



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
GAT.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - IV

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

EVOLUÇÃO METODOLÓGICA PARA OBTENÇÃO DE LIMITES DE INTERCÂMBIOS SEGUROS NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

**Elder Sant'Anna (*) e Amélia Y. Takahata
OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO –
ONS**

**Antônio Carlos Zambroni de Souza
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI**

**Tatiana Mariano Lessa Assis e Marcus Th. Schilling
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE - UFF**

**João Alberto Passos Filho
CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA
- CEPEL**

RESUMO

Este artigo mostra o uso prático da função objetivo “*máxima transferência de potência*”, disponível em um aplicativo de cálculo de fluxo de potência ótimo, com o intuito de aperfeiçoar o procedimento de cálculo de limites dinâmicos de intercâmbios entre regiões. Utiliza-se para teste o sistema elétrico brasileiro representativo do ano de 2012. O novo procedimento proposto é comparado com a metodologia convencional, evidenciando-se as vantagens alcançadas.

PALAVRAS-CHAVE

Limite de Intercâmbio, Fluxo de Potência Ótimo, Segurança, Otimização, Planejamento da Operação

1.0 - INTRODUÇÃO

Ao Operador Nacional do Sistema Elétrico Nacional - ONS cabe a tarefa de calcular os limites de intercâmbios entre as diversas regiões do Brasil para o horizonte de 4 anos. Tais limites irão subsidiar tanto o planejamento energético, quanto o planejamento elétrico da operação. O planejamento energético busca identificar a melhor estratégia de uso dos recursos energéticos em função do que se espera de afluências futuras nas diferentes bacias do Sistema Interligado Nacional – SIN. Nessa etapa, os limites elétricos devem ser considerados como possíveis restrições que poderão estar ativas para o conjunto de afluências esperadas. No contexto do planejamento elétrico o valor do limite de intercâmbio passa a ter o papel de garantir a segurança operativa do SIN. Dessa forma, para o cálculo dos limites de intercâmbios é necessária a elaboração de casos de fluxos de potência referentes a cada um dos quatro anos seguintes e para os patamares de carga, pesada, média e leve. Como é bastante conhecido, a operação interligada de sistemas de potência traz uma série de benefícios que incluem a possibilidade de otimizar recursos energéticos. No sistema brasileiro, por exemplo, existem instalações de transmissão pelas quais são realizadas as trocas de energia entre as bacias hidrográficas de diversas regiões. Assim, a avaliação do desempenho das interligações inter-regionais é de fundamental importância, principalmente no tocante à determinação dos limites de intercâmbio. Para esse cálculo, as interligações são estressadas ao máximo até que critérios de segurança pré-definidos sejam violados. Dependendo das dimensões do sistema analisado, dos critérios adotados e do número de cenários envolvidos, esta tarefa pode demandar grandes esforços [1,2].

O problema de determinação de limites de intercâmbio aponta, naturalmente, para o uso de técnicas de otimização, especialmente o fluxo de potência ótimo [3]. A aplicação do fluxo de potência ótimo (FPO) no cálculo de limites de transferência de potência já foi explorada em diversos trabalhos [4-6]. Entretanto, um tópico

(*) Rua da Quitanda, n° 196 – Centro – 20º Andar - CEP 20.091-005 – Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 XX) 2203-9849 – Fax: (+55 XX) 2203-9420 – Email: elder@ons.org.br

notadamente de grande interesse, pouco abordado na literatura, se refere à aplicação prática de tal ferramenta, em problemas de grandes dimensões, onde o número de variáveis de controle e de restrições envolvidas é demasiadamente elevado.

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho é a divulgação de uma nova metodologia, baseada em algoritmos computacionais de otimização, voltada para aplicações práticas em sistemas de grande porte, sobretudo no Sistema Interligado Nacional (SIN). A metodologia proposta já foi testada com sucesso em um sistema fictício de pequeno porte [7] e no SIN [8]. No presente artigo, são apresentados resultados complementares àqueles mostrados em [8]. Além disso, é proposta a utilização da técnica de relaxação lagrangeana de variáveis dependentes que tenham pouca relação com a função objetivo aplicada. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade e a eficiência da proposta.

O artigo está dividido em quatro Seções. Na Seção 2, é abordado o problema de fluxo de potência ótimo incluindo uma breve descrição da formulação do FPO e a interpretação dos multiplicadores de Lagrange. Essa seção tem o objetivo de apenas abordar os pontos que tangenciam os problemas encontrados nas aplicações deste trabalho, não tendo de forma alguma a intenção de abranger completamente esses assuntos. Na Seção 3, a metodologia proposta é apresentada. Na Seção 4 são apresentados resultados comparativos obtidos através da metodologia tradicional de cálculo e através do procedimento proposto. Finalmente, a Seção 5 mostra as conclusões.

2.0 - FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO – FPO

Os problemas de FPO [9] inserem-se na área de programação não linear de grande porte e podem ser definidos através da especificação dos seguintes atributos: **(a)** Função objetivo; **(b)** Variáveis de controle; **(c)** Variáveis dependentes; **(d)** Restrições de igualdade e desigualdade. O objetivo de um programa de FPO é estabelecer os controles e determinar o estado operativo do sistema elétrico que minimiza o valor da função objetivo sujeita às restrições impostas ao problema. O programa de fluxo de potência convencional não conhece a estratégia de ajuste dos controles que implica a otimização do sistema. Essa estratégia deve ser concebida e implementada pelo usuário alterando o valor das variáveis de controle e dos dados de entrada a cada tentativa. Ao se utilizar um programa de FPO, no entanto, todas as variáveis de controle que têm influência sobre o valor da função objetivo são ajustadas automaticamente pelo programa de modo a minimizá-la. A equação (1) mostra de forma genérica a formulação matemática do problema de programação não linear, onde a função $f(x)$ representa a função objetivo, a equação $g_i(x)$ representa as equações de fluxo de potência ativa e reativa em cada barra do sistema e a inequação $h_j(x) \geq 0$ representa os limites das variáveis de controle a serem obedecidos.

Minimizar $f(x)$

$$\text{s.a.} \quad \begin{aligned} g_i(x) &= 0 & i &= 1, 2, \dots, m1 \\ h_j(x) &\geq 0 & j &= 1, 2, \dots, m2 \end{aligned} \quad \text{onde } x \in \mathbb{R}^n \quad (1)$$

onde,

f , g_i e h_j são funções reais com 1ª e 2ª derivadas contínuas

$m1$ é o número de restrições de igualdades

$m2$ é o número de restrições de desigualdades

Os algoritmos para a solução do problema (1) são formulados com o objetivo de encontrar um ponto viável que seja mínimo local de $f(x)$. Se a região viável for convexa e a função objetivo estritamente convexa, haverá apenas um ponto de mínimo e, portanto, o mínimo local também será o mínimo global da função. Existe uma função denominada Lagrangeana associada ao problema (1) tal que [9],

$$L(x, \lambda, \mu) = f(x) - \sum_{i=1}^{m1} \lambda_i \cdot g_i(x) - \sum_{j=1}^{m2} \mu_j \cdot h_j(x) \quad (2)$$

Um ponto estacionário do lagrangeano é dado por:

$$\begin{aligned} \Delta L(x^*, \lambda^*, \mu^*) &= 0 & \text{Condição de primeira ordem} \\ Z(x^*)^T \cdot H(x^*, \lambda^*, \mu^*) \cdot Z(x^*) &= 0 & \text{Condição de segunda ordem} \end{aligned}$$

onde,

- $H(x^*, \lambda^*, \mu^*) = \Delta^2 L(x^*, \lambda^*, \mu^*)$ é a Hessiana do lagrangeano em relação à x no ponto (x^*, λ^*, μ^*) , cabendo observar que o cálculo de $H(x^*, \lambda^*, \mu^*)$ considera apenas as restrições ativas em x^* .

- $Z(x^*)$ é o conjunto de todos os vetores tangentes à região viável em x^* . Ele define um subespaço ortogonal aos gradientes das restrições ativas em x^* (espaço nulo).

Os multiplicadores de Lagrange identificados na equação (2) por λ e μ representam em seus valores, o grau de penalidade a partir da incorporação das restrições à função objetivo original. Quando há restrição de

desigualdade, deve-se transformá-la em restrição de igualdade com a introdução da variável de folga. Os valores dos multiplicadores de Lagrange λ_i (associados às restrições de igualdade) e μ_j (associados às restrições de desigualdades) são calculados internamente ao programa, e identificam o quanto cada grandeza controlada está violando a restrição imposta pelo problema, no ponto ótimo obtido pela simulação. Uma das idéias computacionais mais úteis dos anos 70 é a observação que muitos problemas difíceis podem ser vistos como problemas fáceis, complicados por um número relativamente pequeno de restrições. A dualização das restrições difíceis, isto é, o acréscimo dessas restrições à função objetivo através de um vetor de multiplicadores (multiplicadores de Lagrange) deve produzir um problema fácil de resolver e cujo valor da solução é um limite inferior (para problemas de minimização) para o valor ótimo do problema original. Com base nesse limite inferior, é possível ainda estimar o quão próxima está a solução viável disponível da solução ótima [10]. Durante o processo de cálculo dos limites de intercâmbios entre regiões são identificadas restrições de tensão ou de carregamento que, muitas vezes estão associadas a restrições internas ao subsistema e que devem ser, por isso, desconsideradas, com o objetivo de identificar o nível de intercâmbio que seria alcançado, caso a restrição tivesse sido eliminada através da instalação de um reforço estrutural na rede elétrica. Em outras situações, pode também ocorrer uma restrição ativa que pode ser flexibilizada sem um grande comprometimento ao atendimento às condições desejáveis de operação do sistema.

3.0 - NOVA METODOLOGIA VIA FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

Atualmente, o método utilizado para determinar limites de intercâmbio entre regiões do SIN consiste de um procedimento manual, onde, a partir de um caso base (ponto de operação), aplicam-se sucessivos aumentos na potência transferida entre as áreas de interesse até que haja uma ou mais violações de critérios. Cada aumento no intercâmbio é realizado através de uma elevação na produção das unidades geradoras da área exportadora, acompanhada de uma redução na produção das unidades geradoras da área importadora. A cada aumento de intercâmbio, efetua-se ajustes nas tensões de todo o sistema, verificando a viabilidade do caso em regime permanente, o que inclui a observação dos fluxos nos circuitos. Em seguida, o ponto de operação obtido passa por uma avaliação dinâmica, que tem foco principal na estabilidade transitória. Maiores detalhes sobre a metodologia atual podem ser obtidos em [7]. A metodologia atual demanda um grande esforço laboral e carece de aperfeiçoamentos que acelerem a obtenção de resultados. Por esta razão, a metodologia proposta faz uso não só de um programa de fluxo de potência ótimo (considerando uma função objetivo de maximização de transferência), mas busca sua integração a outros aplicativos também utilizados no processo de determinação do limite de intercâmbio entre regiões. Em [1], os autores propõem a utilização de métodos baseados nessa integração, mostrando ganhos consideráveis com a automação.

A Figura 1 apresenta o diagrama de blocos referente à metodologia proposta visando ilustrar e facilitar o entendimento de todo o procedimento sugerido.

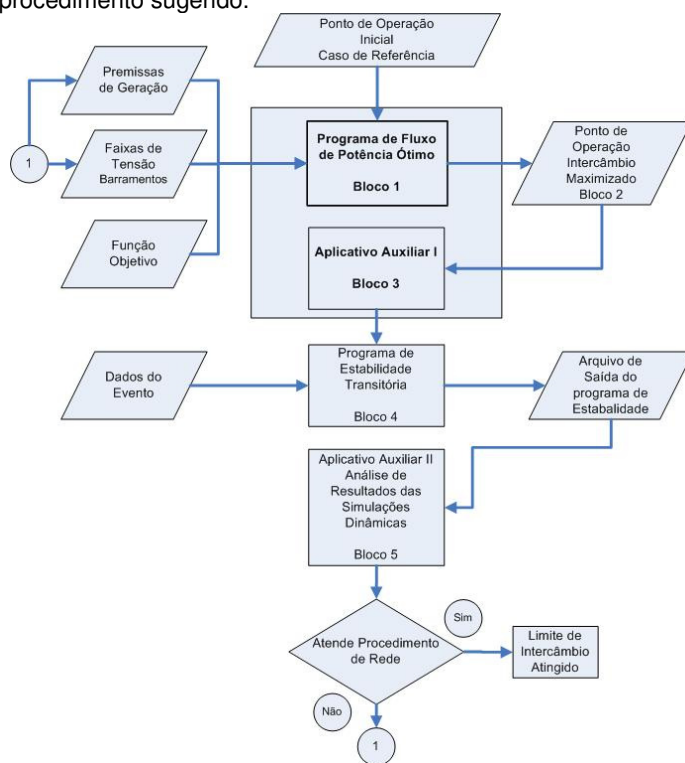


Figura 1 – Novo Procedimento

A idéia principal é a obtenção direta de um ponto de operação através do FPO (Bloco 2), que represente o limite de intercâmbio de regime permanente, observando um conjunto de restrições [11]. Em sistemas de grande porte, o elevado número de restrições físicas e variáveis de controle envolvidas traz uma série de dificuldades de convergência. Além disso, o uso indiscriminado das restrições, independentemente da função objetivo utilizada, pode conduzir o processo de otimização a resultados distantes da realidade prática. De forma a contornar esse problema, a metodologia proposta inclui uma etapa de pré-processamento que auxilia a preparação dos dados utilizados pelo fluxo de potência ótimo.

O pré-processamento é realizado tendo como base a função objetivo utilizada, que é definida a partir do conhecimento das áreas exportadora e importadora de potência. A metodologia desenvolvida foi aplicada fazendo uso do programa de fluxo de potência ótimo desenvolvido pelo CEPEL, o FLUPOT [12]. Além disso, para a solução do problema de otimização, aplicado ao SIN, foi ainda necessária a elaboração de um aplicativo adicional, denominado *PRÉ-FLUPOT*, descrito detalhadamente em [8], que busca essencialmente a preparação automática do arquivo base do FPO. Tal preparação é realizada a partir de uma base de dados comum a outros programas utilizados no planejamento da operação.

Uma vez definidas todas as restrições de geração ativa e reativa, tensão e regiões de interesse e controle após a execução do programa *PRÉ-FLUPOT*, o programa FLUPOT determinará o limite de intercâmbio entre as regiões obtido no Bloco 2. Uma avaliação cautelosa desse resultado deverá ser realizada de forma a identificar as variáveis que limitaram esse valor. Nesse momento, a consulta dos valores dos multiplicadores de Lagrange impressos no relatório de saída do programa FLUPOT poderá auxiliar na tomada de decisão em relação à relaxação de variáveis dependentes, pois os multiplicadores indicam a correlação entre essas e os valores de fluxos que compõem a interligação entre as regiões.

A partir da implementação dessa metodologia, será possível a utilização da função de maximização do intercâmbio entre duas regiões, que considera como variáveis de controle, a geração ativa e reativa das regiões exportadora e importadora, chaveamentos de recursos de controle de tensão e tapes com LTC, até se atingir o limite de intercâmbio de regime permanente. Cabe ressaltar que, se forem utilizadas restrições adequadas quanto ao controle de tensão, carregamentos e despachos viáveis nas diversas bacias, *limites seguros em regime permanente serão obtidos automaticamente*. Além disso, uma vez que será utilizada uma ferramenta de otimização, espera-se obter resultados iguais ou melhores do que aqueles produzidos no processo manual atualmente empregado.

A partir do novo ponto de operação, que define o máximo intercâmbio de regime permanente, será utilizado um outro aplicativo auxiliar, Bloco 3, que atualiza as reatâncias dos transformadores elevadores das usinas, configura o número de unidades para atender as faixas de potência ativa e reativa e gera o arquivo de associação das usinas aos seus dados de controle de forma sequencial à utilização do programa de fluxo de potência ótimo. Da mesma forma, são realizadas as simulações dinâmicas das emergências mais severas, Bloco 4, específicas de cada cenário, e pré-definidas através de uma lista. Esse procedimento é bastante semelhante ao utilizado pela metodologia atual. A leitura do arquivo de saída do programa de análise da estabilidade transitória será feita por um terceiro aplicativo auxiliar, Bloco 5, que fará a verificação de atendimento dos critérios descritos nos Procedimentos de Rede [11]. Caso algum critério dos procedimentos de rede seja violado, o intercâmbio, que nesse caso está sendo limitado por restrições de natureza dinâmica, deverá ser reduzido. Essa redução deve ser realizada através da inserção de limitação do somatório dos fluxos que compõem a função objetivo via processamento do FPO. Obtido o novo ponto de operação, seu desempenho dinâmico será novamente analisado de forma a verificar o atendimento do critério dinâmico. O processo descrito se repetirá até que o valor limite do intercâmbio (*seguro*) seja encontrado.

4.0 - APLICAÇÃO PRÁTICA AO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL (SIN)

O novo procedimento foi aplicado ao SIN, utilizando a base de dados completa disponibilizada pelo ONS, de forma a evidenciar quaisquer possíveis dificuldades práticas inerentes ao processo de cálculo do limite. O caso de referência adotado representa a configuração do ano de 2012, patamar de carga média de verão.

Para a aplicação do método, foi calculado o limite de recebimento pela região Sul (RSUL) proveniente das regiões exportadoras Norte, Nordeste e Sudeste. Cabe ressaltar que os despachos das usinas hidráulicas das regiões exportadoras foram limitados a no máximo 95% e da região importadora a no mínimo 44% de sua capacidade.

Os critérios para a caracterização de pontos de operação como seguros ou inseguros estão detalhados em [11], tanto para a análise do desempenho de regime permanente quanto dinâmico.

De forma a identificar as linhas de interligação que compõem o limite de recebimento pela região Sul, a Figura 2 mostra um diagrama simplificado das regiões envolvidas. Como será mostrado a seguir, o limite de intercâmbio para este cenário foi calculado através da forma tradicional [7] e segundo a metodologia proposta neste trabalho.

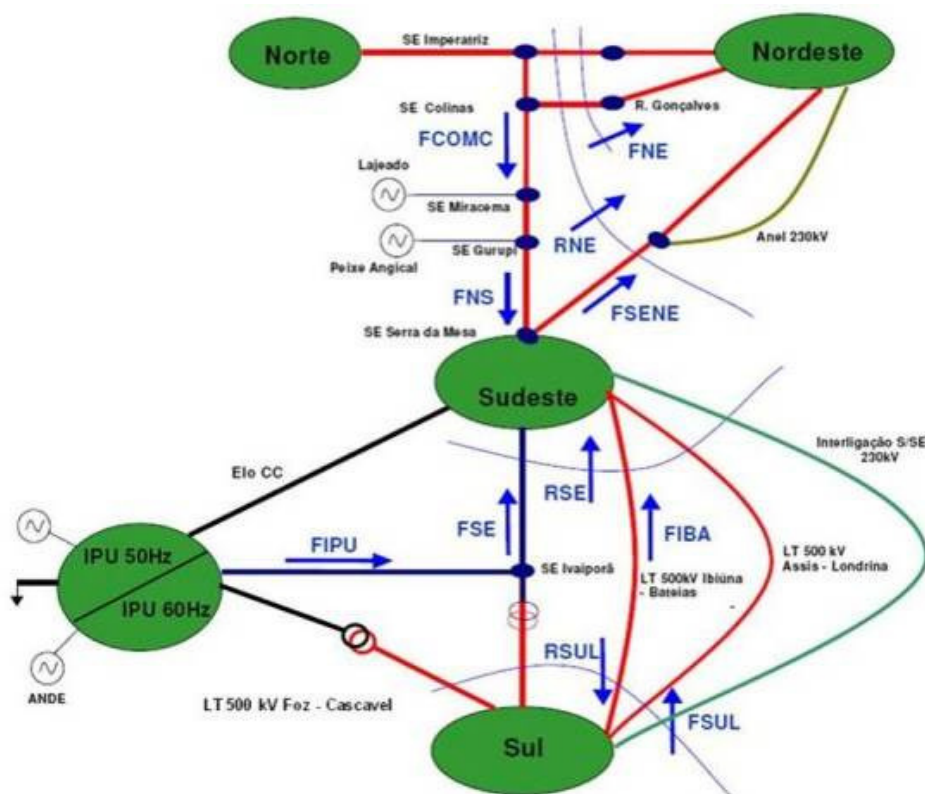


Figura 2 – Indicação dos Principais Fluxos entre os Subsistemas

4.1 Resultados via Metodologia Tradicional

A partir do caso de trabalho, que considera despachos típicos do período por bacias foram realizados sucessivos redespachos de forma a aumentar a geração das regiões exportadoras (Norte, Nordeste e Sudeste) e reduzir a geração das usinas da região Sul (região importadora). Esse processo de redespachos manuais é feito sempre atendendo às premissas de despachos máximos e mínimos, respectivamente. Além disso, para cada um dos redespachos mencionados, as tensões do sistema são reajustadas de forma a viabilizar a convergência do caso de fluxo de potência a cada etapa. Através desse processo, obteve-se um máximo valor de recebimento pela região Sul – RSUL de 6438 MW. Os fatores limitantes foram os níveis mínimos de tensão (0,95 pu) nas SE 525 kV Nova Santa Rita e Gravataí e nas SE 345 kV Pirapora e São Gotardo da área Minas Gerais. Os principais fluxos do SIN para o ponto de operação obtido são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Fluxos Correspondentes ao Limite de Regime Permanente * RSUL= 6438 MW * Metodologia Atual

Principais Fluxo(MW)				
RSUL ⁽¹⁾	FSM ⁽²⁾	FGUSM ⁽³⁾	RNE ⁽⁴⁾	FSENE ⁽⁵⁾
6438	5069	3789	-917	-58

(1) Os fluxos que compoem o Recebimento pela região Sul estão indicados na Figura 3 (2) Fluxo chegando na SE 500 kV Serra da Mesa (3) FGUSM – Fluxo na LT 500 kV Gurupi – Serra da Mesa (4) Recebimento pela região Nordeste (5) Fluxo da região Sudeste para a região Nordeste (LT 500 kV Serra da Mesa – Rio das Éguas)

O ponto de operação “limite” deve então ser avaliado do ponto de vista dinâmico. Neste estudo, foram consideradas as emergências de linhas de transmissão balizadoras do cálculo do limite de recebimento pela região Sul. Os resultados obtidos mostram que, dentre todas as 27 emergências simuladas, a da LT 525 kV Salto Santiago - Itá é a que define o limite o intercâmbio entre as regiões Sudeste e Sul. A emergência foi simulada através da aplicação de um curto-circuito na referida LT, seguido de seu desligamento pelo sistema de proteção em 100 ms. Esta emergência levou a UHE Jacuí à perda de estabilidade.

De forma a evitar a perda de estabilidade da UHE Jacuí, foi realizado um redespacho entre as bacias do subsistema Sul sem, no entanto, restringir o valor inicial do RSUL, o que evitou o problema de perda de sincronismo da referida usina. No nível de intercâmbio de 6438 MW foi verificada oscilação de tensão na SE 525 kV Blumenau de aproximadamente 2% que é o valor máximo de oscilação segundo o critério estabelecido em [11].

4.2 Resultados via Metodologia Proposta

Durante o processo de maximização do intercâmbio das regiões Norte, Nordeste e Sudeste para a região Sul foram utilizados os controles das tensões terminais dos geradores, seus despachos de potência ativa e reativa, assim como os tapes dos transformadores. Deve ser ressaltado que todos esses recursos pertencem à área de controle fornecida como dado de entrada para o FPO, uma vez que a utilização do aplicativo *PRÉ-FLUPOT* viabilizou essa identificação por região geográfica e a abrangência da rede, já perfeitamente alinhado ao limite de intercâmbio que se está buscando maximizar [8].

A partir do arquivo de entrada do fluxo de potência ótimo foi executado o programa *FLUPOT* que através da utilização dos recursos de controle disponibilizados e do estabelecimento de todos os limites das variáveis dependentes estabelecidas, alcançou o valor de 7000 MW de limite de regime permanente. Vale ressaltar que durante o processo de maximização do intercâmbio foram considerados chaveamentos discretos de recursos de controle de tensão do sistema. O fator limitante do recebimento pela região Sul, neste caso, foi o nível mínimo de tensão na SE 440 kV Santa Bárbara e o limite máximo de geração em grande parte das usinas das regiões exportadoras. A Tabela 2 mostra as principais referências de fluxos correspondentes ao ponto de operação que atende a todos os critérios de regime permanente.

Tabela 2 – Fluxos Correspondentes ao Limite de Regime Permanente * RSUL= 7000 MW * Metodologia Proposta

Principais Fluxos (MW)				
RSUL ⁽¹⁾	FSM ⁽²⁾	FGUSM ⁽³⁾	RNE ⁽⁴⁾	FSENE ⁽⁵⁾
7000	4268	3015	212	183

(1) Os fluxos que compoem o Recebimento pela região Sul estão indicados na Figura 3 (2) Fluxo chegando na SE 500 kV Serra da Mesa (3) FGUSM – Fluxo na LT 500 kV Gurupi – Serra da Mesa (4) Recebimento pela região Nordeste (5) Fluxo da região Sudeste para a região Nordeste (LT 500 kV Serra da Mesa – Rio das Éguas)

O ponto de operação ótimo gerado pelo FPO deve ser analisado do ponto de vista dinâmico. Assim, foram simuladas todas as emergências já analisadas pelo método tradicional. A emergência que limitou o RSUL foi a mesma identificada quando da utilização da metodologia tradicional, ou seja, a da LT 525 kV Salto Santiago – Itá. Esta emergência provocou oscilação de tensão na SE 525 kV Blumenau em torno de 5%. De forma a limitar a 2% a oscilação, foi necessário restringir o **RSUL à 6800 MW**.

4.3 Análise Comparativa

A Tabela 3 mostra a comparação entre os resultados alcançados em ambas metodologias.

Tabela 3 – Comparação de Resultados

Metodologia Atual (RSUL)		Metodologia Proposta (RSUL)	
Regime Permanente	Regime Dinâmico	Regime Permanente	Regime Dinâmico
6438 MW	6438 MW	7000 MW	6800 MW

A solução alcançada pela metodologia proposta, que utiliza o fluxo de potência ótimo (FPO), identificou novas possibilidades de despachos entre as bacias que levam em consideração a maior aproximação entre os subsistemas Norte e Nordeste, em contraposição aos sistemas Sul e Sudeste, conforme mostrado na Figura 3.



Figura 3 – Comparações de Percentuais de Despachos por Usina e Bacias do SIN

de otimização no cálculo dos limites, uma vez que uma maior exploração do sistema de transmissão pode ser conseguida através de despachos e controles otimizados. Junta-se a isso, o ganho no tempo gasto na obtenção dos casos de referência (pontos de operação) para os diferentes cenários energéticos continuamente estudados no âmbito do planejamento da operação. A aplicação do FPO acarreta em um maior grau de automação do procedimento de cálculo.

Com relação às violações dinâmicas observadas nos casos limites estudados, cabe ressaltar a necessidade de se utilizar a ferramenta adequada para a identificação da melhor estratégia de redespacho nas bacias dos subsistemas exportador e importador de energia. No caso aqui analisado, a restrição dinâmica está associada ao critério de oscilação de tensão, mas poderia estar relacionada à perda de estabilidade de determinada usina ou oscilação de potência. Assim, seriam necessárias diferentes análises e ferramentas de simulação para a solução de cada um desses problemas.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T.M.L. Assis, D.M. Falcão, G.N. Taranto, *Dynamic Transmission Capability Calculation Using Integrated Analysis Tools and Intelligent Systems*, **IEEE Trans. on PWRS**, Vol. 22, no. 4, Nov. 2007.
- [2] Y. Li, V. Venkatasubramanian, *Coordination of Transmission Path Transfers*, **IEEE Trans. on PWRS**, Vol. 19, No. 3, Aug.2004.
- [3] H. W. Dommel, W. Tinney, *Optimal Power Flow Solutions*, **IEEE Trans. on PAS**, vol. PAS-87, No. 10, pp. 1866–1976, Oct. 1968.
- [4] Weixing Li, M. Shaaban, Zheng Yan, Yixin Ni, Felix F. Wu, *Available Transfer Capability Calculation with Static Security Constraints*, **Proc. of the 2003 IEEE Power Eng. Society General Meeting**, 2003.
- [5] Xiao-Ping Zhang, *Transfer Capability Computation with Security Constraints*, **Proc. of the 15th Power Syst Computation Conf.**, Liège, Aug. 2005.
- [6] E. De Tuglie, M. Dicorato, M. La Scala, P. Scarpellini, *A Static Optimization Approach to Assess Dynamic Available Transfer Capability*, **IEEE Trans. on PWRS**, Vol. 15, No. 3, Aug. 2000.
- [7] E.G.S. Sant`Anna, A.C. Zambroni de Souza, A.Y. Takahata T.M.L. Assis, M.Th. Schilling, J.A. Passos Filho, *Limites de Intercâmbio em Sistemas de Grande Porte via Otimização*, **XVII Congresso Brasileiro de Automática - CBA**, Juiz de Fora, Set. 2008
- [8] E.G.S. Sant`Anna, A.C. Zambroni de Souza, A.Y. Takahata T.M.L. Assis, M.Th. Schilling, J.A. Passos Filho, *Cálculo de Limites de Intercâmbio em Sistemas de Grande Porte Através de Ferramentas de Otimização*, **XI Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - SEPOPE**, Belém - PA, Mar. 2009.
- [9] M. L. Latorre, *Aplicação do Método de Pontos Interiores Primal-Dual para a Resolução do Problema de Fluxo de Potência Ótimo* – Dissertação de Mestrado, UFRJ, Março de 1995.
- [10] M.L. Fisher, The Lagrangian Relaxation Method of Solving Integer Programming Problems, **Management Science**, Vol. 27, no. 1, pp. 1-18, 1981.
- [11] Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Módulo 23.3 (disponível em www.ons.org.br).
- [12] Cepel, *Manual do Programa FLUPOT*, Rio de Janeiro, 2008.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

- **Elder Sant`Anna** é Engenheiro do ONS, Especialização em Sistemas de Controle pela UFSC (1994) e Mestrando em Engenharia Elétrica (UNIFEI)
- **Amélia Yukie Takahata** é Engenheira do ONS, D.Sc. (COPPE/UFRJ, 2008).
- **Antonio Carlos Zambroni de Souza** é Professor da UNIFEI, PhD (Waterloo, 1995).
- **Tatiana Mariano Lessa Assis** é Professora da UFF, D.Sc. (COPPE/UFRJ, 2007).
- **Marcus Theodor Schilling** é Professor da UFF, D.Sc. (COPPE/UFRJ, 1985).
- **João Alberto Passos Filho** é Pesquisador do CEPEL, D.Sc. (COPPE/UFRJ, 2005).

8.0 - AGRADECIMENTOS

A elaboração deste artigo contou com o apoio do *Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)*, *CEPEL* e *CNPq*.