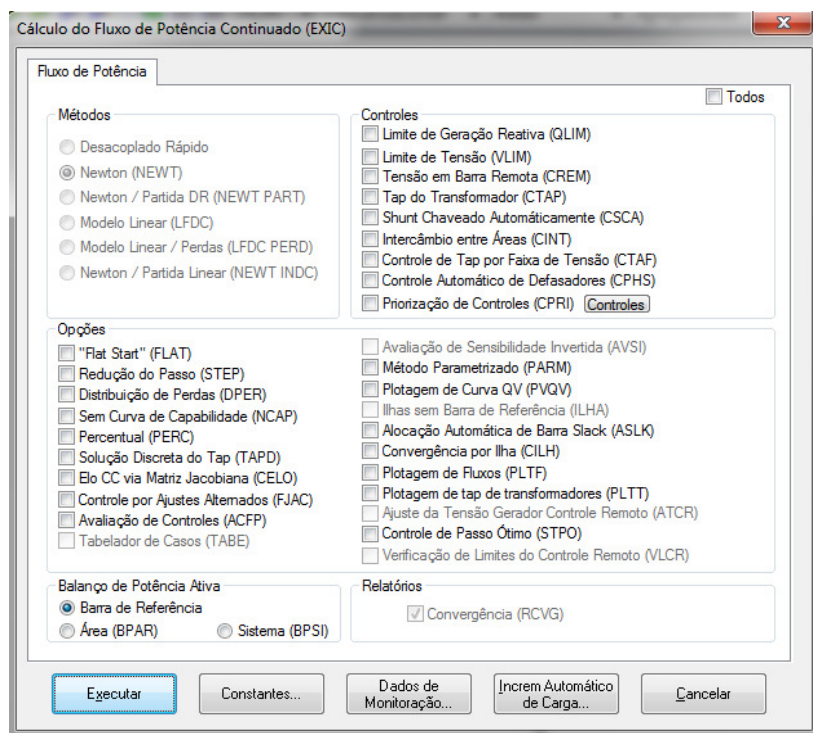


Figura 4 – Janela Inicial Fluxo de Potência Continuado ANAREDE

Através dessa janela são marcados vários comandos que serão levados em conta durante a execução do fluxo de potência continuado. Cada um desses comandos serão explicados a seguir.

Durante a execução do programa de fluxo de potência, para cada incremento de carga realizado no algoritmo, é reestabelecido o balanço de potência do sistema dos geradores, isso de acordo com o fator de participação e limite de geração de cada máquina. Isso pode ser feito marcando um dos três campos no canto esquerdo inferior da janela mostrada na figura 4, onde as opções são balanço de potência apenas para a barra de referência, apenas para as barras da mesma área onde ocorreu o desbalanço (*BPAR*), ou então entre todos os geradores do sistema (*BPSI*).

A seguir é exposto o que significa cada comando da seção “Controles”, na direita superior da janela mostrada na figura 4.

- Limite de Geração Reativa (*QLIM*): Quando este item é selecionado o controle de geração reativa é controlado na barra, sendo sempre comparado com os limites da barra, sendo que enquanto esse limite não for violado, a magnitude da tensão da barra é mantida constante, porém quando o limite é atingido, toma-se como constate esse limite de geração reativa e a tensão passa a ser variável;
- Limite de Tensão (*VLIM*): Quando este item é selecionado o controle da tensão é controlado na barra, sendo sempre comparado com os limites da barra, sendo que enquanto esse limite não for violado, a geração de potência reativa na barra é mantida constante, porém quando o limite é atingido, toma-se como constate esse limite de tensão e a geração reativa passa a ser variável;
- Tensão em Barra Remota (*CREM*): Este item ativa a aplicação de controle remoto de tensão por excitação de geração em uma barra, onde a tensão da barra controladora é modificado de forma que a tensão na barra controlada permaneça a mesma;
- Tap do Transformador (*CTAP*): Através deste item o controle de tensão da barra controlada é realizado através de modificações automáticas dos Taps dos transformadores de modo a manter a magnitude da tensão na barra controlada no valor especificado;
- Shunt Chaveado Automaticamente (*CSCA*): Através deste item o controle de tensão da barra controlada é realizado através de chaveamento de banco de capacitores/reatores de forma automática com a intenção de manter a magnitude da tensão na barra controlada no valor especificado;
- Intercâmbio entre Áreas (*CINT*): Permite o intercâmbio de fluxo de potência entre áreas, sempre relacionando os valores dos fluxos intercambiáveis e

distribuindo o erro dessas valores com valores programados através dos fatores de participação das barras.

- Controle de Tap por Faixa de Tensão (*CTAF*): Este item só pode ser utilizada caso a função *CTAP* esteja ativada. Ela impõe uma faixa de valores de tensão para a barra controlada através do código *DTPF*;
- Controle Automático de Defasadores (*CPHS*): Ativa, para os transformadores defasadores, a aplicação de variação automática da fase com a finalidade de controlar a potência quando realizada a solução de fluxo de potência;
- Priorização de Controles (*CPRI*): Quando este item está selecionado é criado uma lista de prioridades entre as opções selecionadas anteriormente a serem levadas em conta durante a execução do fluxo de potência. A lista dessas opções pode ser ordenada através do botão “Controles”.

A seguir são descritas as opções para a execução do fluxo de potência continuado, todas localizadas no centro da janela exposta na figura 4.

- Flat Start (*FLAT*): Ao marcar essa opção, quando o cálculo de fluxo de potência começar, será atribuído para tensão o valor de 1p.u. para os sistemas CA;
- Redução do Passo (*STEP*): Quando essa opção é marcada, os valores de correção de tensão e ângulo de fase da barra são limitados aos valores das constantes *VSTP* e *ASTP* respectivamente durante o cálculo de fluxo de potência. (*VSTP*: Valor máximo de correção de magnitude de tensão. Default:5%) e (*ASTP*: Valor máximo de correção de ângulo de fase da tensão. Default:0.05 rad);
- Distribuição de Perdas (*DPER*): Quando esta opção não está selecionada as perdas de transmissão são todas absorvidas pela barra de referência do sistema, caso essa opção seja marcada essas perdas serão distribuídas entre todas as barras de geração do sistema, sempre respeitando o fator de participação de cada barra, definidos pelo código *DGER*;
- Sem Curva de Capabilidade (*NCAP*): Quando essa opção é marcada é desativada, durante o processo de solução do fluxo de potência, a curva de capabilidade de máquina, entretanto os valores dos limites de geração, tanto

máximo como mínimo, não são alterados;

- Percentual (*PERC*): Quando essa opção é marcada é adicionado ao relatório de fluxos uma comparação dos valores IPU em relação ao carregamento nominal do sistema;
- Solução Discreta do Tap (*TAPD*): Quando essa opção é marcada é ativado um algoritmo que discretiza o Tap dos transformadores durante a execução do fluxo de potência.
- Elo CC Via Matriz Jacobiana (*CELO*): Quando essa opção é marcada é ativada a solução ao mesmo tempo do grupo de equações que modelam os elos de corrente contínua segundo o método de Newton-Raphson;
- Controle por Ajustes Alternados (*FJAC*): Quando essa opção é marcada é permitido que ocorra a solução do fluxo de potência sem inclusão de controles remotos de tensão por excitação de geradores ou por variação de Tap;
- Avaliação de Controles (*ACFP*): Quando essa opção é marcada é gerado um relatório que onde estão relacionados dados de transformadores que podem causar algum problema a convergência, durante o cálculo do fluxo de potência;
- Tabelador de Casos (*TABE*): Quando essa opção é marcada, ela ativa o armazenamento de tensões, fluxos entre as linhas e transformadores definidos e geração de potências reativas, cada qual pelo código *DBTB*, *DPGE*, *DFTBe* *DQGE*;
- Método Parametrizado (*PARM*): Quando essa opção é ativada é possível obter a parte inferior ou instável da curva PV;
- Plotagem de Curva QV (*PVQV*): Quando essa opção é marcada o programa gera a curva VQ das dez barras com maior variação de tensão do sistema;
- Ilhas sem Barra de Referência (*ILHA*): Quando essa opção é ativada as barras das ilhas elétricas sem barra de referência são desligadas;
- Alocação Automática da Barra Slack (*ASLK*): Ativando essa opção as redes elétricas ilhadas recebem uma barra slack automaticamente de forma a viabilizar a solução do fluxo de potência;
- Convergência por Ilha (*CILH*): Ao marcar essa opção a solução de fluxo de potência ativa a solução independente para cada ilha elétrica;

- Plotagem de Fluxos (*PLTF*): Quando essa opção é marcada são criados automaticamente os arquivos “FLUXOS_MVA.PLT”, “FLUXOS_MW.PLT”, “FLUXOS_MVAR.PLT” e “QP.PLT” onde são representados os fluxos dos circuitos selecionados para o fluxo de potência continuado (será mostrado mais a frente como selecionar os circuitos) para os três primeiros arquivos e para o quarto arquivo é plotada a potência reativa necessária para a linha de transmissão devido a seu carregamento. Esses arquivos devem ser executados com o PLOT CEPEL;
- Plotagem de Tap dos Transformadores (*PLTT*): Quando essa opção é ativa é criado automaticamente o arquivo “TAP.PLT” onde são representados os Taps dos transformadores. Esse arquivo deve ser executado com o PLOT CEPEL;
- Controle de Passo Ótimo (*STPO*): Quando essa opção é ativa é limitado a correção de variáveis de estado através de um problema de otimização para o problema de fluxo de potência. Isso tem como objetivo diminuir os erros de potência ativa.

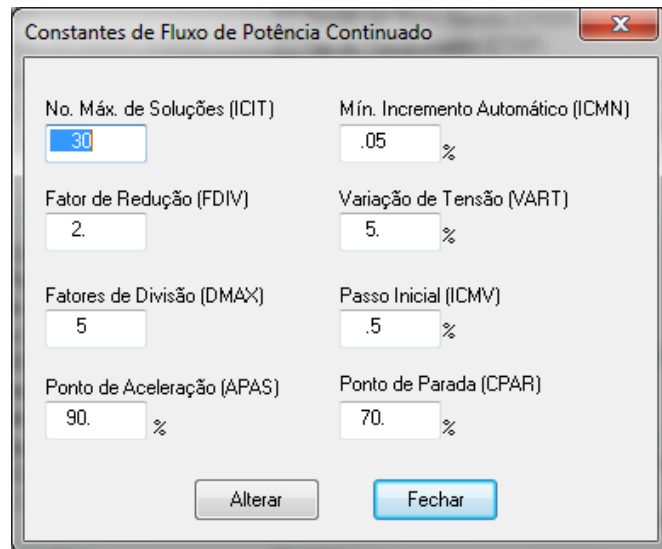
Logo abaixo de todas as opções e controles disponíveis para a execução do programa de fluxo de potência continuado existem cinco botões. Sendo eles “Executar”, “Constantes...”, “Dados de Monitoração...”, “Incremento Automático de Carga...” e “Cancelar”.

1.1.1 Botões “Executar” e “Cancelar”

De forma intuitiva, ao clicar no botão Executar o programa de fluxo de potência será executado levando em consideração os parâmetros inseridos pelo usuário. Clicando o botão Cancelar todo o processo é cancelado. Antes de clicar no botão executar é necessário inserir os parâmetros nos botões “Constantes...”, “Dados de Monitoração...” e “Incremento Automático de Carga...”.

1.1.2 Botão “Constantes...”

Ao clicar no botão “Constantes...” a seguinte janela será exibida:



A janela de configuração intitulada "Constantes de Fluxo de Potência Continuado" apresenta os seguintes campos de entrada:

Constante	Valor	Unidade
No. Máx. de Soluções (ICIT)	30	
Mín. Incremento Automático (ICMN)	.05	%
Fator de Redução (FDIV)	2.	
Variação de Tensão (VART)	5.	%
Fatores de Divisão (DMA×)	5	
Passo Inicial (ICMV)	.5	%
Ponto de Aceleração (APAS)	90.	%
Ponto de Parada (CPAR)	70.	%

Na base da janela, há dois botões: "Alterar" e "Fechar".

Figura 5 – Janela Constantes de Fluxo de Potência Continuado ANAREDE

O usuário deve inserir o valor desejado para cada uma das constantes descritas na janela, cada uma dessas constantes tem um valor de *default* do ANAREDE. A seguir são descritas cada uma das constantes do programa de fluxo de potência continuado.

- N° Máx de Soluções (*ICIT*): Esse valor corresponde ao número máximo de soluções de fluxo de potência a serem resolvidos no algoritmo de fulxo de potência continuado. O seu valor *Default* dado pelo ANAREDE é 30;
- Mín. Incremento Automático (*ICMN*): Essa constante corresponde ao valor mínimo de incremento automático da carga, ou seja o mínimo valor a ser incrementando à carga durante a execução do fluxo de potência continuado. Quando esse valor é alcançado o programa finaliza a execução do fluxo de potência continuado. Caso a Opção “Método de Parametrização” estiver marcada, quando esse valor for atingido o programa passa a “parametrizar” a resolução do fluxo de potência continuado. O seu valor *Default* dado pelo ANAREDE é 0,05;
- Fator de Redução (*FDIV*): Essa constante é o valor ao qual o incremento de carga será dividido quando o fluxo de potência não encontrar solução, ou seja, não converge. O seu valor *Default* dado pelo ANAREDE é 2;
- Variação de Tensão (*VART*): Quando a tensão desta barra em relação ao valor base ultrapassa esse valor a barra passa a ser monitorada automaticamente pelo ANAREDE. O seu valor *Default* dado pelo ANAREDE é 5;

- Fatores de Divisão (*DMAX*): Essa constante é utilizada como fator de parada do ANAREDE, é o número máximo de vezes em que o fator de redução (*FDIV*) pode ser aplicado. O seu valor *Default* dado pelo ANAREDE é 5;
- Passo Inicial (*ICMV*): Esse valor é tamanho do passo inicial quando passa de carregamento para modulo da tensão o parâmetro de continuação. O seu valor *Default* dado pelo ANAREDE é 0,5;
- Ponto de Aceleração (*APAS*): Essa constante indica o ponto em relação do máximo carregamento em que o tamanho do passo do fluxo de potência continuado será acelerado. O seu valor *Default* dado pelo ANAREDE é 90;
- Ponto de Parada (*CPAR*): Esse valor especifica o ponto em que o fluxo de potência continuado parametrizado deve parar de ser calculado referente ao máximo carregamento do sistema. O seu valor *Default* dado pelo ANAREDE é 70;

1.1.3 Botão “Dados de Monitoração...”

Clicando no Botão “Dados de Monitoração...” o ANAREDE irá mostrar a seguinte janela de inserção de dados:

Figura 6 – Janela Dados de Monitoração do Fluxo de Potência Continuado ANAREDE

Essa janela lê os dados de monitoração através dos códigos de leitura dos dados de monitoração de tensão (*DMTE*), leitura dos dados de monitoração de geração de potência reativa (*DMGR*), leitura dos dados de monitoração de fluxo em circuito CA (*DMFL*) e leitura dos dados de monitoração para estabilidade de tensão em barra CA (*DMET*). Para selecionar o tipo de leitura de dados de monitoração que será inserido o usuário deve escolher umas das quatro opções no espaço tipo de monitoração.

Em sequência o usuário deve selecionar quais as barras que terão essa grandeza monitorada durante os cálculos de fluxo de potência. A idéia principal aqui é que o usuário crie um conjunto de barras, áreas ou tensões utilizando os espaços disponíveis. Isso é feito através de condições e adição (união) ou da criação de um grupo onde os dois extremos sejam as duas barras selecionadas, seguindo a ordem decrescente de numeração das barras (intervalo).

No centro da janela existe um espaço para a condição principal, onde o usuário pode incluir o grupo criado no quadro abaixo ao criado no quadro acima (união), selecionar somente os componentes que existam ao mesmo tempo em ambos os conjuntos (interseção) ou somar ao grupo criado no quadro acima o grupo criado no quadro abaixo (união).

Após a criação o usuário deve selecionar o campo adicionar, caso queira adicionar o grupo, ou remover, caso queira excluí-lo, e, então, clicar no botão adicionar. A partir desse momento esse grupo de elementos selecionados será monitorado de acordo com o tipo escolhido pelo usuário.

Destaca-se que o usuário pode criar diversos conjuntos de barras, áreas e tensões a serem monitorados e não necessariamente apenas um conjunto, isso permite, por exemplo, que o usuário adicione barra por barra a ser monitorada.

Por fim o usuário deve clicar em “Aceitar” para que os dados de monitoração sejam gravados, “Remover Tudo”, para excluir todos os dados de monitoração já gravados, ou então em “Fechar” para voltar a janela anterior.

Após isso a ANAREDE volta à janela da figura 6.

1.1.4 Botão “Incremento Automático de Carga...”

Clicando no botão “Incremento Automático de Carga...” o ANAREDE irá abrir a seguinte janela:

Figura 7 – Janela Incremento de Carga do Fluxo de Potência Continuado ANAREDE

Nessa janela o usuário insere os elementos ou conjunto de elementos e o incremento de carga que eles devem sofrer de acordo com suas potências ativas e reativas nominais. O incremento de carga é realizado através do código de execução (*DINC*).

O usuário deve seguir a mesma metodologia de seleção de elementos que utilizada na janela dado de monitoração. Primeiro deve ser selecionado quais as barras que sofrerão o incremento de carga durante os cálculos de fluxo de potência. A ideia principal aqui é que o usuário crie um conjunto de barras, áreas ou tensões utilizando os espaços disponíveis. Isso é feito através de condições e adição (união) ou da criação de um grupo onde os dois extremos sejam as duas barras selecionadas, seguindo a ordem decrescente de numeração das barras (intervalo).

No centro da janela existe um espaço para a condição principal, onde o usuário pode incluir o grupo criado no quadro abaixo ao criado no quadro acima (união), selecionar somente os componentes que existam ao mesmo tempo em ambos os conjuntos (interseção) ou somar ao grupo criado no quadro acima o grupo criado no quadro abaixo (união).

Depois da seleção de um conjunto de barras, deve-se preencher o campo “P” com o percentual que os elementos desse conjunto irão ser incrementados à potência ativa, o “Q” como percentual que os elementos desse conjunto irão ser incrementados à

potência reativa, o campo “P_{máx}” com o valor máximo possível de ser incrementado à potência ativa dos elementos e “Q_{máx}” com o valor máximo possível de ser incrementado à potência reativa dos elementos. Todos os valores de incremento de carga são referenciados às potências nominais dos elementos.

Após isso o usuário deve clicar no botão inserir para inserir o incremento criado ao programa de fluxo de potência continuado.

Destaca-se que o usuário pode criar diversos conjuntos de barras, áreas e tensões a serem incrementados e não necessariamente apenas um conjunto, isso permite, por exemplo, que o usuário adicione barra por barra a ser monitorada. Lembrando que quando é adicionado um conjunto de elementos, todos eles sofrerão o mesmo incremento percentual de carga. Caso o usuário queira incremento de carga diferente para diferentes elementos deve-se realizar a adição de mais conjuntos.

Recomenda-se que se o usuário se sentir mais seguro em realizar a adição barra por barra, que assim o faça. Por fim o usuário deve clicar em “Aceitar” para voltar à janela anterior o prosseguir com o programa, ou “Cancelar” para cancelar as adições.

Após esse passo o usuário finaliza a adição de dados no ANAREDE e está apto a executar o programa para então ler os gráficos de curvas PV através do PLOT CEPEL.

2. SIMULAÇÃO DE REDES NO ANAREDE PARA ESTUDO DE COLAPSO DE TENSÃO

Utilizando os conhecimentos mostrados anteriormente sobre o ANAREDE e o programa de fluxo de potência continuado, foram propostos o estudo de dois sistemas elétricos simples frente à variação de carga nas barras consumidoras.

Os dois sistemas elétricos a serem utilizados serão um sistema de cinco barras disponibilizado pelo CEPEL junto com o ANAREDE e o sistema do IEEE de 14 barras também já modelado e disponibilizado pelo CEPEL junto ao ANAREDE.

2.1 Sistema de Cinco Barras

O sistema de cinco barras proposto pelos autores é disponibilizado pelo CEPEL na pasta exemplos no diretório de instalação do ANAREDE. Caso a versão V10.00.01 do programa tenha sido instalado no diretório “C:” os exemplos serão encontrados em “C:\CEPEL\ANAREDE\V100001\Exemplos”.

O sistema é composto por cinco barras onde a barra1 é a referência, a barra 2 é uma

barra de geração e as barras 10, 20 e 30 são barras do tipo barra consumidora. O esquema do sistema representado através do ANAREDE está na imagem abaixo:

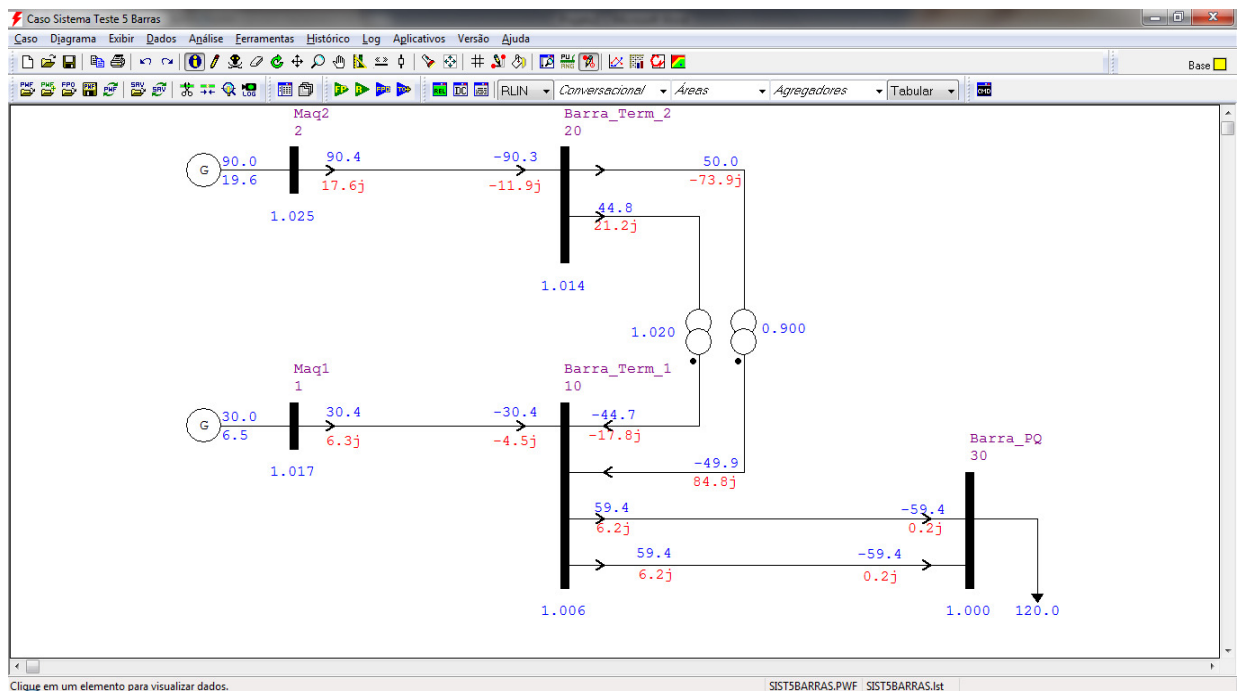


Figura 8 – Esquema do Sistema de Cinco Barras no ANAREDE

Observa-se através do esquema que a única barra que realmente tem a possibilidade de incremento de carga através de um consumidor é a barra 30. De tal forma que o estudo será realizado através de um incremento de carga de 5% da sua carga nominal que é de 120W. Será realizado então o estudo com a adição de bancos shunt a barra 30 e, então, comparação do comportamento das curvas PV.

2.1.1 Inserindo Dados no ANAREDE

Através dos passos mostrados anteriormente, serão inseridos alguns parâmetros para a realização do fluxo de potência continuado.

As opções e Controles escolhidos para essa simulação foram:

- Limite de Geração Reativa;
- Limite de Tensão;
- Redução de Passo;
- Método Parametrizado.

Onde o balanço de Potência Ativa será feito no sistema inteiro.

É importante enfatizar que as escolhas pelos controles e opções dependem do caso que o usuário deve simular e que nesse projeto foi definido pelo usuário com finalidade de exemplificação.

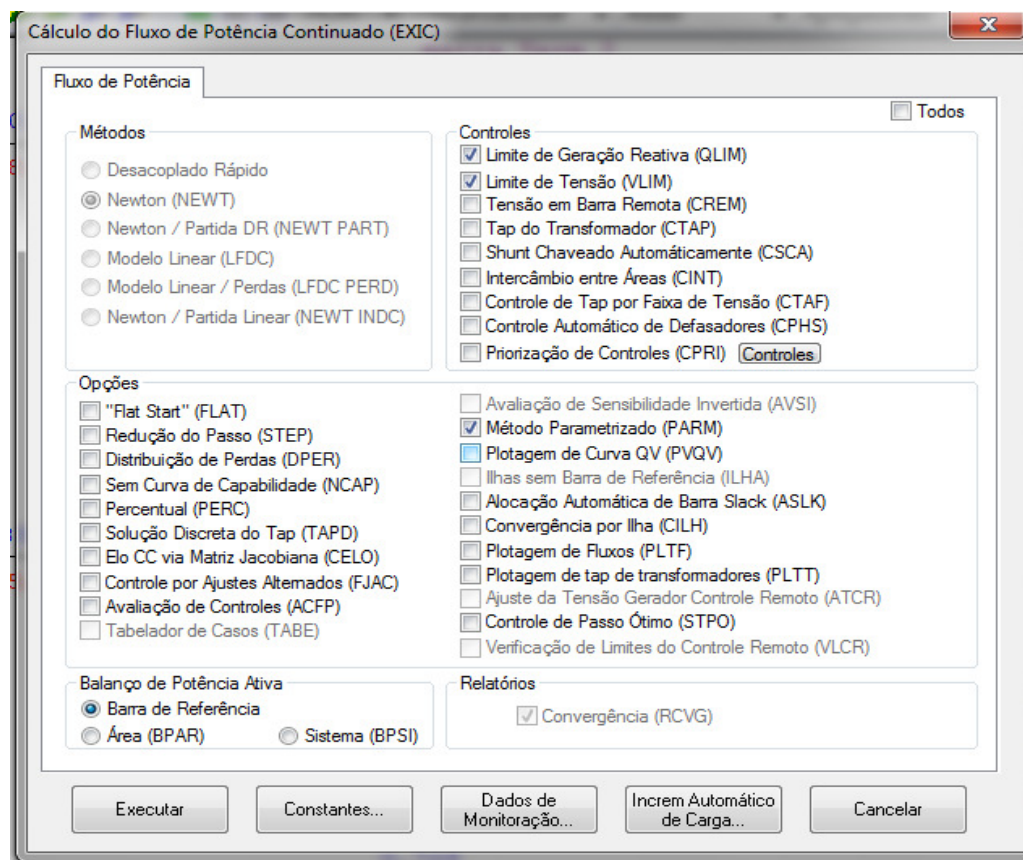


Figura 9 – Seleção de Opções e Controles para o Sistema Cinco Barras no ANAREDE

Após isso foram escolhidas as seguintes constantes:

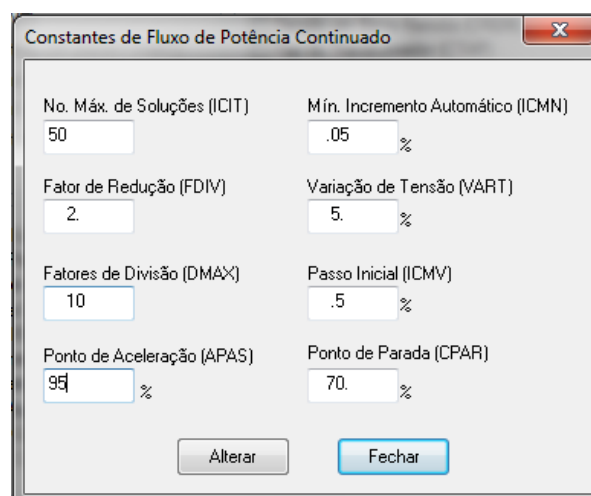


Figura 10 – Seleção das Constantes para o Sistema Cinco Barras no ANAREDE

Como já discutido anteriormente apenas a barra 30 pode sofrer incremento de carga, porém o fluxo de potência e a tensão pode variar em todas as barras do sistema, dessa forma será realizado a monitoração de tensão nas barras de carga, ou seja, as barras 10, 20 e 30 do sistema.

Figura 11 – Seleção das Barras para Monitoração de Tensão para o Sistema Cinco Barras no ANAREDE

O incremento de carga só é lógico se for realizado na barra 30, já que é a única barra no sistema realmente ligado a uma carga consumidora. Para essa barra será incrementado um valor de 5% à sua potência ativa a cada cálculo de fluxo de potência.

Figura 12 – Seleção das Barras para Incremento de Carga para o Sistema Cinco

Barras no ANAREDE

Após a inserção desses dados o programa de fluxo de potência do ANAREDE está pronto para ser executado.

2.1.2 Execução e Curva PV para o Sistema Cinco Barras sem Banco Shunt

Executando o programa de fluxo de potência continuado para os dados inseridos no item 2.1.1 obtém-se uma janela de resultados onde são mostrados os resultados dos cálculos de fluxo de potência.

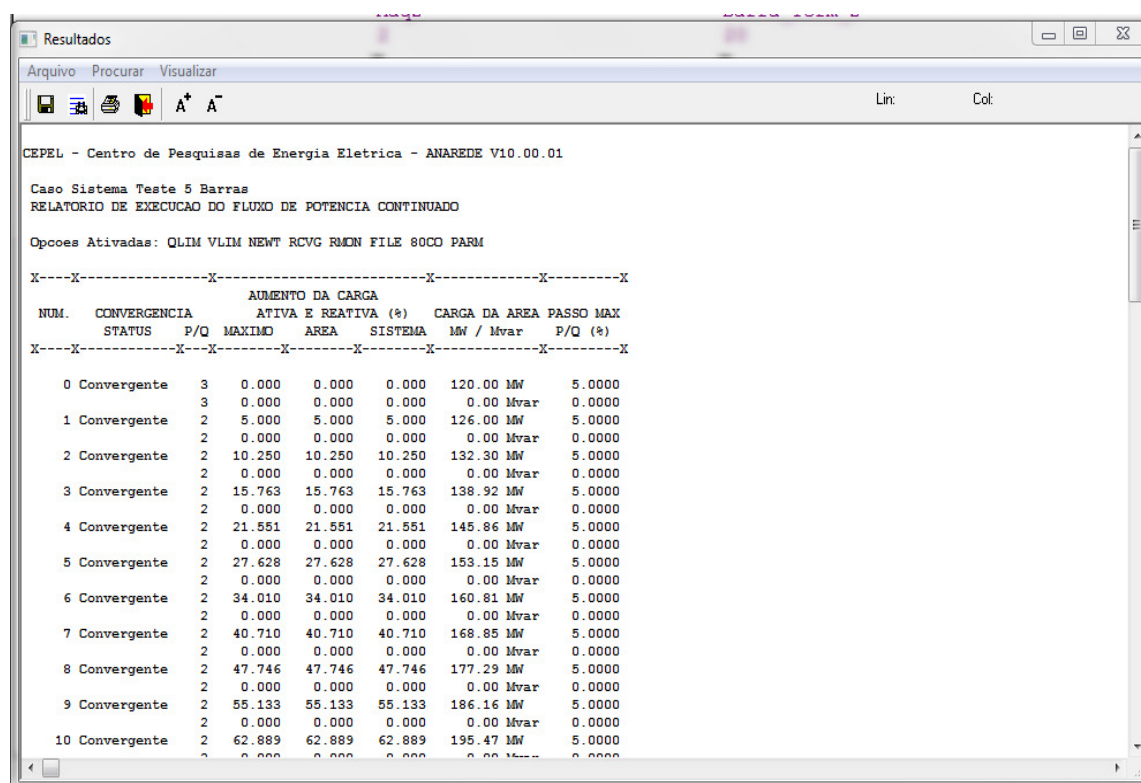


Figura 13 – Janela de Execução e Apresentação de Resultados ANAREDE

Após isso, utilizando o PLOT CEPEL é possível ler o arquivo pv.pwf gerado pelo ANAREDE contendo as curvas PV obtidas pela monitoração de tensão do sistema. As três curvas podem ser mostradas ao mesmo tempo, clicando no botão “Graph” e selecionando as três barras.

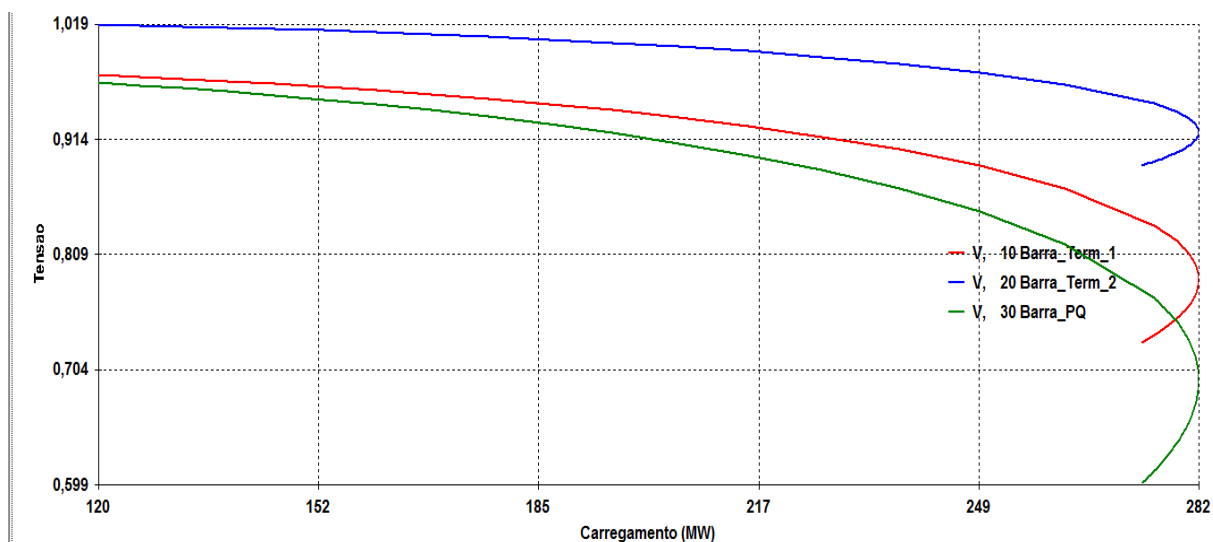


Figura 14 – Curva PV no PLOT CEPEL para o Sistema Cinco Barras

2.1.3 Execução e Curva PV para o Sistema Cinco Barra com Banco Shunt Indutivo

Para traçar a curva PV com a adição de um banco indutivo de 10MVAR basta adicionar esse valor como potência reativa de carga na barra 30.

Figura 15 – Adição de Banco de Reatores Shunt na Barra 30 do Sistema de Cinco Barras

Executando o Fluxo de Potência Continuado para os mesmos parâmetros expostos anteriormente obtém-se a seguinte curva PV com auxílio do PLOT CEPEL:

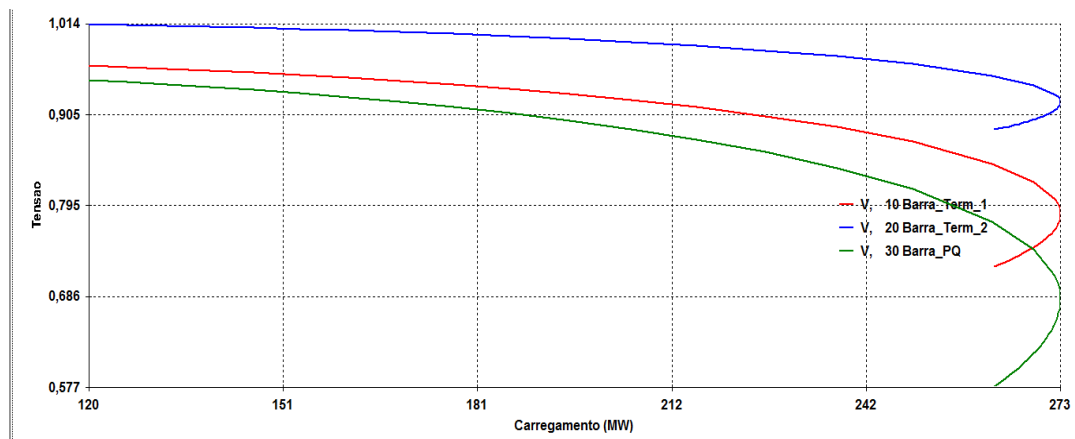


Figura 16 – Curva PV no PLOT CEPEL para o Sistema Cinco Barras com Banco de Reatores Shunt na Barra 30

Pode-se observar que os pontos de colapso de tensão para as três curvas se deslocaram para pontos com menor tensão e menor potência transferida a barra. Isso vai de encontro com os conceitos expostos durante o item 2.

2.1.4 Execução e Curva PV para o Sistema Cinco Barra com Banco Shunt Capacitivo

Para traçar a curva PV com a adição de um banco capacitivo de 10MVar basta adicionar esse valor como potência reativa de geração na barra 30.

Figura 17 – Adição de Banco de Capacitores Shunt na Barra 30 do Sistema de Cinco Barras

Executando o Fluxo de Potência Continuado para os mesmos parâmetros expostos anteriormente obtém-se a seguinte curva PV com auxílio do PLOT CEPEL:

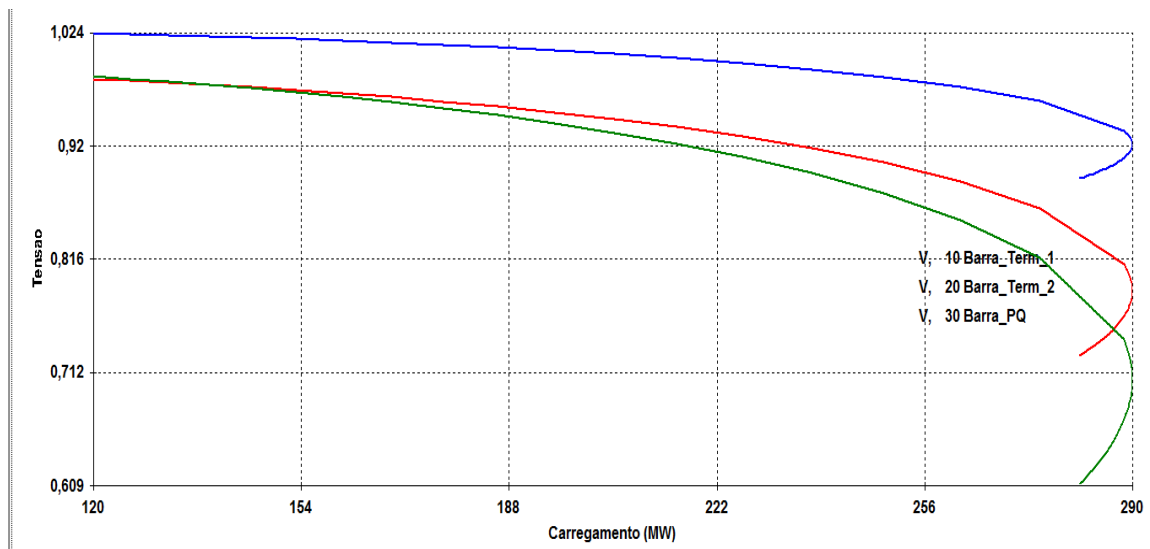


Figura 18 – Curva PV no PLOT CEPEL para o Sistema Cinco Barras com Banco de Capacitores Shunt na Barra 30

Pode-se observar que os pontos de colapso de tensão para as três curvas se deslocaram para pontos com maior tensão e maior potência transferida a barra. Isso vai de encontro com os conceitos expostos durante as aulas teóricas.

2.1.5 Execução e Curva PV para o Sistema de Cinco Barras com Contingência de Linha

Observa-se que o sistema cinco barras exposto na figura 20 possui duas linhas ligando a barra 10 à barra 30, caso uma linha seja excluída o sistema deve se comportar de forma análoga a exposta anteriormente, ou seja, deve permitir menor transferência de potência do que com as duas linhas.

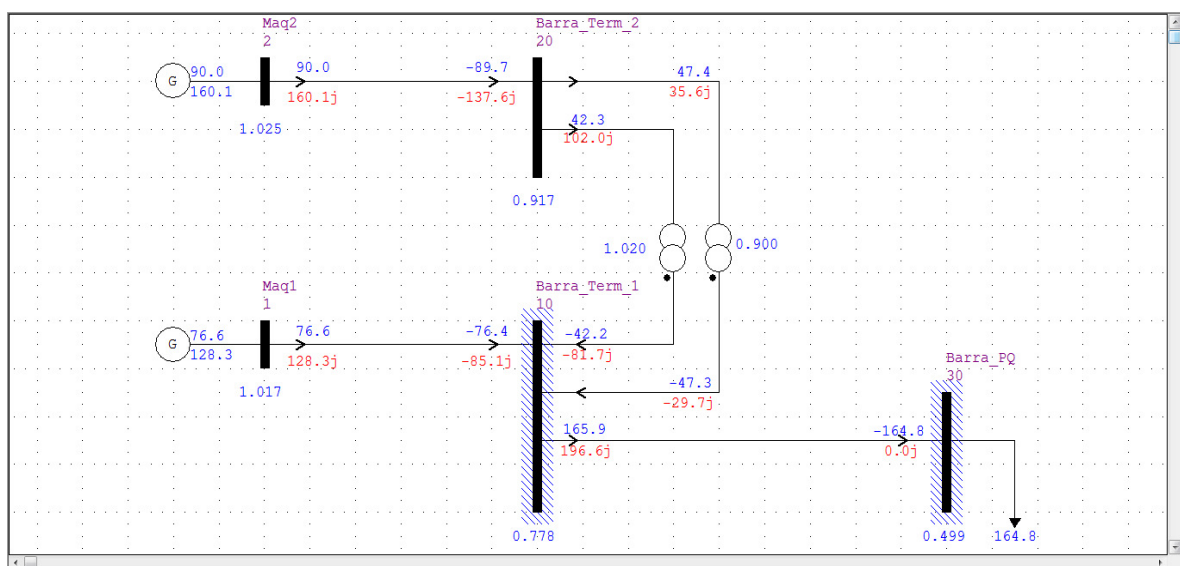


Figura 19 – Sistema de Cinco Barras com Exclusão de uma Linha

Realizando a execução do programa de fluxo de potência continuado do ANAREDE para esse sistema seguindo os mesmos parâmetros expostos em 2.1.1 é possível traçar a curva PV com auxílio do PLOT CEPEL.

Através da Figura 20 é possível notar que o ponto de colapso de tensão para as barras ocorrem para um valor menor de potência ativa quando comparado com o do sistema original.

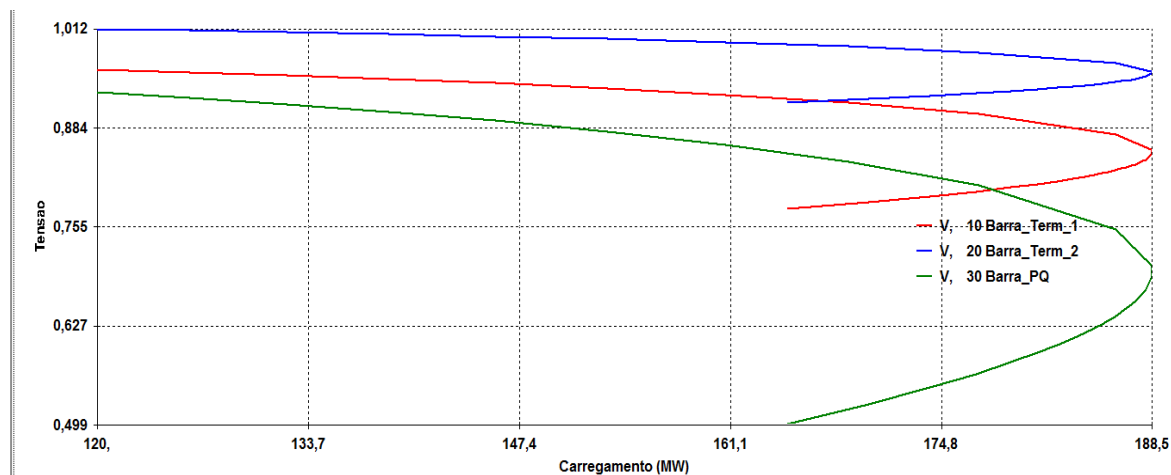


Figura 20 – Curva PV no PLOT CEPEL para o Sistema Cinco Barras com Exclusão de uma Linha ente a Barra 10 e a Barra 30

2.2 Sistema IEEE de Quatorze Barras

O Sistema IEEE de Quatorze Barras segundo Krauer (2007) é um sistema acadêmico proposto pelo IEEE de pequeno porte e que, portanto, é útil para desenvolvimento de estudos para assimilação do conhecimento básico sobre carregamento de sistemas.

Ainda segundo Krauer (2007) o sistema de quatorze barras do IEEE é composto por:

- Barra de referência (Barra 1);
- 4 Barras PV com controle de tensão (Barras 2, 3, 6 e 8);
- 6 Barras PQ (Barras 9, 10, 11, 12, 13 e 14);
- 1 Banco de Capacitores (Barra 9).

Utilizando o arquivo *IEEE14.pwf* disponibilizado pelo CEPEL no diretório de instalação do ANAREDE em “C:\CEPEL\ANAREDE\V100001\Exemplos” caso a

versão V10.00.01 do *software* tenha sido instalado no diretório “C:” pode-se carregar o sistema de quatorze barras seguindo os passos mostrados no item 3.

Como feito no item 1.1 serão incrementadas as cargas somente nas barras PQ, ou barras de carga. Para isso serão incrementadas às barras 9,10 e 14, 5% de suas potências, enquanto às barras 11, 12 e 13, serão incrementados 2,5% de suas potências.

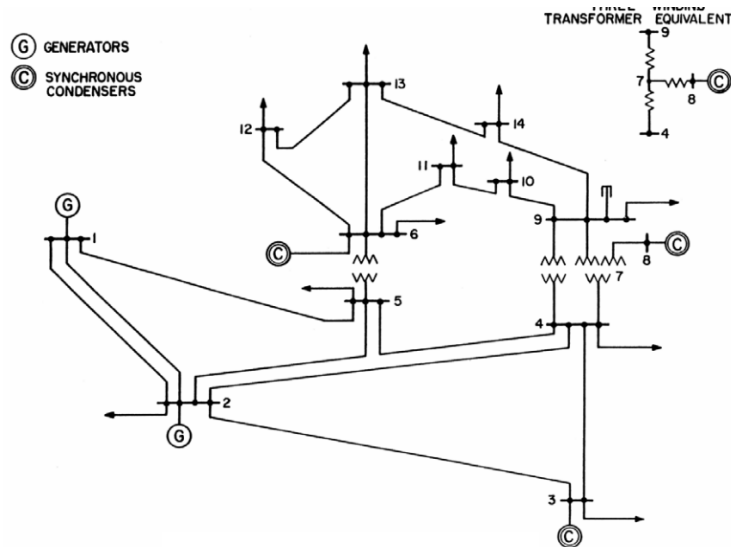


Figura 21 – Diagrama Unifilar do Sistema 14 Barras IEEE

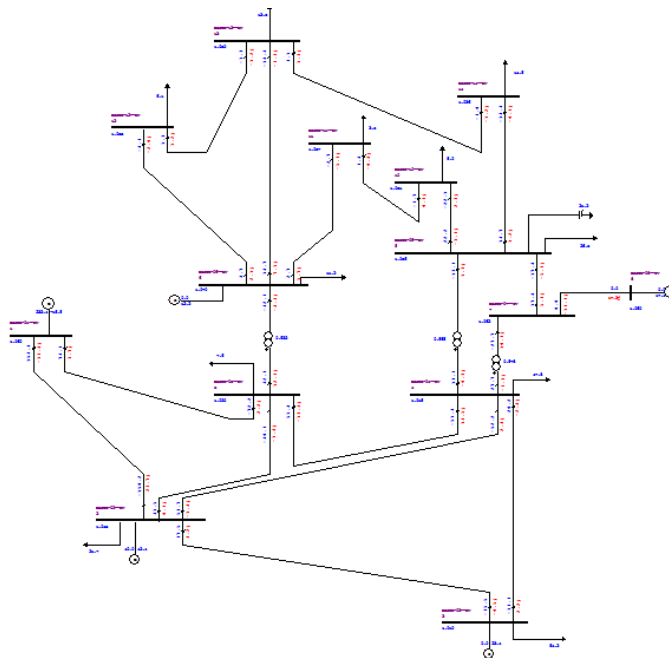


Figura 22 – Representação do Sistema 14 Barras do IEEE no ANAREDE

2.2.1 Inserindo Dados no ANAREDE

Para o sistema de quatorze barras do IEEE decidiu-se utilizar os seguintes parâmetros de controles e opções para a realização do fluxo de potência continuado:

- Limite de Geração Reativa;
- Limite de Tensão;
- “Flat Start”;
- Redução do Passo;
- Distribuição de Perdas;
- Método Parametrizado.

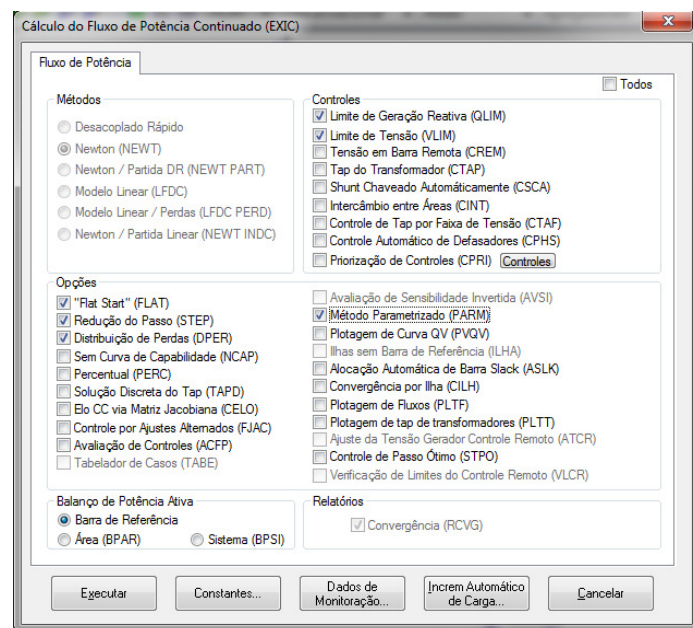


Figura 23 – Seleção de Opções e Controles para o Sistema IEEE 14 Barras no ANAREDE (AUTOR, 2014)

As constantes definidas foram

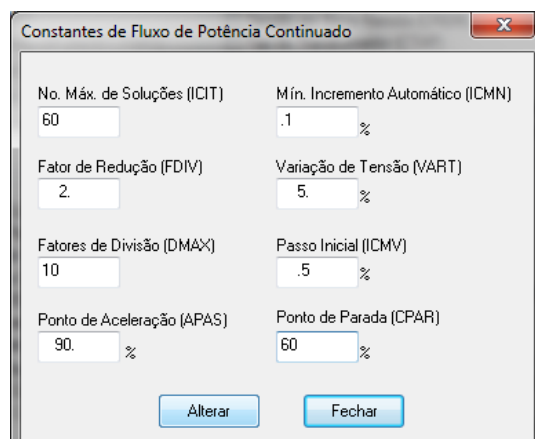


Figura 24 – Seleção das Constantes para o Sistema IEEE 14 Barras no ANAREDE

Serão incrementadas às barras 9,10 e 14, 5% de suas potências, enquanto às barras 11, 12 e 13, serão incrementados 2,5% de suas potências. Todas essas barras sofrerão monitoração de tensão.

Figura 25 – Seleção das Barras para Monitoração de Tensão para o Sistema IEEE 14 Barras no ANAREDE (AUTOR, 2014)

Para o Incremento de carga, serão criados dois conjuntos, o primeiro contendo as barras 9,10 e 14, onde o incremento será de 5%, e outro grupo contendo as barras 11, 12 e 13 onde o incremento será de 2,5%.

Dessa forma para as barras 9, 10 e 14 foi realizado o seguinte incremento de carga pelo ANAREDE:

Figura 26 – Seleção das Barras 9, 10 e 14 para Incremento de 5% da Carga para o Sistema IEEE 14 Barras no ANAREDE

Enquanto que para as barras 11, 12 e 13 foi realizado o seguinte incremento de carga pelo ANAREDE:

Figura 27 – Seleção das Barras 11, 12 e 13 para Incremento de 2,5% da Carga para o Sistema IEEE 14 Barras no ANAREDE

Após a inserção destes dados o programa de fluxo de potência do ANAREDE está pronto para ser executado.

2.2.2 Execução e Curva PV para o Sistema IEEE de Quatorze Barras sem Banco Shunt Adicionais

Esse caso será considerado como o caso de estado normal do sistema proposto.

Com os parâmetros adotados e expostos no item 4.2.1 torna-se possível executar o fluxo de potência continuado no ANAREDE e, através do PLOT CEPEL, traçar as curvas PV para as barras escolhidas.

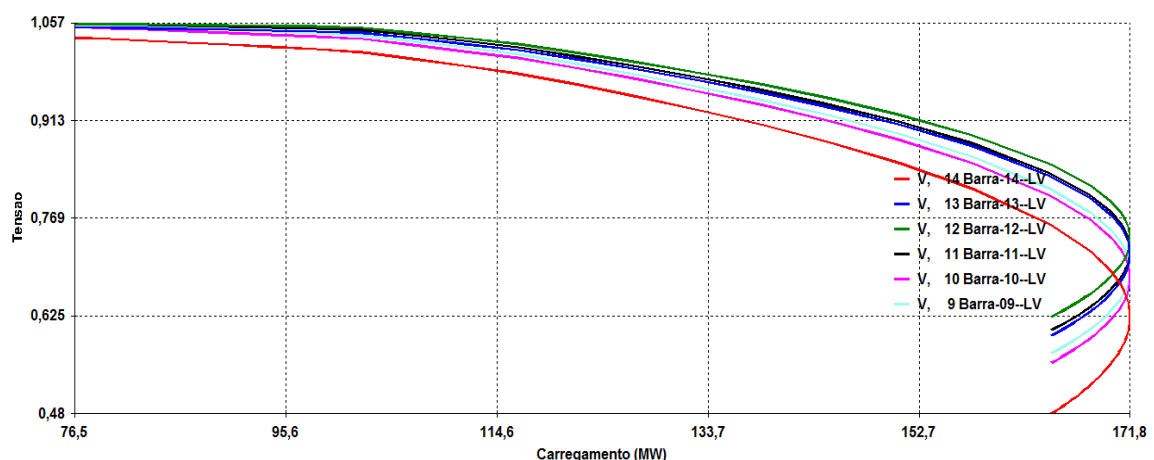


Figura 28 – Curva PV no PLOT CEPEL para o Sistema IEEE 14 Barras sem Bancos Shunt

Adicionais

Com essa curva PV pode-se observar, por exemplo, que a barra onde ocorre o colapso de tensão com menor nível de tensão é a barra 14, precedidas pelas barras 10, 9, 13, 11 e 12.

Sabendo disso pode-se utilizar de artifícios que venham a melhorar o ponto de colapso para essas barras, mas antes é interessante ver como o sistema se comporta sem o banco shunt da barra 9, simulando uma falha no banco.

2.2.3 Execução e Curva PV para o Sistema IEEE de Quatorze Barras sem o Banco Shunt da Barra 9

Excluindo o banco shunt da barra 9 e executando o programa de fluxo de potência continuado seguintes parâmetros expostos no item 4.2.1 é possível traçar a curva PV para as barras PQ.

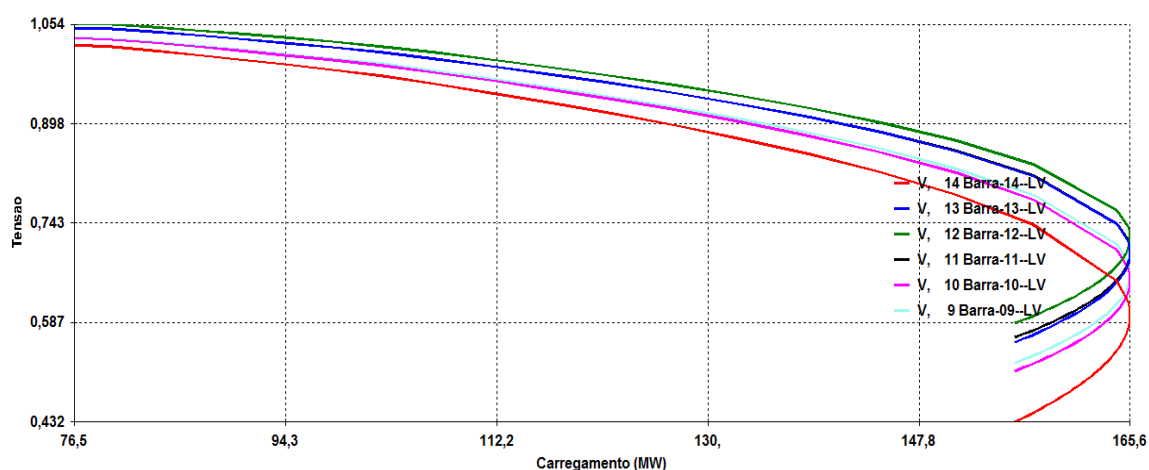


Figura 29 – Curva PV no PLOT CEPEL para o Sistema IEEE 14 Barras com Exclusão do Banco Shunt da barra 9

É possível notar que, com a exclusão do banco de capacitores da barra 9, todas as barras PQ irão ter seus pontos de colapso de tensão deslocados para valores de menor tensão na barra e menor transferência de potência. Porém, observa-se, também que a disposição referente ao maior nível de tensão em que cada barra entra em colapso continua a mesma.

A partir de agora torna-se interessante estudar o comportamento do sistema quando se aplicam adições de bancos shunt capacitivos e indutivos.

2.2.4 Execução e Curva PV para o Sistema IEEE de Quatorze Barras com Banco Shunt Indutivo

Os bancos indutivos shunt serão considerados tanto como banco de reatores como uma modificação na carga de alguma barra como a diminuição do seu fator de potência tornando-o mais indutivo.

Com isso foi proposto a adição de bancos indutivos nas barras 9, 10 e 14 que são as barras com pontos de colapso mais baixos, ou seja, onde ocorre o colapso com menor tensão.

Logo, será adicionado a estas 3 barras um banco de 5MVAR. Com isso, executando o fluxo de potência continuado pelo ANAREDE e traçando as curvas PV com auxílio do PLOT CEPEL são obtidas as seguintes curvas:

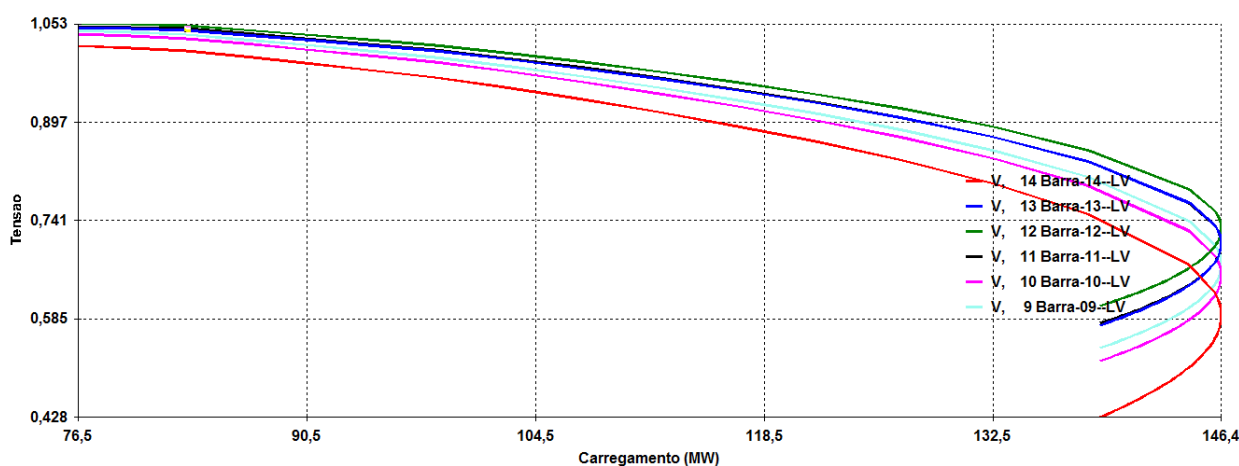


Figura 30 – Curva PV no PLOT CEPEL para o Sistema IEEE 14 Barras com Adição de Banco Indutivo Shunt nas Barras 9, 10 e 14 (AUTOR, 2014)

Fica visível que com a adição de bancos indutivos shunt todas as curvas se deslocam aproximando os pontos de colapso dos eixos, como os conceitos do item 2 apontavam.

É interessante observar também que a curva da barra 11 passa a se comportar praticamente de forma idêntica a curva da barra 13.

Porém, ainda é notável que com a adição desses bancos indutivos todas as barras sofrerão deslocamento de seus pontos de colapso de tensão o que mostra que bancos indutivos ou aumento de carga indutiva prejudica a estabilidade do sistema quando se trata de tensão nas barras consumidoras.

2.2.5 Execução e Curva PV para o Sistema IEEE de Quatorze Barras com Banco Shunt Capacitivo

Considerando os bancos capacitivos como bancos de capacitores ou um aumento de carga reativa capacitiva na carga de alguma barra fazendo com que seu fator de potência diminua se tornando mais capacitivo, propõe-se que de forma análoga ao item anterior sejam adicionados bancos de 5MVAR nas barras 9, 10 e 14 do sistema.

Executando o fluxo de potência contínuo pelo ANAREDE para essas condições e configurações expostas no item 2 e traçando as curvas PV com auxílio do PLOT CEPEL obtém-se:

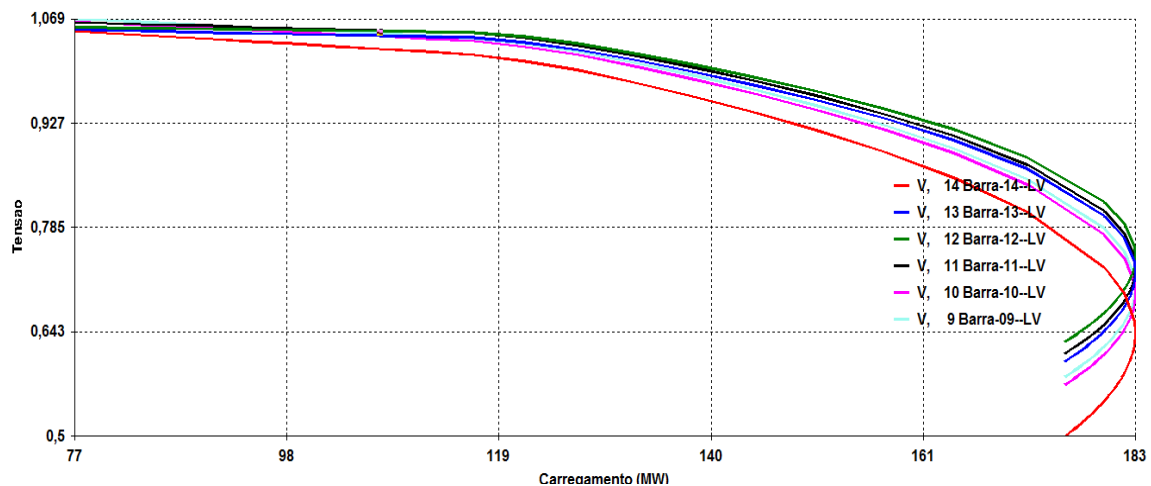


Figura 31 – Curva PV no PLOT CEPEL para o Sistema IEEE 14 Barras com Adição de Banco Capacitivo Shunt nas Barras 9, 10 e 14 (AUTOR, 2014)

Com essa curva é possível notar que o ponto de colapso de tensão se desloca para todas as curvas e que eles se afastam de ambos os eixos quando comparamos ao caso normal de execução do fluxo de potência contínuo para esse sistema.

2.2.6 Execução e Curva PV para o Sistema IEEE com Perda de Linha

Ainda seguindo no estudo das barras 9, 10, 11, 12, 13 e 14 definiu a estratégia de adicionar uma linha que ligasse as barras 1 e 5, com a mesma impedância da linha já existente, ou seja, realizar a duplicação da linha com a intenção de diminuir o valor total da impedância que liga uma barra a outra.

Através desse artifício e utilizando os mesmos parâmetros expostos no item 4.2.1 e com a execução do programa de fluxo contínuo do ANAREDE se pôde obter a curva PV com o PLOT CEPEL.

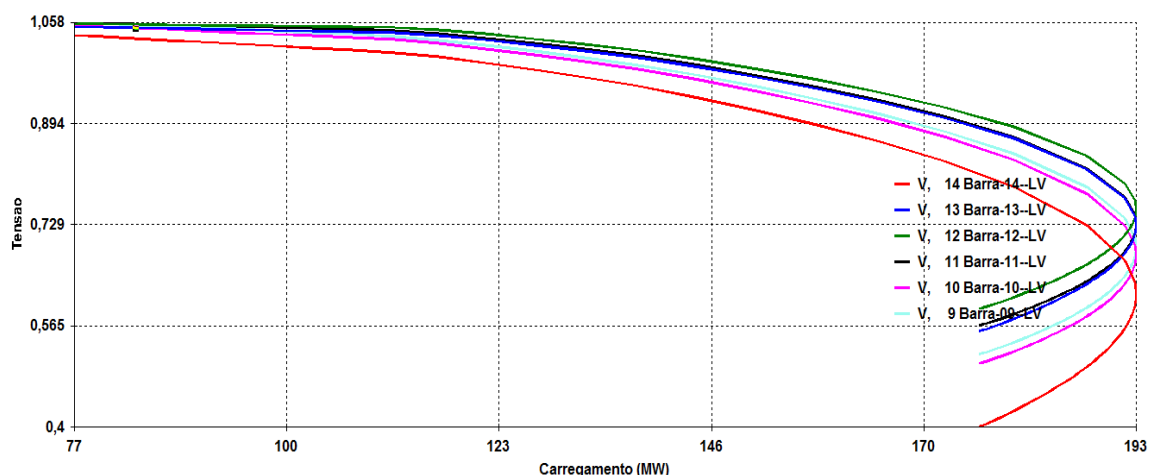


Figura 32 – Curva PV no PLOT CEPEL para o Sistema IEEE 14 Barras com Adição de Linha Ligando a Barra 1 à Barra 5

Nessa curva, observa-se que houve deslocamento do ponto de colapso de tensão para as barras quando comparado ao caso normal, onde os pontos ficaram mais distantes do eixo, ou seja, a tanto tensão quanto potência aumentaram de forma que a capacidade do sistema foi aumentada.

REFERÊNCIAS

- [1] STEINMETZ, C. P. Power control and stability of electrical generating stations. AIEE Transaction, v. 39, p. 1215-1287, jul. 1920.
- [2] AIEE SUBCOMMITTEE ON INTERCONNECTIONS AND STABILITY FACTORS. First report of power system stability. AIEE Transaction, p. 51-80, 1926.
- [3] IEEE/CIGRE JOINT TASK FORCE ON STABILITY TERMS AND DEFINITIONS. Definition and Classification of Power system stability. IEEE Transactions on Power Systems, v. 19, n. 2, p. 1387-1401, maio. 2004.
- [4] GUEDES, R. B. L. Aplicação de métodos estáticos para estudo de colapso de tensão em sistemas elétricos de potência. 2000. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), EESC-USP, São Carlos, 2000.
- [5] TAYLOR, C. Power system voltage stability. New York: McGraw Hill, 1994.
- [6] MORISON, K; WANG, L; KUNDUR, P. Power systems security assessment. IEEE: Power&Energy Magazine, out. 2004.
- [7] CASTRO JR., A. C. L. Estudo de controle preventivo para a análise do colapso de tensão. 2009. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - EESC-USP, São Carlos, 2009.

- [8] SANTOS, C. J. R. Método rápido para avaliação de margem de estabilidade de tensão considerando o limite de potência reativa dos geradores. 2008.119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – EESC-USP, São Carlos, 2009.
- [9] CHIANG, H. D.; WANG, C. S.; FLUECK, A. J.; Look Ahead voltage and look margin contingency selection for large scale power systems. IEEE Transaction on Power Systems, v. 12, n. 1, fev. 1997.
- [10] KUNDUR, P. Power system stability and control. Toronto, McGraw-Hill, 1994.
- [11] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO Diretrizes e critérios para estudos elétricos, procedimentos de rede, sub-módulo 23.3. Disponível em: <www.ons.org.br>.
- [12] FORÇA TAREFA DE ESTABILIDADE DE TENSÃO Critérios e procedimentos de estabilidade de tensão para planejamento do sistema elétrico brasileiro. VII SEPOPE, Simpósio de Especialista em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Curitiba, 21- 26 Maio, 2000.
- [13] JUSTI, A. N.; MAZZA, F. D.; FOGAÇA, L. R.; Análise estática do ponto de colapso de tensão através do método do fluxo de potência continuado. 2014. 80f. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) – UTFPR, Curitiba, 2014.
- [14] MONTICELLI, A. J. Fluxo de carga em redes de energia elétrica. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1983.
- [15] FERRAZ, J. C. R.; MARTINS, N.; PINTO, H. J. C. P.; FALCÃO, D. M.; Fluxo de potência continuado e análise modal e melhoria da estabilidade de tensão do sistema sul-sudeste. VII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, 21 a 26 de maio de 2000.
- [16] VAM CUTSEM, T. Voltage stability of power systems. Inglaterra: Kluwer Academics Publishers, 1998.
- [17] KRAUER, T. R. O. Uma metodologia de análise de sistemas de potência aplicando o continuado QV e PV no ambiente de planejamento de sistemas elétricos. 2007. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
- [18] CEPEL. Manual do Usuário do ANAREDE Rio de Janeiro: DRE 2013 342p.