



**XXI SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO - IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA- GAT

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA AUTOMÁTICA PARA A DETERMINAÇÃO DA MÁXIMA
TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA ENTRE ÁREAS/REGIÕES EM REGIME PERMANENTE**

Ricardo M. Henriques(*)
CEPEL

João A. Passos Filho
UFJF

Flávio R. de Miranda Alves
CEPEL

Lucas B. Barbosa
DECEA

Carlos Henrique C. Guimarães
UFF

Felipe de C. B. Almeida
UFJF

RESUMO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) pode ser dividido em quatro grandes subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Norte e Nordeste. No final da década de 90, a interligação de dois destes subsistemas, chamada interligação Norte-Sul, trouxe como uma das principais vantagens a eficiência na utilização da água acumulada nos reservatórios para geração de energia elétrica. Gerar energia elétrica em uma região onde os reservatórios se encontram em plena capacidade e transmiti-la para outra região onde ocorre déficit de chuvas resulta na utilização ótima dos recursos energéticos e também na redução nos custos de operação. Atualmente, os limites de intercâmbio entre regiões são calculados a partir de uma variedade de estudos, utilizando ferramentas computacionais que simulam o comportamento do sistema elétrico em diversos cenários de carga e geração. Este trabalho descreve a implementação de uma nova funcionalidade no Programa ANAREDE que tem como objetivo principal auxiliar no cálculo dos valores máximos de intercâmbio de potência ativa entre duas regiões ou entre dois conjuntos de barras quaisquer em regime permanente.

PALAVRAS-CHAVE

Transferência de Potência, Fluxo de Potência, Segurança, Estudos Elétricos, Planejamento da Operação

1.0 - INTRODUÇÃO

O crescimento dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) em tamanho e complexidade devido ao aumento da demanda de energia elétrica e à necessidade de maior confiabilidade dos mesmos, aliado à necessidade de redução de custos, resultou em uma interligação cada vez maior entre sistemas de geração já existentes. Os

(*) Av. Horácio de Macedo, 354 – sl. 236 – Cidade Universitária – CEP 21.941-911 – Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Tel: (+55 21) 2598-6235 – Fax: (+55 21) 2598-6451 – Email: rmh@cepel.br

sistemas interligados são vantajosos na medida em que permitem ganhos energéticos (maior energia firme) através da coordenação da operação hidrotérmica, o que garante melhor aproveitamento hidrológico entre as bacias existentes, controle de frequência quando da perda súbita de geração, socorro mútuo entre os subsistemas e compra e venda de energia entre eles.

Com o aumento destas interligações, a operação coordenada do sistema torna-se bastante complexa e os riscos de blecautes aumentam significativamente, exigindo um planejamento detalhado de suas condições de operação para que o desempenho alcançado seja compatível com os requisitos de qualidade e segurança. Adicionalmente, tornam-se necessários para sua operação conhecimentos pormenorizados de sua proteção, limites operacionais e dos limites de transferência de potência entre regiões. Portanto, é essencial o desenvolvimento de ferramentas computacionais avançadas que facilitem análises rápidas das condições de regime permanente, segurança de tensão e estabilidade eletromecânica (1,2,3).

A capacidade de transferência de potência de um SEP indica o máximo intercâmbio de potência ativa entre suas diferentes áreas sem que a segurança seja comprometida. Esta informação é de grande importância tanto na fase do planejamento da expansão quanto na fase de operação. No tocante ao planejamento da expansão é fundamental o conhecimento de pontos críticos da rede, indicando áreas onde são necessários reforços no sistema de transmissão. No que diz respeito à operação, não devem ser utilizados valores de intercâmbio que excedam os limites previamente avaliados, evitando assim a operação em situações inseguras (3).

No Sistema Interligado Nacional (SIN) existem instalações de transmissão nas quais é realizada a troca de energia entre as bacias hidrográficas de diversas regiões. Nesse contexto, a avaliação do desempenho das interligações inter-regionais é de fundamental importância, principalmente no tocante à determinação dos limites elétricos de intercâmbio, uma vez que esses podem significar uma restrição ativa no âmbito dos estudos energéticos (1,2).

Atualmente, o cálculo dos limites elétricos de intercâmbio consiste em um processo manual de aumento sistemático dos intercâmbios de forma a estressar ao máximo o fluxo de potência nos circuitos envolvidos até que determinados critérios de segurança pré-definidos para a operação sejam violados. Dependendo das dimensões do sistema analisado, do número de cenários, dos patamares de carga considerados e horizontes envolvidos, essa tarefa pode demandar grandes esforços da equipe de estudos até que todos os pontos de operação sejam devidamente avaliados (1,2).

Este trabalho descreve o desenvolvimento e implementação de uma nova funcionalidade no Programa de Análise de Redes (ANAREDE) (4), desenvolvido pelo CEPEL, que tem como principal objetivo auxiliar no cálculo dos valores máximos de intercâmbio de potência ativa entre duas regiões ou entre dois conjuntos de barras (denominados regiões importadora e exportadora) do ponto de vista de regime permanente. O objetivo é alcançado através da transferência de geração entre as regiões, de forma gradual e automática. A cada passo de transferência é calculada a solução do fluxo de potência do sistema e um novo estado da rede é obtido. Este processo continua até a ocorrência de um dos critérios de parada previamente estabelecidos. O artigo descreve as premissas básicas utilizadas na implementação desta funcionalidade e apresenta resultados para alguns casos-teste.

2.0 - METODOLOGIA PROPOSTA PARA CÁLCULO DA TRANSFERÊNCIA DE GERAÇÃO

O alcance da máxima transferência de potência entre duas regiões em regime permanente se dá a partir da definição das barras pertencentes à região exportadora, assim como aquelas pertencentes à região importadora. Define-se região exportadora como o conjunto de barras de geração, modeladas em programas de fluxo de potência como barras do tipo PV, que terão um acréscimo de geração, com o objetivo de exportar potência ativa para outra região. A região importadora é definida pelo conjunto de barras que terão uma redução de geração, com o objetivo de importar potência de outra região. A barra de referência, modelada como barra do tipo V θ , também é uma barra de geração e poderá pertencer a qualquer uma das regiões, participando da transferência de geração, embora a redução ou o aumento de potência ativa injetada nesta barra seja realizado indiretamente através do desbalanço causado nas demais barras pertencentes à sua região e também do acréscimo ou redução das perdas no sistema.

A Figura 1 mostra uma representação esquemática simplificada das regiões exportadora e importadora e os sentidos da transferência de geração e do fluxo de potência ativa resultante desta transferência.

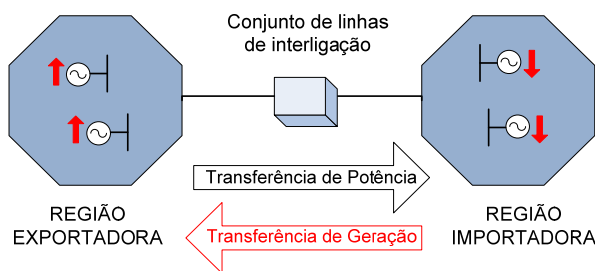


Figura 1 – Representação das regiões exportadora e importadora

A Figura 2 representa, de maneira bastante simplificada, o fluxograma da metodologia proposta. A entrada de dados é composta pela seleção das barras pertencentes a cada região e pela escolha do passo de transferência (*PSSO*) e também do montante de geração da região importadora que se deseja transferir para a região exportadora (*PMTG*). As duas variáveis citadas anteriormente devem ser fornecidas em valores percentuais. O cálculo do montante de geração que se deseja efetivamente transferir (*PGTR*) é dado pela equação (1)

$$PGTR = PMTG * PGIMP_0 \quad (1)$$

onde *PGIMP_0* representa a potência total inicial gerada na região importadora.

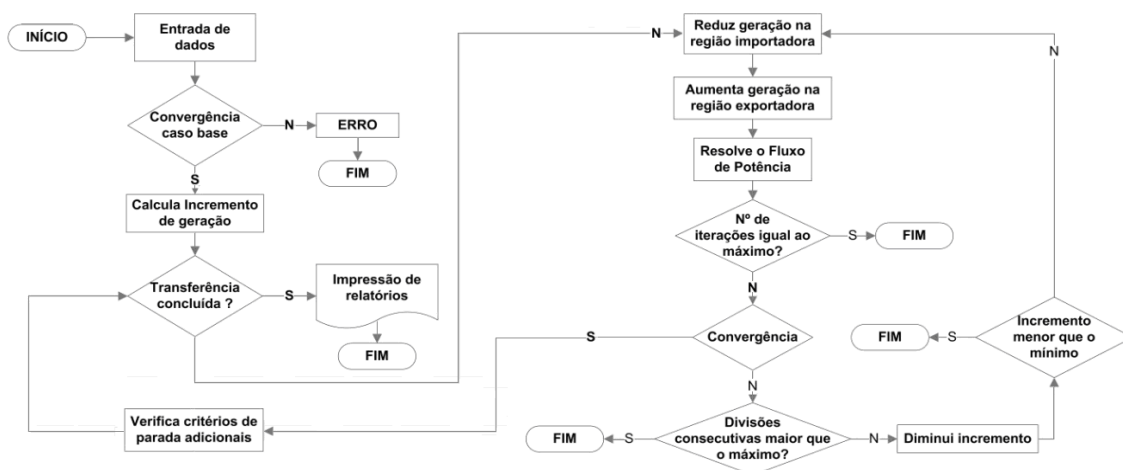


Figura 2 – Fluxograma simplificado da metodologia proposta de determinação dos limites de transferência

A execução do processo de transferência de geração é realizada somente se o caso base de estudo estiver convergido, etapa que é realizada após a entrada de dados. O passo de transferência é utilizado para determinar o incremento de geração (*INCTG*), que especifica o quanto de geração será transferida a cada iteração. O valor do incremento de geração a cada passo do processo de transferência de potência é calculado conforme a equação (2).

$$INCTG = PGTR * PSSO \quad (2)$$

Calculado o incremento de geração, as barras selecionadas na entrada de dados têm suas potências geradas aumentadas ou reduzidas, de acordo com a região definida. A cada transferência do incremento de geração, o fluxo de potência é executado e um novo estado da rede é obtido.

É importante ressaltar que em ambas as regiões, o aumento ou diminuição da geração de potência ativa em cada uma das barras de geração obedecerá ao chamado fator de participação (*FPART*), que no programa ANAREDE é definido através do Código de Execução DGER (4).

Também é importante destacar que estes fatores de participação podem definir critérios adicionais para o processo de transferência de potência entre as regiões importadora e exportadora. Podem determinar, por exemplo, que a geração de duas usinas cresça ou diminua de forma igual ou diferenciada. Se os fatores de participação de todas as barras geradoras pertencentes a uma dada região (importadora ou exportadora) não forem definidos pelo usuário, valores particulares de cada máquina *i* da região em questão são calculados, conforme as condições 1 e 2 definidas a seguir.

Condição 1:

Caso seja definido o limite mínimo de geração de potência ativa (P_{min}) para as barras associadas à região importadora e o limite máximo (P_{max}) para aquelas pertencentes à região exportadora, os fatores de participação serão calculados conforme a equação (3).

$$\begin{aligned}
 \text{Região importadora} \quad FPART^{(i)} &= \frac{Pg_0^{(i)} - P_{min}^{(i)}}{\sum_{i=1}^{NBIMP} (Pg_0 - P_{min}_i)} \cdot 100\% \\
 \text{Região exportadora} \quad FPART^{(i)} &= \frac{P_{max}^{(i)} - Pg_0^{(i)}}{\sum_{i=1}^{NBEXP} (P_{max}_i - Pg_0_i)} \cdot 100\%
 \end{aligned} \quad (3)$$

Condição 2:

Basta o limite mínimo de uma das máquinas pertencentes à região importadora não estar definido ou o limite máximo de uma das máquinas pertencentes à região exportadora, para que os fatores de participação sejam calculados a partir das potências geradas no caso base, conforme a equação (4).

$$\begin{aligned}
 \text{Região importadora} \quad FPART^{(i)} &= \frac{Pg_0^{(i)}}{\sum_{i=1}^{NBIMP} Pg_0_i} \cdot 100\% \\
 \text{Região exportadora} \quad FPART^{(i)} &= \frac{Pg_0^{(i)}}{\sum_{i=1}^{NBEXP} Pg_0_i} \cdot 100\%
 \end{aligned} \quad (4)$$

Além disso, o algoritmo possui uma lógica para o caso de o fluxo de potência divergir ou não convergir para uma dada iteração. Nestas condições, o último caso convergido é restabelecido e um novo incremento de geração, menor que o utilizado até então, é aplicado, conforme a equação (5)

$$INCTG^{(novo)} = \frac{INCTG^{(antigo)}}{FDIV} \quad (5)$$

onde $FDIV$ é uma constante que define o fator de redução do incremento.

O processo de transferência de geração é repetido até que um dos critérios de parada seja atendido. Foram definidos quatro critérios de parada convencionais e dois opcionais.

Critérios de parada convencionais:

- Quando o número máximo de problemas de fluxo de potência resolvidos é atingido ($ICIT$);
- Quando a transferência de geração da região importadora para a exportadora for completada;
- Quando o incremento de geração é menor que um incremento mínimo especificado ($ICMN$);
- Quando o fluxo de potência não apresentar solução, consecutivamente, mais vezes do que um número especificado ($DMAX$).

Critérios de parada opcionais:

- Quando ocorrer violação de tensão em pelo menos uma barra do sistema ou naquelas previamente especificadas para monitoração no Código de Execução $DMTE$ (4).
- Quando ocorrer violação de fluxo (MVA) em pelo menos um circuito do sistema ou naqueles previamente especificados para monitoração no Código de Execução $DMFL$ (4).

3.0 - DESENVOLVIMENTO NO PROGRAMA ANAREDE

O objetivo da entrada de dados no Programa ANAREDE é permitir que o usuário selecione, de acordo com seus interesses, as barras de geração associadas à região importadora e àquelas relacionadas à região exportadora de potência ativa. A entrada de dados foi desenvolvida criando-se o Código de Execução $DTGR$. O formato dos dados de entrada é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Formato da entrada de dados do Código de Execução $DTGR$

Campo	Colunas	Descrição
Operação	01 – 04	IMPO – seleção das barras importadoras EXPO – seleção das barras exportadoras
Linguagem de Seleção	06 – 54	Identifica quais barras pertencem à região definida no campo operação.

O formato da Linguagem de Seleção mencionado na Tabela 1 encontra-se em (4). A Figura 3 mostra um exemplo de utilização do Código de Execução $DTGR$, onde todas as barras de geração da área 1, com exceção da barra 3, pertencerão à região importadora. E a região exportadora será definida por todas as barras de geração da área 2.

```

DTGR
(op) (tp) (no ) C (tp) (no ) C (tp) (no ) C (tp) (no )
IMPO AREA 1 X BARR 3
EXPO AREA 2
99999

```

Figura 3 – Exemplo de utilização do Código de Execução $DTGR$

A partir dos dados de entrada foi desenvolvido adicionalmente o Código de Execução EXTG, que tem o objetivo de realizar a transferência da geração de potência ativa da região importadora para a região exportadora. Sendo assim, as barras definidas no Código de Execução DTGR como exportadoras assumirão potências de geração maiores que no início do processo, assim como àquelas definidas como importadoras assumirão potências de geração menores. Antes do início do processo e exatamente após a inserção do Código de Execução EXTG, é exigido que o usuário defina o passo de transferência e também o montante de geração da região importadora que será transferido para a região exportadora. O formato correspondente a esta entrada de dados é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Formato da entrada de dados do Código de Execução EXTG

Campo	Colunas	Descrição
Passo de transferência	01 – 05	Valor do passo de transferência, em %. É utilizado para determinar o incremento de geração.
Potência gerada que se deseja transferir	07 – 11	Informa o quanto de geração que se deseja transferir da região importadora para a região exportadora, em %, em função da potência total gerada na região importadora.

A Figura 4 mostra um exemplo de utilização do Código de Execução EXTG, sendo 2% o tamanho do passo de transferência e 60% o montante de geração da região importadora que será transferido para a região exportadora.

```
EXTG
(Psso (%Pmx
2      60
```

Figura 4 – Exemplo de utilização do Código de Execução EXTG

O Código de Execução EXTG pode ser complementado com algumas Opções de Execução. As Opções relativas à violação de limites estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Opções de Execução relativas à violação de limites associadas ao Código de Execução EXTG

Opção	Descrição
MOCT/ MOST	A cada iteração é feita a monitoração de tensão de todas as barras do sistema (MOCT) ou somente naquelas especificadas no Código de Execução DMTE [4] (MOST). A utilização de uma destas Opções de Execução define um dos critérios de parada opcionais.
MOCF/ MOSF	A cada iteração é feita a monitoração do fluxo de potência em MVA de todos os circuitos do sistema (MOCF) ou somente naqueles especificados no Código de Execução DMFL [4] (MOSF). A utilização de uma destas Opções de Execução define um dos critérios de parada opcionais.
FLEX	Quando utilizada em conjunto com uma das Opções de Execução citadas anteriormente, tem o objetivo de ignorar as violações de tensão/fluxo contidas no caso base. Assim o critério opcional é atendido quando ocorrer uma ou mais violações de tensão/fluxo diferentes daquelas apresentadas no caso base.

A partir da seleção das barras importadoras e exportadoras de potência é possível exibir um relatório contendo informações referentes às barras de geração de cada região. O Código de Execução RELA (4) é responsável pela emissão dos relatórios de saída. As Opções de Execução desenvolvidas para o Código de Execução RELA são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Opções de Execução desenvolvidas associadas ao Código de Execução RELA

Opção	Descrição
RTGR	Exibe o relatório de barras de geração utilizadas no processo de transferência de geração. A saída de dados é dividida em duas etapas. Na primeira, são exibidas informações referentes à região importadora e na segunda etapa informações referentes à região exportadora.
IMPO	Utilizada em conjunto com a Opção de Execução RTGR, restringe o relatório de saída às barras de geração pertencentes à região importadora.
EXPO	Utilizada em conjunto com a Opção de Execução RTGR, restringe o relatório de saída às barras de geração pertencentes à região exportadora.

A determinação da máxima transferência de potência entre regiões baseia-se na transferência de geração entre elas. Essa transferência é realizada de forma gradual, a partir de um incremento de geração. A cada iteração, a ferramenta desenvolvida exibe um relatório simplificado do processo de transferência, contendo o número da iteração realizada, estado da convergência na iteração (convergente/não convergente/divergente), geração transferida (em percentual do total de potência ativa da região importadora) e geração transferida em MW. Para permitir o acesso do usuário aos casos referentes a cada patamar de geração, o programa cria de forma automática um ou mais arquivos históricos binários padrão ANAREDE (extensão .SAV) com o objetivo de armazenar todos os casos convergentes.

Como forma adicional de saída de dados, a ferramenta desenvolvida cria um arquivo denominado CURVAS.PLT. Este arquivo armazena dados das barras referentes a cada patamar de geração transferida onde, através do programa PlotCEPEL (5), é possível visualizar as curvas correspondentes a cada dado. Dentre as grandezas que podem ser visualizadas estão tensão (p.u.) e as potências ativa e reativa geradas (MW/Mvar).

4.0 - REGIÕES DE SEGURANÇA ESTÁTICA

A Região de Segurança Estática (RSE) é uma poderosa ferramenta para avaliação da segurança de um SEP, utilizando-se critérios de regime permanente. De uma forma resumida, trata-se de um gráfico tridimensional que demonstra toda a região de operação segura de um sistema submetido a uma divisão em três grupos de geração,

conforme ilustrado na Figura 5a. A região de operação segura é delimitada por uma fronteira a partir da qual é caracterizada a violação de um ou mais limites de segurança, tais como limites de tensão nas barras e limites das linhas de transmissão. Costuma-se representar este gráfico de três dimensões sob forma de nomogramas dos planos que o compõe, a fim de facilitar a análise gráfica. A Figura 5b ilustra, por exemplo, o plano $G2 \times G3$ do gráfico tridimensional apresentado na Figura 5a.

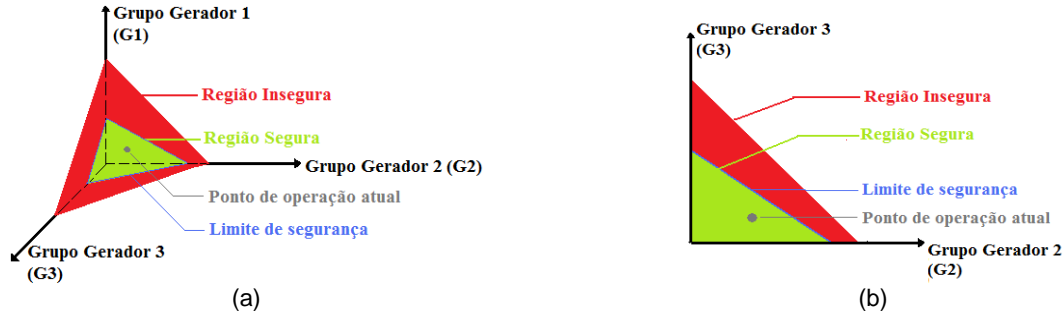


Figura 5 – Região de Segurança Estática

A ferramenta de cálculo da máxima transferência de potência entre regiões é a base da construção das RSE's. Desta forma, para obter os limites de segurança, utiliza-se o cálculo da máxima transferência de potência entre os três grupos, tomados dois a dois, conforme exemplificado na Figura 6a para uma situação do processo de construção ilustrado na Figura 6b.

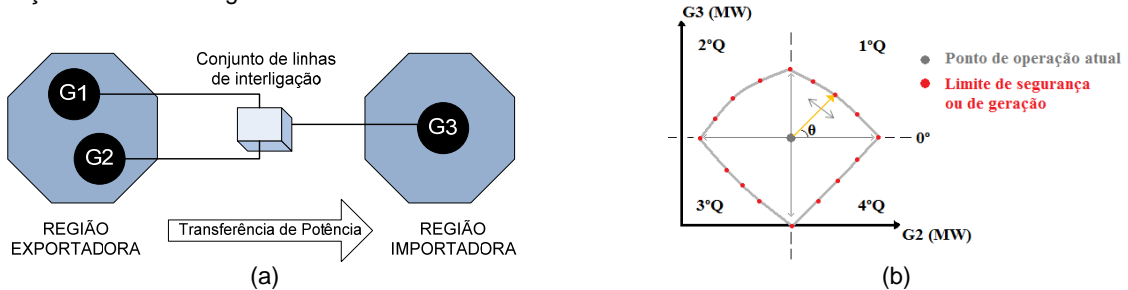


Figura 6 – Definição das Regiões Exportadora e Importadora na construção da SER

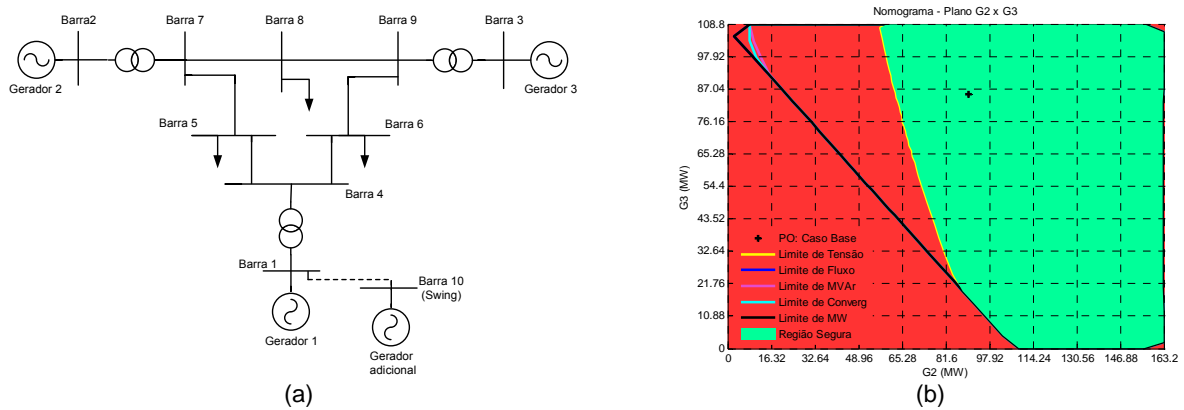


Figura 7 – Exemplo de utilização da RSE

A Figura 7b mostra a RSE obtida para um ponto de operação do sistema de 9-barras, mostrado na Figura 7a (6). Esta RSE foi obtida a partir da utilização da ferramenta proposta neste artigo. A análise da RSE é realizada mediante inspeção dos nomogramas que a compõem. Toda a área verde é a região segura de operação do sistema e sempre será delimitada, evidentemente, pelas curvas indicativas dos limites de segurança mais restritivos, construídas ao longo do processo (ver legenda Figura 7b). O ponto de operação do sistema pode excursionar por toda a região segura, o que significa que a carga pode ser suprida por diferentes combinações de despacho dos grupos geradores com a garantia de que serão respeitados os limites de segurança monitorados com a rede completa ou em contingência (lista de contingências mais severas).

5.0 - RESULTADOS

A seguir são apresentados dois casos de estudo. O primeiro caso tem o objetivo de validar os resultados da ferramenta computacional, utilizando um programa de fluxo de potência ótimo para o cálculo da máxima transferência de potência entre as duas regiões estabelecidas. O programa FLUPOT, desenvolvido pelo CEPEL, foi

escolhido para esta validação. O segundo caso representa o sistema brasileiro, no qual se faz o estudo do máximo intercâmbio de potência ativa em regime permanente entre os sistemas Acre – Rondônia (AC – RO) e o SIN.

5.1 IEEE 14 barras

Foram definidas as regiões exportadora e importadora de potência, conforme a Figura 8. Para o caso base, na região importadora estão os geradores nas barras 1 (234,1 MW), 2 (40,0 MW) e 3 (0 MW), e na região exportadora estão os geradores nas barras 6 e 8, ambos gerando 0 MW. Como a barra 3 faz parte da região importadora e sua geração no caso base é nula, não há possibilidade de redução do valor gerado e portanto a mesma não será selecionada para a transferência de potência entre as áreas. Assim os geradores que representam a área importadora estão nas barras 1 e 2, e na área exportadora estão nas barras 6 e 8.

Para obtenção da máxima transferência de potência entre as duas áreas, primeiramente foi executado um fluxo de potência ótimo (FPO) utilizando o programa FLUPOT (7) com a função objetivo de máxima transferência (MXTR). Nota-se pela Figura 8 que o intercâmbio de potência ativa da região exportadora para a região importadora dá-se pelo somatório dos fluxos que chegam às barras 5 e 4, através dos circuitos 6 – 5, 9 – 4 e 7 – 4, representados pelos 3 transformadores. As tolerâncias de convergência de erro de potência ativa e reativa utilizadas foram, respectivamente, 0,1 MW e 0,1 Mvar. Violações de tensão nas barras e de fluxo nas linhas foram utilizadas como critérios de parada na determinação do máximo intercâmbio de potência ativa. As restrições ativas para o resultado apresentado na Tabela 5 e Tabela 6 foram o fluxo de potência na linha 8 – 7 (50 MVA) e na linha 6 – 11 (25 MVA).

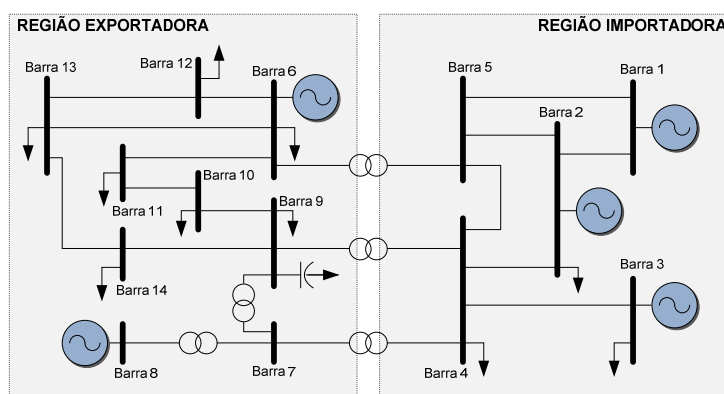


Figura 8 – Regiões exportadora e importadora do sistema IEEE 14 Barras

Tabela 5 – Comparação entre as potências de geração obtidas para o sistema IEEE 14 Barras

Barra	Pg (MW)	
	ANAREDE (EXTG)	FLUPOT (MXTR)
Barra – 1	56,8	56,5
Barra – 2	37,0	37,0
Barra – 6	122,1	122,3
Barra – 8	49,2	49,3
Pot. transferida – ANAREDE (EXTG) – MW		171,3
Pot. transferida – FLUPOT (MXTR) – MW		171,6

Tabela 6 – Comparação entre os limites de intercâmbio encontrados referentes ao sistema IEEE 14 Barras

Circuito	Pot. que chega às barras 5 e 4 (MW)	
	ANAREDE (EXTG)	FLUPOT (MXTR)
6 – 5	49,2	49,4
9 – 4	5,4	5,5
7 – 4	26,7	26,7
Máximo Intercâmbio encontrado (MW)	81,3	81,6

Após a execução do FLUPOT, iniciou-se a preparação dos dados para execução da nova funcionalidade EXTG no programa ANAREDE. No intuito de se obter a mesma solução apresentada pelo programa FLUPOT, são calculados os fatores de participação das barras utilizadas no processo de transferência a partir do ponto de operação referente ao intercâmbio máximo encontrado pelo programa de otimização. Estes fatores determinam a proporção do aumento/diminuição absorvido em cada gerador. Os fatores para os geradores 1, 2, 6 e 8 são, respectivamente, 0,9825, 0,0175, 0,7127 e 0,2873. Com base na Tabela 1 é então montado o Código de Execução DTGR e em seguida executado o Código de Execução EXTG, com passo de 0,2% e potência máxima de 63%. As Opções de Execução MOCT e MOCF acompanham o Código de Execução EXTG para garantir que não haja violações de tensão e fluxo no processo de transferência de geração. As tolerâncias de convergência de erro de potência ativa e reativa utilizadas no ANAREDE foram, respectivamente, 0,1 MW e 0,1 Mvar. Às demais constantes FDIV, ICIT, ICMN e DMAX relativas a execução da transferência foram atribuídos os valores 2, 500, 0,05 e 5 respectivamente. Os resultados apresentados na Tabela 5 e Tabela 6 são bastante próximos àqueles encontrados pelo programa de otimização.

5.2 Sistema Brasileiro de 4143 Barras

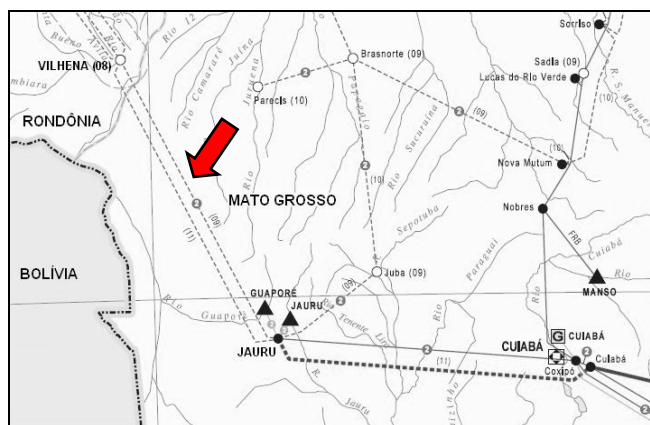


Figura 9 – Localização da linha de transmissão Jauru – Vilhena de 230 kV no mapa do Brasil

O sistema em questão refere-se a um caso do planejamento quadrimestral relativo a Agosto de 2009 em carga média. O estudo deste caso tem o objetivo de identificar a máxima transferência de potência ativa entre os sistemas AC – RO e o restante do SIN. Contudo, é importante destacar que a principal finalidade da avaliação deste sistema restringe-se à validação da ferramenta desenvolvida e não uma avaliação sistêmica, que deve ser objetivo de estudos avançados. Também como um aspecto importante, este estudo objetiva a redução da necessidade de geração térmica, diminuindo os custos totais de operação (8).

Na região importadora, definida pelos sistemas AC – RO, a diminuição da geração será realizada nas barras 6912 e 6913, que correspondem à Usina Termelétrica (UTE) Termonorte II. A Usina Hidrelétrica (UHE) de Ilha Solteira, representada pela barra de número 501, é considerada a referência do SIN e será a responsável pelo aumento de geração, proveniente do desbalanço de potência causado pela redução de geração na região importadora. A linha de transmissão Jauru – Vilhena que faz a interligação entre os dois sistemas é composta por dois circuitos. A Figura 9 mostra uma seção do mapa do Brasil com a localização dessa linha de transmissão de 230kV.

Para a simulação da redução gradual da potência gerada na região importadora utilizou-se o fluxo de potência continuado (FPC) (4), estudo desenvolvido pelo ONS. Foi adicionada em cada uma das barras 6912 e 6913 uma carga fictícia de 2 MW + j1 Mvar. E o aumento gradual de cada uma das cargas nessas barras faz com que as potências líquidas geradas entregues aos sistemas AC – RO sejam diminuídas conforme ocorre este aumento. E o desbalanço de potência causado pelo aumento da carga será compensado pela barra 501, referência do sistema. Identifica-se a barra referente à subestação de Jauru pelo número 4862 e aquela referente à Vilhena pelo número 6800. O limite de intercâmbio é dado pela soma dos fluxos de potência ativa que chegam à barra 6800 através dos dois circuitos da linha Jauru – Vilhena. Após a execução do FPC, foram montados os dados para execução do Código EXTG para obtenção da máxima transferência de potência entre os sistemas AC – RO com o restante do SIN. Os resultados obtidos tanto para execução do FPC quanto para execução do EXTG estão na Tabela 7 e Tabela 8, sendo os resultados idênticos. As tolerâncias de convergência de erro de potência ativa e reativa utilizadas no ANAREDE foram, respectivamente, 1 MW e 1 Mvar. Às demais constantes FDIV, ICIT, ICMN e DMAX relativas a execução da transferência foram atribuídos os valores 2, 500, 0,001 e 5 respectivamente.

Tabela 7 – Comparação entre as potências de geração obtidas para o sistema brasileiro de 4143 barras

Barra	Pg (MW)	
	EXTG	FPC
6912 (UTE)	145,6	145,6
6913 (UTE)	55,6	55,6
501 (UHE)	3271,6	3271,6

Tabela 8 – Comparação entre os limites de intercâmbio referentes ao sistema brasileiro de 4143 barras

Linha	Pot. que chega à barra 6800 (MW)	
	EXTG	FPC
4862 – 6800 circuito 1	133,2	133,2
4862 – 6800 circuito 2	133,2	133,2
Máximo Intercâmbio	266,4	266,4

6.0 - CONCLUSÃO

A exportação de energia entre duas regiões depende de um estudo detalhado para se encontrar a máxima transferência de potência que pode ser alcançada. O desenvolvimento exposto neste trabalho se propôs a elaborar uma ferramenta automática para determinar o máximo intercâmbio de potência ativa entre duas regiões em regime permanente. Os resultados foram bastante satisfatórios nos casos-teste apresentados. A ferramenta desenvolvida mostrou-se confiável, podendo ser de grande valia em estudos de intercâmbio, evitando que o usuário elabore diversos casos em um processo manual longo e dispendioso. A obtenção da máxima transferência de potência ativa também pode ser obtida através de um programa de Fluxo de Potência Ótimo. Contudo, o desenvolvimento desta funcionalidade em um programa de fluxo de potência convencional pode ser útil na validação dos resultados obtidos na otimização, além de também permitir ao engenheiro acompanhar a evolução das tensões e fluxos durante o processo de transferência de geração a cada ponto de operação obtido. Outro ponto de destaque desta implementação é que o seu uso recursivo servirá como base para o desenvolvimento de nomogramas (9) que servirão de auxílio para estudos de análise de segurança estática de um sistema elétrico.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SANTANNA, E.G.S.; SOUZA, A.C.Z.; TAKAHATA, A.Y.; ASSIS, T.M.L.; SCHILLING, M.T.; PASSOS FILHO, J.A.. "Limites de Intercâmbio em Sistemas de Grande Porte via Otimização". In: XVII Congresso Brasileiro de Automática - CBA, 2008, Juiz de Fora. Anais do XVII Congresso Brasileiro de Automática, 2008.
- (2) SANTANNA, E.G.S.; TAKAHATA, A.Y.; SOUZA, A.C.Z.; ASSIS, T.M.L.; PASSOS FILHO, J.A.; SCHILLING, M.T.. "Cálculo de Limites de Intercâmbio em Sistemas de Grande Porte através de Ferramentas de Otimização". In: Symposium Of Specialists In Electric Operational And Expansion Planning, 2009, Belém. Anais do XI SEPOPE, 2009.
- (3) ASSIS, T.M.L.. "Cálculo da Capacidade de Transmissão Dinâmica em Sistemas de Potência através de Ferramentas Integradas e Sistemas Inteligentes". Rio de Janeiro, 2007. 191 f. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- (4) CEPEL. "Programa de Análise de Redes / ANAREDE – Manual do Usuário Versão 09.04.06". Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- (5) CASTRO, A.; QUINTAO, P.E.M.; GOMES JR., S.; MARTINS, N.; PINTO, H.J.C.. "An Integrated Plotting Tool for the Visualization of Results Produced by Multiple Power System Analysis Software". In: IX SEPOPE, 2004, Rio de Janeiro. Proceedings of the IX SEPOPE Conference, 2004.
- (6) ANDERSON, P.M.; FOUAD, A.A.. "Power System Control and Stability". 1 ed. Iowa: The Iowa State University Press, 1977
- (7) CEPEL. "Programa de Fluxo de Potência Ótimo / FLUPOT – Manual do Usuário Versão 07.02.00". Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- (8) Gárdos, I. "O ONS e os Desafios da Operação do SIN. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SETOR ELÉTRICO – Painel de Planejamento e Operação do Sistema Elétrico, 3., 2008, Rio de Janeiro". Apresentação em slides...Rio de Janeiro: 2008. Disponível em <http://www.nuca.ie.ufrj.br/gesel/eventos/seminariointernacional/2008/arquivos/S_IstvanGardos.ppt>. Acesso em 15 jun. 2009.
- (9) MORISON, K.; WANG, L.; KUNDUR, P.. "Power System Security Assessment". In: IEEE Power & Energy Magazine, 2004.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Ricardo Mota Henriques nasceu em Juiz de Fora, Minas Gerais, em 16 de setembro de 1971. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 1996, concluiu o mestrado e o doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) em 2002 e 2009 respectivamente. É pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL – desde 1997, atuando no desenvolvimento de modelos e aplicações computacionais para análise de redes elétricas, em especial no programa ANAREDE. Seus interesses incluem, ainda, avaliação de segurança de tensão e análise de autovalores e autovetores aplicados ao controle de tensão. É membro do IEEE e do Comitê de Estudos C2 do Comitê Brasileiro da CIGRÉ.



João Alberto Passos Filho nasceu em Juiz de Fora, Minas Gerais, em 9 de julho de 1972. Possui graduação e mestrado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF (1995 e 2000) e doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE (2006). Foi *trainee* do Grupo WEG durante o ano de 1996 e trabalhou por dez anos no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL, atuando principalmente no desenvolvimento dos programas ANAREDE e FLUPOT. Atualmente é professor Adjunto I da Faculdade de Engenharia na UFJF. Tem experiência na área de desenvolvimento de modelos computacionais, atuando principalmente nos seguintes temas: análise de redes em regime permanente, segurança de tensão e otimização de sistemas potência. É membro do IEEE desde 2007 e do Comitê de Estudos C2 do Comitê Nacional Brasileiro da CIGRÉ.



Flávio Rodrigo de Miranda Alves nasceu no Rio de Janeiro em 15 de Março de 1963. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense em 1986 e em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1987, concluiu o mestrado em Engenharia de Sistemas e Computação na Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) em 1992 e o doutorado em Engenharia Elétrica, na mesma instituição, em 2007. É pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL – desde 1987, atuando no desenvolvimento de aplicações computacionais para análise de redes. Seus interesses incluem, ainda, ambientes integrados de interface gráfica e banco de dados para operação e planejamento de sistemas elétricos de potência, metaheurísticas e recomposição de sistemas elétricos de potência. É membro do IEEE e do Comitê de Estudos C2 do Comitê Nacional Brasileiro da CIGRÉ.



Lucas Bittar Barbosa nasceu em São Paulo em 10 de Junho de 1986. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense em 2009, recebeu o prêmio Lâurea Acadêmica. Permaneceu três anos estagiando no projeto ANAREDE do Departamento de Redes Elétricas (DRE) do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL. É engenheiro eletricitista do Subdepartamento Técnico do Departamento de Controle do Espaço Aéreo desde 2009, atuando no planejamento e coordenação dos sistemas de energia elétrica do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro.



Carlos Henrique Costa Guimarães nasceu em Niterói, Rio de Janeiro, em 25 de Abril de 1954. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense em 1975, concluiu o mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) em 1980 e 2003, respectivamente. Trabalhou na Light por 10 anos em estudos e pesquisas com aplicações computacionais, em seguida passou a integrar a equipe de pesquisadores do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL de 1985 a 2000, atuando no desenvolvimento de aplicações para análise de redes em regimes permanente e dinâmico. Atuou como consultor do ONS de 2000 a 2006. É professor da Universidade Federal Fluminense desde 1979 ministrando várias disciplinas e atualmente ocupa o cargo de chefe do Departamento de Engenharia Elétrica. Sua área de interesse está focada em dinâmica e controle de sistemas elétricos de potência.



Felipe de Castro Brum Almeida nasceu em Juiz de Fora em 31 de Agosto de 1985. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF (2008). Atualmente está cursando mestrado em engenharia elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPEE) da UFJF com ênfase na área de sistemas de energia elétrica, atuando no desenvolvimento de ferramentas computacionais para avaliação da segurança estática de sistemas elétricos de potência.

9.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CEPEL, ONS, CNPq, CAPES e FAPEMIG.