

# Desenvolvimento de Sistema de Avaliação da Capacidade de Transferência de Sistemas de Transmissão

F. C. Gaino, A. Padilha-Feltrin, UNESP e L. F. N. Delboni, CTEEP

**Resumo-** Algoritmos eficientes para calcular a capacidade de transferência em uma rede de transmissão de energia elétrica são fundamentais para mercados de energia baseados em transferências. Em muitos sistemas estes cálculos são possíveis devido às técnicas lineares. Uma das limitações do ATC Linear tradicional é o erro produzido devido a não consideração do efeito do fluxo de potência reativo no carregamento da linha. Este trabalho descreve um método rápido porém poderoso de incorporar o efeito do fluxo de potência reativo no cálculo da ATC (Available Transfer Capability) linear estático. É apresentado um método que primeiro determina os fluxos de potência reativa utilizando equações exatas de círculos para o fluxo complexo nas linha de transmissão, e então determina o ATC utilizando fatores de distribuição de potência ativa. Exemplos numéricos são realizados para o sistema Cigré 32 barras onde a máxima transferência é determinada por ambos os métodos.

**Palavras-chave**— Máxima Capacidade de Transferência, Fatores de Distribuição, Fluxo Reativo, Sobrecargas em Linhas, ATC Linear.

## I. INTRODUÇÃO

As companhias de transmissão vêm enfrentando muitos desafios em seu novo ambiente econômico. Com a desverticalização e aumento da competição do setor elétrico no Brasil e no mundo, as empresas de energia elétrica têm investido em novas formas de se avaliar a máxima capacidade de transferência de suas linhas de transmissão.

Limites de transferência podem ser expressos de numerosas formas. Um limite de transferência é frequentemente expressado como um número que indica a quantidade, em MW, de potência que pode ser aumentada em uma dada direção ou através de alguma interligação [2, 8].

Uma transferência é caracterizada pela mudança nas injeções de potência nas barras da rede. Por exemplo, uma transferência ponto a ponto da área A para a área B é caracterizada pelo aumento da potência na barra importadora (ou compradora) da área B, e uma redução da potência na barra exportadora (ou vendedora) da área A.

---

Os autores agradecem o suporte financeiro da CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista). Agradecem também a UNESP – Universidade Estadual Paulista – Campus de Ilha Solteira, e a FEPISA (Fundação de Ensino Pesquisa e Extensão de Ilha Solteira) por propiciarem condições para a boa condução deste projeto.

F. C. Gaino e <sup>a</sup> Padilha- Feltrin trabalham na Unesp de Ilha Solteira. (email: Padilha@dee.feis.unesp.br)

L.F.N. Delboni trabalha na CTEEP. (email: ldelboni@ctEEP.com.br)

A ATC corresponde a quantidade máxima de potência que pode ser alocada de um conjunto de barras exportadoras para um conjunto de barras importadoras em um sistema, sem criar novas violações de segurança, ou seja, quantifica o aumento viável de transferência de potência ativa de um ponto a outro do sistema. No entanto, esta quantidade de potência ativa nem sempre é restringida por limites estáticos, mas também por comportamentos dinâmicos devido a grandes distúrbios. A ATC dinâmica esta focada em calcular a máximo potência em uma transferência ponto a ponto tal que a resposta transitória permanece estável e viável [3].

Este artigo detalha exclusivamente a ATC estático, que é frequentemente requerido para inicializar os estudos da ATC dinâmico.

Em todo o artigo, o tema central é a inclusão da potência reativa como uma forma de diminuir o erro do método linear no cálculo da ATC [4]. Isto é motivado pelo fato que:

- Em sistemas de transmissão altamente carregados, a potência reativa pode ser um componente significativo na mudança dos fluxos;
- Limites térmicos de linhas de transmissão são expressos por quantidades em MVA em vez de ser aproximado à limite de potência ativa (MW);
- Com consideração do fluxo de potência reativo é possível compreender o comportamento da tensão e outras restrições de segurança do sistema.

A seguir é apresentada, uma forma eficiente de se utilizar a potência reativa como uma forma de reduzir consideravelmente o erro do método linear na determinação da ATC, com um pequeno esforço computacional adicional [4]

## II. INCLUINDO O EFEITO DA POTÊNCIA REATIVA NA ATC LINEAR

Uma das limitações da ATC Linear é a falta de informação com relação ao efeito da potência reativa, que resulta em erros significantes nos valores da ATC. A seguir apresenta-se um método para considerar o efeito do fluxo reativo na ATC linear. O método estima o fluxo complexo nas linhas após a ocorrência de uma transferência e estabelece uma correlação entre os limites MW-Mvar, que incorpora a mudança no fluxo reativo devido ao aumento do fluxo ativo na linha.

### A. Obtenção do círculo P-Q

A fim de se obter a relação entre o fluxo nas linhas de transmissão e o círculo P-Q, apresentam-se as equações de fluxo para o modelo  $\pi$  de linha de transmissão.

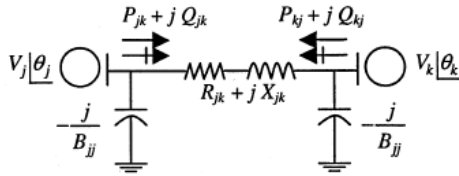


Figura 1. Linha de transmissão: modelo  $\pi$ .

Considerando a Fig. 1, o fluxo de potência complexo que sai da barra  $j$  para a barra  $k$  é dada pela equação (1).

$$\begin{aligned} S_{jk} &= P_{jk} + jQ_{jk} \\ &= V_j^2 G_{jk} - V_j V_k Y_{jk} \cos(\theta_j - \theta_k + \alpha_{jk}) \\ &\quad + j[V_j^2 B_{jj} - V_j^2 B_{jk} - V_j V_k Y_{jk} \sin(\theta_j - \theta_k + \alpha_{jk})] \end{aligned} \quad (1)$$

sendo a magnitude de tensão  $V_j$  e  $V_k$ , e os ângulos  $\theta_j$  e  $\theta_k$  as variáveis de estado que dependem do ponto de operação do sistema de potência. Na equação (1),  $Y_{jk}$  e  $-\alpha_{jk}$  são respectivamente a magnitude e o ângulo da admitância da linha que é dada por  $G_{jk} + jB_{jk} = 1/(R_{jk} + jX_{jk})$ .

O objetivo é determinar a relação P-Q em uma linha de transmissão quando uma transferência ocorre no sistema de potência.

Separando os componentes reais dos imaginários da equação (1) e reorganizando os termos, chega-se a:

$$P_{jk} - V_j^2 G_{jk} = -V_j V_k Y_{jk} \cos(\theta_j - \theta_k + \alpha_{jk}) \quad (2)$$

$$Q_{jk} + V_j^2 B_{jj} + V_j^2 B_{jk} = -V_j V_k Y_{jk} \sin(\theta_j - \theta_k + \alpha_{jk}) \quad (3)$$

Tomando-se o quadrado de ambos os termos das equações (2) e (3) e somando-as, tem-se:

$$(P_{jk} - V_j^2 G_{jk})^2 + (Q_{jk} + V_j^2 B_{jj} + V_j^2 B_{jk})^2 = (V_j V_k Y_{jk})^2 \quad (4)$$

No estudo da ATC Linear, admite-se que as tensões  $V_j$  e  $V_k$  permanecem constantes durante uma transferência, ou seja, a tensão não varia com o aumento da potência ativa injetada na barra ( $\partial V_k / \partial P_i \cong \partial V_j / \partial P_i \cong 0$ ); então a equação (4) torna-se a equação de um círculo no plano  $P_{jk}$  versus  $Q_{jk}$ , centrado em:

$$(P_{jk^\circ}, Q_{jk^\circ}) = (V_j^2 G_{jk}, -V_j^2 B_{jj} - V_j^2 B_{jk}) \quad (5)$$

cujos raio é dado pela equação (6):

$$S_{jk^\circ} = V_j V_k Y_{jk} \quad (6)$$

Na equação (5), o símbolo  $(\circ, \circ)$ , representa coordenadas no plano  $P_{jk}$  versus  $Q_{jk}$ .

Associando-se as equações (5) e (6) na equação (4), obtém-se:

$$(P_{jk} - P_{jk^\circ})^2 + (Q_{jk} - Q_{jk^\circ})^2 = S_{jk^\circ}^2 \quad (7)$$

Deve-se ressaltar que, como em geral,  $S_{jk} \neq S_{kj}$ , os círculos

que cada terminal da linha de transmissão descreve são diferentes, embora os raios dos círculos tenham a mesma magnitude [5].

### B. Limite Térmico da Linha

Certamente a mais relevante das restrições de segurança no cálculo da ATC é o limite térmico da linha de transmissão expressa em MVA. Denota-se por  $|S_{jk}|$  a magnitude do fluxo de potência complexa através da linha  $j$ - $k$ . O limite térmico desta linha  $S_{jk}^{\max}$  é um valor constante. Para uma transferência de  $\Delta P$  megawatts entre as áreas  $i$  e  $s$ ,  $|S_{jk}|$  deve ser sempre menor que  $S_{jk}^{\max}$ . Quando esta condição não é verdadeira para alguma linha  $j$ - $k$ , então, diz-se que esta linha está sobrecarregada, e que a linha é limitante para a transferência.

Portanto, o problema básico da ATC quanto a limites térmicos de segurança consiste em determinar a máxima quantidade de potência  $+\Delta P$  que pode ser entregue para uma transferência entre as barras  $i$  (exportadora) e a barra  $s$  (importadora) tal que  $|S_{jk}| < S_{jk}^{\max}$  para todas as linhas  $j$ - $k$  no sistema, dado um estado de operação inicial do sistema.

### C. Fatores de Distribuição

A ocorrência de uma transferência de potência entre as áreas  $i$  e  $s$ , ou seja, o aumento da injeção de potência ativa na barra  $i$  e a extração de potência ativa na barra  $s$ , resultará na variação da potência fluindo nas linhas, esta variação pode ser relacionada à potência ativa injetada nas barras através dos fatores de distribuição de potência ativa (PTDF). Desta forma, a variação da potência ativa fluindo através de uma específica linha  $j$ - $k$  ( $\Delta P_{jk}$ ) pode ser aproximadamente relacionada à injeção de potência ativa na barra  $i$  ( $\Delta p_i$ ), através dos fatores de distribuição de potência ativa.

$$\rho_{jk,i \rightarrow s} = \Delta P_{jk} / \Delta p_i \quad (8)$$

Estes fatores são utilizados quando, dada uma transferência deseja-se maximizar esta transferência sem que se exceda nenhum limite de fluxo de potência em linhas ou transformadores.

O fator de distribuição de transferência de potência para uma linha, é calculado em relação a uma transferência  $pT$ , sendo  $p$  a quantidade de potência a ser transferida em p.u., e  $T$  um vetor de fatores de participação de tamanho  $N$ , igual ao número de barras.

$$pT = T_{sell} + T_{buy} = \begin{bmatrix} PF_{sell1} \\ PF_{sell2} \\ \vdots \\ PF_{sellN} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} PF_{buy1} \\ PF_{buy2} \\ \vdots \\ PF_{buyN} \end{bmatrix} \quad (9)$$

sendo que os vetores  $PF_{sell}$  e  $PF_{buy}$  obedecem as seguintes condições:

$$\sum_{i=1}^N PF_{sell,i} = 1; \quad \sum_{i=1}^N PF_{buy,i} = -1 \quad (10)$$

Deste modo, obedecendo a condição (10) os ve-

tores  $PF_{sell}$  e  $PF_{buy}$  são construídos, sendo todas as suas posições nulas, exceto a posição da barra escolhida como a barra exportadora que no vetor  $PF_{sell}$  receberá o valor +1; e no vetor  $PF_{buy}$  o valor -1 será atribuído à posição da barra importadora, de modo que ambos sigam o que está determinado na condição (10), ou seja,  $T = [0\ 0\ 0 \dots +1 \dots 0\ 0 \dots -1 \dots 0]^T$ .

O fator de distribuição pode então ser calculado da seguinte forma:

$$\rho_{jk,T} = \frac{\partial P_{jk}}{\partial p} = \frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial p} + \frac{\partial P_{jk}}{\partial \theta_k} \frac{\partial \theta_k}{\partial p} + \frac{\partial P_{jk}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial p} + \frac{\partial P_{jk}}{\partial V_k} \frac{\partial V_k}{\partial p} \quad (11)$$

Na equação (11) as derivadas com relação às variáveis de estado podem ser determinadas explicitamente das equações de fluxo de potência ativa e reativa, e as derivadas com relação a  $p$  são determinadas através da inversa da matriz jacobiana. Para as variáveis de estado, as derivadas com relação a  $p$  são calculadas seguindo a equação (12).

$$\frac{\partial \theta_j}{\partial p} = \sum_{i \neq ref}^N \left( PF_{sell,i} \frac{\partial \theta_j}{\partial P_i} \right) + \sum_{i \neq ref}^N \left( PF_{buy,i} \frac{\partial \theta_j}{\partial P_i} \right) \quad (12)$$

Assim sendo, os fatores de distribuição de transferência indicam como a potência injetada fluirá nas linhas, ou seja, se o PTDF de uma determinada linha for igual a 5%, isto indica que 5% da potência injetada fluirá naquela linha [6].

#### D. Círculos Limitantes e Operação

No plano  $P_{jk}$  versus  $Q_{jk}$ , o limite térmico de uma linha de transmissão é representado por um círculo com centro na origem e raio igual capacidade de carregamento do circuito ( $S_{jk}^{max}$ ). Este círculo representa a capacidade térmica da linha expressa em MVA, ou seja, a máxima corrente elétrica que a linha pode suportar por um determinado período de tempo [1]. O círculo de operação obtido pela equação (4), limita o tamanho da transferência de potência que uma linha pode transmitir e todo ponto de operação factível deve estar contido neste círculo.

### III. INCORPORANDO O FLUXO DE POTÊNCIA REATIVA NA ATC LINEAR

Desde que o fluxo complexo na linha de transmissão é restringido de um lado pelo círculo de operação e no outro pelo círculo limitante, o máximo fluxo complexo na linha  $j-k$  corresponde ao ponto  $(P_{jk}^*, Q_{jk}^*)$  na Fig. 2 obtido da intersecção de ambos os círculos.

#### A. Máximo Fluxo Complexo na Linha

O máximo fluxo de potência permitido através da linha  $j-k$  corresponde ao ponto de intersecção dos círculos de operação e limitante  $(P_{jk}^*, Q_{jk}^*)$  na Fig. 2, e indica o ponto de operação em que a capacidade máxima da linha foi alcançada. Este ponto passará a ser tratado por ponto de máximo fluxo complexo para a linha  $j-k$  e sua determinação depende das condições do sistema, do ponto de operação atual, da quantidade de potência transferida e também da capacidade

de carregamento do circuito.

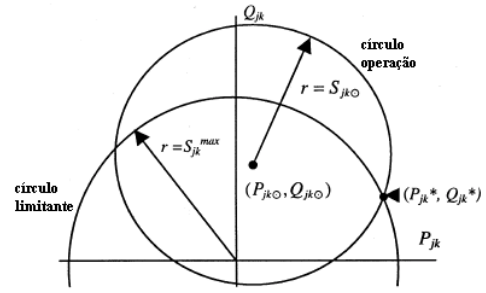


Figura 2. Círculo de operação e limitante

A intersecção dos dois círculos envolve duas soluções possíveis; a solução a ser considerada é a do ponto que é alcançado quando a injeção  $\Delta P$  é positiva. É importante observar que, como existem círculos diferentes para cada terminal da linha, deve-se identificar qual deles alcança o limite de carregamento primeiro.

Para o modelo  $\pi$  de linha de transmissão, o fluxo de potência máximo  $(P_{jk}^*, Q_{jk}^*)$  é obtido resolvendo o sistema de equações formado pela equação (4) e equação (13).

$$P_{jk}^2 + Q_{jk}^2 = (S_{jk}^{max})^2 \quad (13)$$

Re-escrevendo as equações (4) e (13) com as coordenadas do centro e do raio definido pelas equações (5) e (6),

$$(P_{jk} - P_{jk}^o)^2 + (Q_{jk} - Q_{jk}^o)^2 = (S_{jk}^o)^2 \quad (14)$$

$$P_{jk}^2 + Q_{jk}^2 = (S_{jk}^{max})^2 \quad (15)$$

Expandindo a equação (14) e subtraindo a equação (15), obtém-se:

$$Q_{jk} = \left( \frac{1}{2} Q_{jk}^o \right) \left[ -2P_{jk} P_{jk}^o + (S_{jk}^{max})^2 + P_{jk}^2 + Q_{jk}^2 - S_{jk}^o{}^2 \right] \quad (16)$$

Definindo,

$$-Mo^2 = P_{jk}^2 + Q_{jk}^2 - S_{jk}^o{}^2 \quad (17)$$

Tem-se,

$$Q_{jk} = \left( \frac{1}{2} Q_{jk}^o \right) \left[ -2P_{jk} P_{jk}^o + (S_{jk}^{max})^2 - Mo^2 \right] \quad (18)$$

Substituindo-se (18) na equação (15) encontra-se a solução para o  $P_{jk}^*$ ,

$$\left( P_{jk}^2 + Q_{jk}^o{}^2 P_{jk}^{*2} - P_{jk}^o (S_{jk}^{max})^2 - Mo^2 \right) P_{jk}^* + \left( (S_{jk}^{max})^2 - Mo^2 \right) \left( -Q_{jk}^o S_{jk}^{max} \right) = 0 \quad (19)$$

Como esta é uma equação quadrática em  $P_{jk}^*$  pode-se definir:

$$A = (P_{jk}^o{}^2 + Q_{jk}^o{}^2) \quad (20)$$

$$B = -P_{jk}^o \left( (S_{jk}^{max})^2 - Mo^2 \right) \quad (21)$$

$$C = \left[ (S_{jk}^{max})^2 - Mo^2 \right] / 4 - Q_{jk}^o{}^2 (S_{jk}^{max})^2 \quad (22)$$

Assim, tem-se:

$$P_{jk}^* = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (23)$$

e,

$$Q_{jk}^* = \sqrt{(S_{jk}^{max})^2 - P_{jk}^{*2}} \quad (24)$$

O sinal na equação (23) é escolhido positivo se o PTDF da linha  $j-k$  é positivo e negativo em outro caso.

A solução do sistema formado pelas equações (4) e (13) é

dada pelas equações (23) e (24) e é graficamente interpretada na (Fig. 3); onde o ponto  $(P_{jk}^0, Q_{jk}^0)$  representa o ponto de operação inicial. Assumindo que o fator de distribuição de potência ativa (PTDF) relacionando  $P_{jk}$  e a injeção  $P_i$ , é positivo, então, o aumento na injeção  $\Delta P_i$  moverá o ponto de operação para a direita, seguindo a forma do círculo de operação. A avaliação de  $\Delta P_{jk}^*$ , isto é, a variação na coordenada  $P_{jk}$  que direciona o ponto de operação atual para o ponto  $(P_{jk}^*, Q_{jk}^*)$ , representa a máxima variação de fluxo que a linha j-k pode suportar antes de alcançar o seu limite térmico.

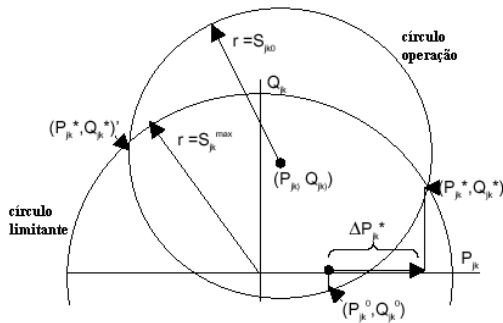


Figura 3. Interpretação gráfica da solução quadrática.

### B. Cálculo da ATC

O ponto de operação inicial  $(P_{jk}^0, Q_{jk}^0)$  no plano  $P_{jk} - Q_{jk}$  para a linha  $j-k$  representa o fluxo de potência complexa que flui na linha  $j-k$  na condição inicial de operação do sistema. A mudança necessária no fluxo de potência ativa através da linha para alcançar o carregamento máximo do circuito é dada pela equação (25).

$$\Delta P_{jk}^* = P_{jk}^* - P_{jk}^0 \quad (25)$$

Utilizando a equação (8),

$$\Delta P_i^{*jk} = \Delta P_{jk}^* / \rho_{jk,i \rightarrow s} \quad (26)$$

Este valor representa a máxima transferência que pode ser estabelecida entre as barras  $i$  e  $s$  sem que nenhuma linha torne-se sobrecarregada. Como nenhuma linha no sistema pode operar sobrecarregada, deve-se identificar o menor valor de  $\Delta P_i^{*jk}$  para todas as linhas  $j-k$ . Esta será a máxima transferência factível, isto é, a ATC considerando as restrições de limite térmico das linhas.

$$ATC_{i \rightarrow s}^{t\acute{e}rmico} = \min \{ \Delta P_i^{*jk} : \text{todas as linhas } jk \} \quad (27)$$

### C. A ATC Linear Tradicional

No cálculo da ATC Linear tradicional não ocorre a avaliação do máximo fluxo na linha pós transferência, que a ATC Linear Reativo apresenta, assim utiliza-se a máxima capacidade de carregamento do circuito ( $S_{jk}^{\max}$ ); assim sendo, da capacidade de carregamento do circuito (MVA) é subtraída o fluxo de potência ativa (MW) no ponto de operação inicial, ocorrendo assim uma fonte de erro, devido a

relação MVA – MW, que não acontece quando utiliza-se a ATC Linear Reativo. Desta forma a máxima variação de fluxo possível para a linha  $j-k$  é determinada pela equação (28) para a ATC Linear tradicional.

$$\Delta P_i^{*jk} \cong \frac{(S_{jk}^{\max} - P_{jk}^0)}{\rho_{jk,i \rightarrow s}} \quad (28)$$

Por fim a ATC Linear tradicional, é também determinado pela equação (27).

Este método ignora completamente o fluxo de potência reativo na determinação da ATC e considera como limitante somente a capacidade de carregamento do circuito, que é uma aproximação exagerada visto que não é permitido que a linha fique sobrecarregada.

É importante ressaltar que é a relação linear entre a transferência e o fluxo de potência nas linhas que torna o algoritmo de cálculo da ATC Linear um algoritmo rápido para o estudo das transferências [7]. O impacto da não consideração do fluxo de potência reativo no cálculo da ATC pode ser analisado na próxima seção que mostra os resultados obtidos com ambos os métodos.

## IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção apresentam-se os resultados numéricos dos métodos descritos. Foram realizados testes de desempenho das metodologias apresentadas quando aplicadas a sistema reais de grande porte, como é o caso do sistema Sul-Sudeste-Centro-Oeste brasileiro. O sistema em estudo nesta seção possui as seguintes características para o nível médio de carga, durante o ano de 2003.

O objetivo do cálculo da ATC é verificar a quantidade de potência que pode ser transferida de uma região onde a geração é abundante para uma outra região onde a geração é escassa e a quantidade de carga a ser atendida é grande. Com este objetivo procurou-se estudar uma transferência de potência entre uma usina de grande porte como Água Vermelha (#189) para um grande centro de carga como o de Paulínia(#517), e encontrar a linha que limita esta transferência.

Os resultados estão apresentados na Tabela 1, que apresenta dados de linha como capacidade de carregamento ( $S_{jk}^{\max}$ ), o máximo fluxo ativo ( $P_{jk}^*$ ) e o fator de distribuição linearizado calculado a partir da solução do fluxo de potência AC. Para a direção estipulada, da barra 189 para a barra 517, o valor da ATC ( $\Delta P_s^{jk}$ ) também está apresentada na tabela, onde a barra 189 é definida como barra exportadora de potência para a barra 517, definida como barra importadora de potência.

Tabela 1. Resultados da ATC para o sistema brasileiro.

Direção de Transferência	De 187 para 517
Linha Limitante	530-551
$S_{jk}^{\max}$	0,9100
$P_{jk}^*$	0,8976

$\rho_{jk,i \rightarrow s}$	-0,5267
Linear $\Delta P_s^{jk}$ (p.u.)	0,9753
Reativo $\Delta P_s^{jk}$ (p.u.)	0,9604

Para a direção de transferência indicada acima, a linha 530-551 é identificada como a linha limitante e a máxima potência possível de ser transferida é 96,04 MW, valor obtido utilizando o método com incorporação do fluxo reativo. O método Linear de cálculo da ATC indica uma transferência máxima de 97,53 MW para a mesma linha limitante, 530-551.

Como se observa na Tabela 1, a capacidade máxima da linha limitante é de 91 MVA e a execução de uma transferência de 96,04 MW entre as barras 189 e 517 provoca um fluxo de 90,9 MW na linha 530-551, o que proporciona um aproveitamento máximo da linha sem ocasionar violações das restrições de segurança.

Na Tabela 2 apresenta-se um ranking com as principais linhas limitantes para a direção de transferência definida.

Tabela 2. Principais linhas limitantes: transferência 187-517

De #	Para #	PTDF -	Linear (p.u.)	Reativo (p.u.)	Carreg. %
530	551	-0,5367	0,9753	0,9604	99,89
551	530	0,5315	0,9875	0,9652	
494	559	0,4763	1,0708	1,0706	94,50
559	494	-0,4747	1,0763	1,0763	
551	567	0,5267	1,1280	1,0997	90,65
567	551	-0,5246	1,1338	1,1018	
567	517	-0,5244	1,2374	1,1101	84,28
517	567	0,5246	1,2368	1,1105	
521	559	-0,4747	1,4892	1,3587	72,64
559-	521	0,4747	1,4892	1,3590	

Observa-se na Tabela 2, que após executar a transferência calculada pelo método Linear Reativo pode-se obter o carregamento das demais linhas do sistema. O caso estudado, a transferência de 96,04 MW entre as barras 189 e 517, ocasiona um carregamento de 99,89% na linha limitante (530-551) e não sobrecarrega nenhuma outra linha do sistema, o que autentica a quantidade calculada pelo método ATC Linear Reativo.

## V. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados demonstraram que apesar do método da ATC Linear ser um algoritmo rápido para o estudo de transferências de potência, ele apresenta bons resultados sem exprimir o esforço computacional requerido pelo método da ATC Não-Linear.

De acordo com os resultados obtidos na seção 4, a incorporação do fluxo de potência reativo nos elementos de transmissão resulta na diminuição significativa dos erros apresentados pelo método ATC Linear tradicional.

O método é obtido da relação entre os limites MW-Mvar

baseado em equações de círculos e estimativas do máximo fluxo complexo nas linhas pós-transferência.

Este método pode também ser utilizado diretamente em aplicações de segurança que são baseadas em fatores de distribuição lineares e no supervisionamento de limites térmicos das linhas, tal como análise de contingências lineares e fluxo ótimo de potência.

## VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos engenheiros Inácio M. Ota e Antonio Arruda da CTEEP pelas valiosas contribuições para a conclusão deste trabalho.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NERC, " Available transfer capability – definitions and determinations," Report, disponível no site <http://www.nerc.com/~filez/archives.html>, 1996.
- [2] Leite da Silva A. M., Costa J. G. C., Manso L. A. F., Anders, G. J., "Transmission Capacity: Availability, Maximum Transfer and Reliability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, pp. 843-849, 2002.
- [3] Hiskens, I. A., Pai, M. A., Sauer, P. W., " Dynamic ATC," apresentado em: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 3, pp. 1629, 2000.
- [4] Grijalva S., Sauer P. W., " Reactive power considerations in linear ATC computations " *Decision Support Systems*, Elsevier Science B. V., vol.30 pp. 327-340, 2001.
- [5] Grijalva S., Sauer P. W., Weber J. D., " Enhancement of linear ATC calculations by incorporating the effect of reactive power flows," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, 2003.
- [6] Wood A. J., Wollenberg B. F., *Power Generation, Operation and Control*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. NY., 1986.
- [7] Grijalva S., " Complex Flow-Based Non-Linear ATC Screening," Tese de Doutorado, Univ. Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL., 2002.
- [8] Greene S., Dobson I., Alvarado F. L., " Sensitivity of transfer capability margins with fast formula," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, n. 1, 2002.