



GRUPO VII
GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE REATORES CONVENCIONAIS E REATORES SATURADOS
ESTUDO DE CASO PARA A LT COLINAS - SOBRADINHO

Marcelo J. A. Maia* Jurandir A. C. M. Afonso de C. Jr L. A. Magnata da Fonte A. C. C. de Oliveira

CHESF

CHESF

UFPE

UFPE

UFPE

RESUMO

É comum no setor elétrico brasileiro priorizar investimentos em projetos de transmissão pautados em paradigmas clássicos, onde linhas convencionais são compensadas por reatores lineares. O presente trabalho oferece outros padrões para nortear tais empreendimentos, onde reatores saturados ocupam o lugar dos reatores lineares e onde linhas de potência natural elevada com reatores saturados substituem as linhas tradicionais com compensação série e reatores lineares. Além de um custo inferior, tais opções ensejam um crescimento da potência transmitida pelas linhas, como se demonstra no estudo de caso para a LT 500 kV Colinas-Sobradinho. Os resultados aqui apresentados confirmam a factibilidade da aplicação da tecnologia de reator saturado em sistemas de 500 kV.

PALAVRAS-CHAVE

Compensação de reativos, Reatores Lineares, Reatores saturados, Linha de potência natural elevada.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os estudos realizados pelo Ministério de Minas e Energia no âmbito do Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos (CCPE), (1) e (2), valendo-se, como premissa, de um cenário em que a região Nordeste importaria cerca de 4300 MW das regiões Norte e Sul, comprovaram a necessidade de implantação da LT 500kV Colinas – Ribeiro Gonçalves - São João do Piauí – Sobradinho. Através dessa interligação, uma potência adicional de 1200 MW seria somada às parcelas transmitidas entre Serra da Mesa e Correntina e de Presidente Dutra para Boa Esperança e Teresina, de sorte a totalizar o montante pretendido.

Posteriormente, (3) e (4), esse mesmo comitê promoveu o detalhamento desse empreendimento, cujas características básicas podem ser apreciadas na Figura 1. A orientação adotada em tais estudos foi por uma linha de transmissão típica de 500 kV com potência natural de 1200 MW, dispendo de compensação série e em

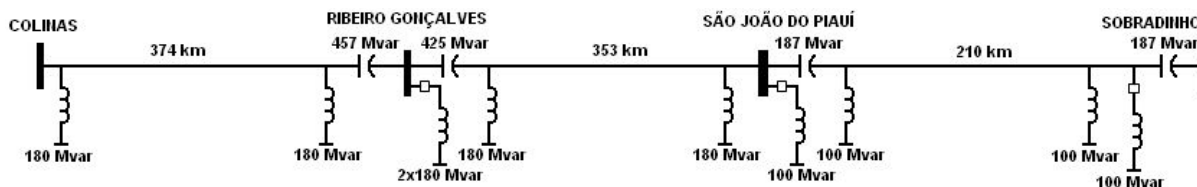


Figura1 – Configuração proposta pelo CCPE para a LT 500 kV Colinas - Sobradinho

*Rua Delmiro Gouveia, 333 – Bongi - CEP 50761-901 - Recife - PE - BRASIL
Tel.: (81) 3229-2757 - Fax: (81) 3229-2001 - e-mail: mjamaia@chest.gov.br

derivação, como assinala a Figura 1. As linhas do trecho Colinas-São João do Piauí são compensadas com reatores lineares de 180 Mvar em cada extremidade e estão previstos dois reatores de barras chaveáveis de 180 Mvar na subestação de Ribeiro Gonçalves. No trecho São João do Piauí-Sobradinho foram utilizados reatores de 100 Mvar, sendo dois destes localizados no terminal de Sobradinho, um dos quais é chaveado.

Em pesquisas realizadas, (5) e (6), ficou demonstrado que o uso de reatores lineares permanentemente conectados ao sistema converte tais equipamentos numa carga, cujo suprimento ocupará parte da capacidade das linhas de transmissão. Por outro lado, se tais reatores fossem retirados de operação, particularmente por ocasião da carga máxima do sistema, uma maior quantidade de carga poderia ser atendida sem qualquer investimento adicional, pois utilizaria a folga de transmissão obtida com a referida remoção. Como o risco de eventuais sobretensões oriundas de perturbações no sistema impede tal manobra, foi apontado como uma alternativa capaz de produzir os mesmos benefícios sem o ônus operacional correspondente, a aplicação de reatores saturados em substituição aos tradicionais reatores lineares. O desempenho transitório, as perdas e a distorção harmônica introduzida no sistema pelos reatores saturados também foram analisados em (5) e (6), e considerados adequados para as aplicações pretendidas.

A proposição do presente trabalho é, pois, examinar outras configurações para a linha de interligação Colinas a Sobradinho, fazendo uso, não somente, de reatores saturados para a compensação em derivação, mas também experimentando outras possibilidades, como as linhas de potência natural elevada - LPNE, as quais podem dispensar a aplicação da compensação longitudinal capacitiva.

2.0 – DEFINIÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES

O painel de alternativas para a concepção da LT 500 kV entre Colinas e Sobradinho abrangerá dois arranjos básicos para a linha em apreço, assim designados :

- CONFIGURAÇÃO A - Linha de transmissão convencional com a arquitetura estabelecida pelo CCPE e que se encontra ilustrada na Figura 1.
- CONFIGURAÇÃO B - Linha de transmissão de potência natural elevada e sem qualquer compensação série.

Para cada uma dessas opções, dois arranjos para a compensação em derivação serão examinados, a saber :

- VARIANTE 1 - Compensação por intermédio, unicamente, de reatores lineares.
- VARIANTE 2 - Compensação apenas por reatores saturados.

Nessas variantes, tanto os reatores lineares como os reatores saturados serão especificados de sorte a proporcionar o mesmo nível de compensação, ou seja, o mesmo perfil de tensão na condição operacional de carga mínima do sistema.

3.0 – METODOLOGIA DE ANÁLISE

A análise do desempenho das alternativas apresentadas consistirá no levantamento da máxima potência transmitida em estado permanente pelo eixo Colinas - Sobradinho, tomando-se, como ponto de partida para o carregamento, uma condição operacional única para todas; a condição em carga leve do sistema no ano de implantação do empreendimento, 2007, designada de caso-base. Com esse intuito, a rede elétrica nacional foi reduzida a um subsistema na imediata vizinhança das subestações de interesse, conforme ilustra a Figura 2, onde se destacam quatro barras de fronteira. Três dessas barras funcionam como fonte de potência, Miracema pela

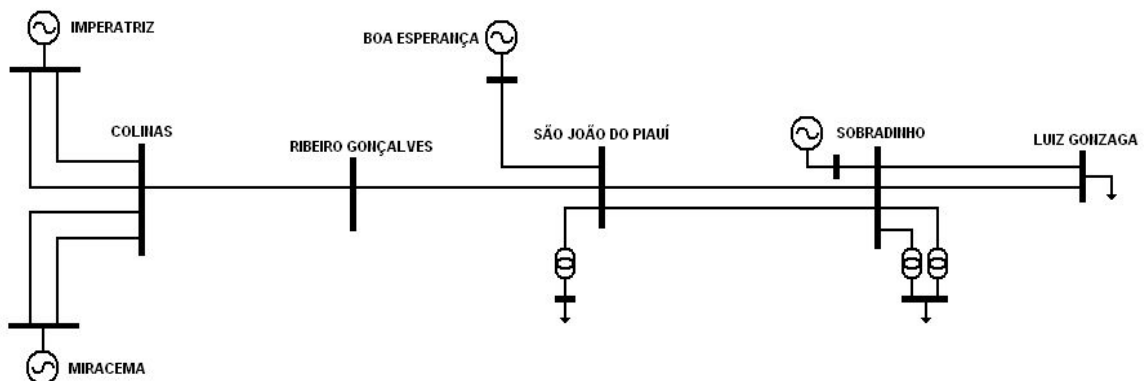


Figura 2 – Subsistema reduzido para os estudos de configuração da LT 500 kV Colinas - Sobradinho

região Sul, Imperatriz e Boa Esperança pela região Norte, e a quarta, Luiz Gonzaga, como o ponto de entrada de suprimento para a região Nordeste.

Desde que o objetivo desse estudo diz respeito à transferência de potência entre as regiões acima referidas, a contribuição da geração local, Usina de Sobradinho, será ignorada, sendo, para isso, mantida nas mesmas condições operacionais ditadas pela carga leve do sistema, ou seja, suprindo quase exclusivamente os alimentadores derivados das subestações do subsistema.

No tocante às cargas, três pontos de consumo estão registrados no diagrama da Figura 2, atendidos respectivamente a partir das subestações de São João do Piauí, Sobradinho e Luiz Gonzaga. Os dois primeiros, por se constituírem consumidores locais e, portanto, de pouca monta para a análise, terão a sua evolução desprezada, permanecendo durante todo o processo no estado inicial de carga. O último desses pontos, por outro lado, representa, verdadeiramente, a potência transferida pelo eixo Colinas – Sobradinho para a região Nordeste, de modo que centralizará toda a atenção do estudo.

Respeitados esses condicionantes, a seguinte estratégia será empregada para estabelecer a máxima potência transferida por uma dada configuração :

- Iniciar com o sistema em carga leve ;
- Elevar gradualmente a carga ativa na barra Luiz Gonzaga, mantendo as demais invariáveis ;
- Cessar a simulação quando a tensão numa das barras de carga alcançar 0.95 p.u., valor mínimo tolerado.

Os contornos ora fixados para a presente análise caracterizam, de fato, uma situação muito simplificada, principalmente quando confrontados com os trabalhos desenvolvidos no âmbito do CCPEE, (1), (2), (3) e (4), onde o desempenho da LT Colinas-Sobradinho foi testado no sistema interligado nacional (SIN), tanto em condições normais de operação como em contingências.

4.0 – EQUIVALENTE NAS BARRAS DE FRONTEIRA

O crescimento da carga na região Nordeste, aqui representada pela barra Luiz Gonzaga, exigirá sempre uma contrapartida por parte das regiões Norte e Sul, as quais deverão promover a injeção, nas barras de fronteira, da potência ativa necessária para atender a tal elevação da demanda. Evidentemente que a contribuição de cada região será proporcional à distância elétrica entre o ponto de consumo e a fonte correspondente e, nessas circunstâncias, o valor da impedância equivalente em cada barra de fronteira exercerá um papel importante na repartição desses diferentes fornecimentos.

$$|I| = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{|V_2|}, \quad \theta = \text{tg}^{-1}\left(\frac{Q}{P}\right) \quad (1)$$

Para a inclusão desses elementos no subsistema da Figura 2, barras fictícias foram criadas, as quais se interligam com as barras de fronteiras através da impedância de curto-circuito vista nos pontos respectivos e cuja tensão de trabalho deverá ser determinada de tal modo que não produza qualquer interferência no fluxo de potência original

$$|V_1| = \frac{x_{eq}|I|\cos\theta + r_{eq}|I|\sin\theta}{\sin\alpha}, \quad \alpha = \text{tg}^{-1}\left(\frac{x_{eq}|I|\cos\theta + r_{eq}|I|\sin\theta}{|V_2| - x_{eq}|I|\sin\theta + r_{eq}|I|\cos\theta}\right) \quad (2)$$

do subsistema. Um exame dos diagramas da Figura 3 permite estabelecer a corrente em cada barra de fronteira como :

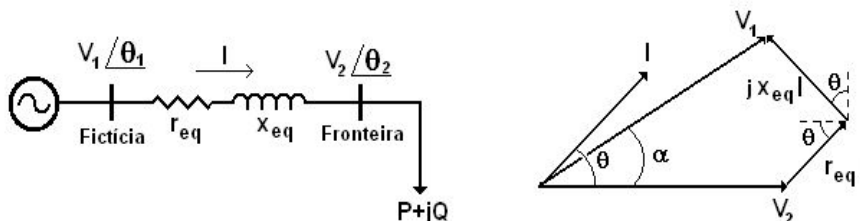


Figura 3 – Representação do equivalente do sistema externo nas barras de fronteira

sendo V_2 , a tensão, e P e Q , as potências injetadas na barra de fronteira. Também da Figura 3 deduz-se a magnitude e a fase da tensão na barra fictícia como :

Em todas as simulações, as barras fictícias serão declaradas como de referência ("slack"), o que habilitará as mesmas ao fornecimento de qualquer valor de potência solicitada pela carga. Apenas para a barra de Boa Esperança será imposta uma limitação de 408 MW, pois esse é valor máximo estabelecido para essa fonte pelos

estudos do CCPE. Assim, sempre que esse limite for ultrapassado nas simulações, tal barra sofrerá uma comutação para o tipo tensão controlada com a potência ativa fixada no patamar indicado.

5.0 – REPRESENTAÇÃO DOS REATORES SATURADOS

Os reatores saturados são equipamentos concebidos para somente admitirem a circulação de corrente nos enrolamentos quando a tensão aplicada aos terminais dos mesmos exceder um dado valor, denominado de tensão de início de saturação, exatamente V_s na característica operacional da Figura 4. Para os estudos de estado

$$x_s = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_n - V_s}{I_n} = \left(\frac{V_n - V_s}{I_n} \right) \left(\frac{V_n}{V_n} \right) = \frac{(V_n - V_s)V_n}{Q_n} \quad (3)$$

permanente, um modelo matemático simplificado proposto no trabalho (7) é utilizado para tratar tal comportamento, o qual é composto por uma fonte de tensão de valor V_s em série com uma reatância não-linear x , como ilustra a Figura 4. Segundo esse modelo, enquanto a tensão no ponto da conexão, V , situar-se abaixo de V_s , a reatância x assumirá um valor bastante elevado, coibindo, assim, o trânsito de qualquer corrente nos circuitos do reator. Por outro lado, quando tal tensão igualar-se ou ultrapassar V_s , a corrente será ditada por uma reatância x_s ,

$$x_s^{pu} = \frac{x_s}{V_b^2 / Q_b} = \left(\frac{V_n - V_s}{V_b} \right) \left(\frac{V_n}{V_b} \right) \left(\frac{Q_b}{Q_n} \right) \quad (4)$$

a qual reproduz, fielmente, a inclinação da característica tensão versus corrente especificada para o reator.

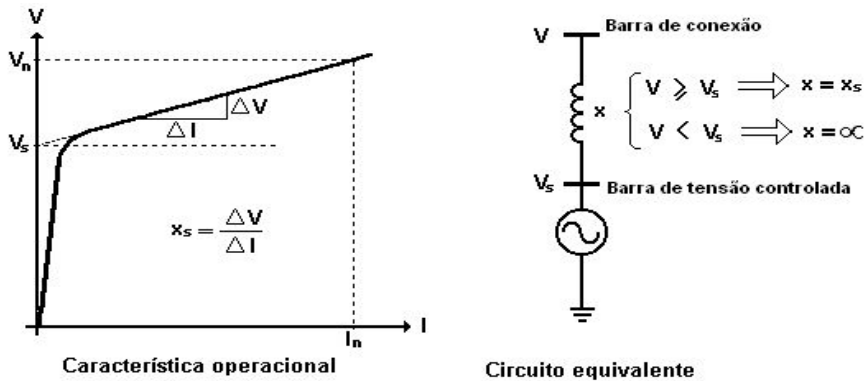


Figura 4 – Modelo do reator saturado para os estudos de estado permanente

Admitindo-se uma aproximação por segmentos de reta para essa característica, deduz-se da Figura 4 que :

em que V_n , I_n e Q_n são, respectivamente, a tensão, a corrente e a potência nominais do reator. Em p.u., essa reatância será dada por :

em que V_b e Q_b são os valores de base da tensão e da potência.

Para a implementação de tal modelo num programa de fluxo de potência, a barra interna do reator deverá assumir o papel de uma barra de tensão controlada, Figura 4, de intensidade V_s e com uma potência ativa nula, sendo a conexão da mesma ao sistema efetuada mediante a reatância não-linear acima definida. Ora, como não se dispõe no ANAREDE, programa oficial do setor elétrico, dos recursos necessários para tal simulação, um outro programa, designado FPSAT, foi desenvolvido com essa finalidade no âmbito do LDSP-DEESP-UFPE. O FPSAT utiliza a linguagem MATLAB, é inteiramente compatível com o ANAREDE no que tange aos dados de entrada e utiliza o mesmo método de Newton para a solução das equações da rede.

6.0 – CASOS-BASE

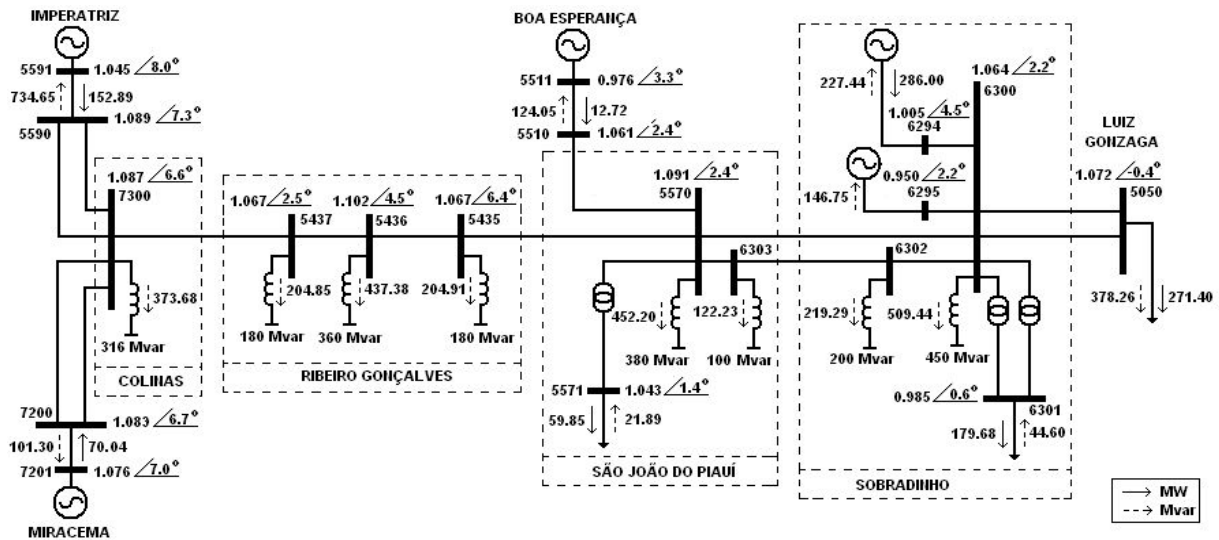


Figura 5 – Caso-base para o subsistema originalmente concebido pelo CCPE (Configuração A1)

6.1 Configuração A1

O fluxo de potência para a configuração proposta pelo CCPE, configuração A1, foi extraído do arquivo ANAREDE referente à carga leve para o ano de 2007 do sistema elétrico brasileiro e prestou-se como referência para a montagem de todos os casos analisados no presente trabalho. A Figura 5 registra as informações mais relevantes desse fluxo de potência e um exame desses dados mostra que, nessa condição operacional, as cargas internas do subsistema, alimentadas a partir de São João do Piauí e de Sobradinho, equivalem praticamente à geração da Usina de Sobradinho e que a potência transferida para a região Nordeste em Luiz Gonzaga corresponde ao suprimento assinalado nas barras de fronteira, Imperatriz, Miracema e Boa Esperança. As barras 5511, 5591 e 7201 no diagrama da Figura 5 representam as barras fictícias de fronteira com as regiões Norte e Sul.

6.2 – Configuração B1

Na configuração B1, as linhas de transmissão convencionais interligando Colinas a Sobradinho, propostas nos estudos do CCPE e constantes da Figura 1, deram lugar a linhas de potência natural elevada (LPNE), para as quais se admitiu, como parâmetros típicos, uma reatância 20% inferior, uma susceptância correspondentemente maior e a mesma resistência ôhmica das linhas substituídas. A compensação longitudinal capacitiva presente nas

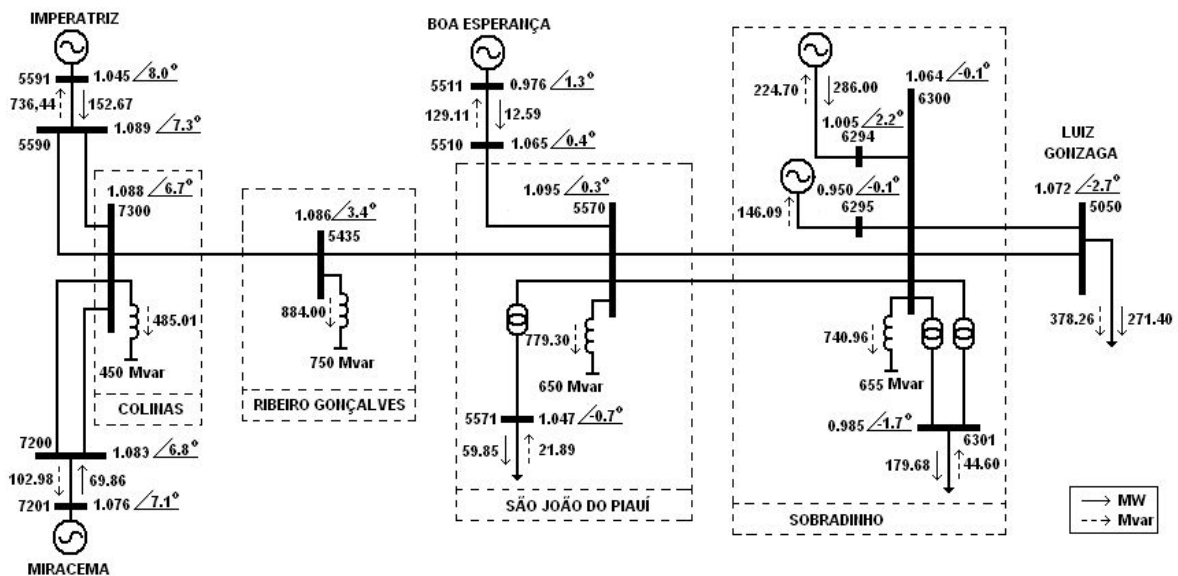


figura 6 – Caso-base para o subsistema com linhas de potência natural elevada (Configuração B1)

linhas da Figura 1 foi removida da nova configuração, de modo que as barras designadas por 5436, 5437, 6302 e 6303 na Figura 5 não fazem parte da Figura 6. Na montagem do caso-base para esse arranjo, efetuada com o auxílio do programa FPSAT, a pretensão foi reproduzir, o mais fielmente possível, o fluxo de potência de referência, ou seja, o fluxo do sistema original em carga leve, Figura 5. Para isso, o módulo da tensão nas barras de fronteira e as cargas foram fixadas nos valores apontados pela Figura 5, enquanto o ângulo dessas tensões e a potência nominal dos reatores lineares funcionaram como parâmetros para a ajustagem do fluxo. Com esse

expediente, alcançou-se os resultados assinalados na Figura 6 para o perfil da tensão nas barras do subsistema e para a potência nas fontes equivalentes, valores bastante próximos da referência.

6.3 – Configurações com reatores saturados

Na configuração A1, Figura 5, os reatores lineares de interesse são aqueles aplicados nas barras 7300 em Colinas, 5435, 5436 e 5437 em Ribeiro Gonçalves, 5570 e 6303 em São João do Piauí e 6302 em Sobradinho,

$$s = 100 \left(\frac{V_n - V_s}{V_s} \right) \quad (5)$$

enquanto na configuração B1, Figura 6, o objetivo é a substituição dos reatores conectados às barras 7300, 5435,

$$V_n = V_s \left(1 + \frac{s}{100} \right) \quad (6)$$

5570 e 6300. No dimensionamento dos reatores saturados substituídos adotaram-se como valores nominais, precisamente V_n e I_n na Figura 4, a tensão e a potência de trabalho dos reatores lineares no caso-base correspondente. Assim, por exemplo, o reator saturado para a barra 7300 de Colinas na configuração A1 deverá desenvolver 373,68 Mvar em 543,5 kV (1,087 p.u.). Com essa orientação pretende-se atingir o mesmo nível de compensação do sistema obtido com os reatores lineares, haja vista que, optando por tais regras de projeto, o fluxo de potência será exatamente o mesmo nas configurações com os dois tipos de reatores.

Fundamentados nessa premissa, decidiu-se utilizar duas classes de reatores saturados para os experimentos no eixo Colinas-Sobradinho; a primeira categoria foi especificada para uma variação de 5% na tensão entre a operação em vazio e a plena carga, e a segunda com 10% para essa queda de tensão. Assim, a relação entre V_s e V_n será regulada por essa grandeza, pois de acordo com a Figura 4 tem-se :

onde s é a variação de tensão acima especificada. Deste modo :

As equações (4) e (6), juntamente com os valores de base definidos pelo ANAREDE para a tensão e a potência, 500 kV e 100 MVA respectivamente, permitem a definição dos parâmetros para o modelo do reator saturado utilizado pelo programa FPSAT, exatamente o valor da tensão na barra de tensão controlada, V_s , e a reatância para a barra do sistema, x_s , conforme está expresso na Figura 4.

7.0 – MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA

A aplicação dos procedimentos prescritos no tópico 3.0 desse trabalho às diferentes configurações delineadas para eixo Colinas-Sobradinho proporcionou, para o limite de transferência de potência das regiões Norte e Sul para o Nordeste, os valores constantes da Tabela 1 sem qualquer infração ao critério de tensão mínima de 0,950 p.u. nas barras de cargas do subsistema, 5050, 5571 e 6301. É evidente de um exame desses dados que a simples substituição dos reatores lineares, configurações A1 e B1, por saturados, configurações A2 e B2, logrou uma elevação significativa da potência entregue à região Nordeste, que até mesmo ultrapassou a potência natural das linhas em questão, 1200 MW.

TABELA 1 – Carregamento máximo para o subsistema compensado por reatores lineares e saturados

		FORNECIMENTO (MW)			CARGA Luiz Gonzaga (MW)	TRÂNSITO NAS LINHAS (MW)		
		Boa Esperança	Imperatriz	Miracema		Colinas R.Gonçalves	R.Gonçalves S.J.do Piauí	S.J.do Piauí Sobradinho
CONFIGURAÇÃO A1		271,58	404,50	304,26	970,00	700,55	688,97	528,09
CONFIGURAÇÃO A2	Reatores 5%	408,00	607,60	495,19	1433,00	1093,04	1066,19	806,71
	Reatores 10%	378,48	512,59	405,99	1250,00	908,09	889,21	695,86
CONFIGURAÇÃO B1		310,00	349,73	253,47	910,00	596,43	588,15	285,33
CONFIGURAÇÃO B2	Reatores 5%	408,00	716,50	596,28	1600,00	1296,57	1257,50	529,54
	Reatores 10%	408,00	583,89	472,33	1390,00	1044,24	1019,01	454,03
	Reatores 5% + 10%	408,00	646,29	530,64	1490,00	1163,08	1131,85	486,97
CONFIGURAÇÃO ESPECIAL	Reatores 5% + Lineares	408,00	632,36	517,57	1469,00	1136,58	1106,05	829,15

O mecanismo responsável pelo notável crescimento observado está relacionado com a característica operacional dos reatores saturados, Figura 4, a qual produz uma importante redução da potência solicitada pelos mesmos à medida que a tensão do sistema diminui com a evolução da carga, o que também é verificado nos reatores lineares, porém numa escala bem menor. Como ilustração, os reatores lineares da configuração A1 solicitou 3.328,57 Mvar contra 2.626,31Mvar dos reatores saturados da configuração A2, caracterizando uma queda de mais de 20%. Esse comportamento favorável poderá, por outro lado, produzir efeitos indesejáveis, particularmente quando as linhas possuírem compensação longitudinal capacitiva, pois, nesse caso, a redução da compensação em derivação elevará a tensão nas barras além do permitido. Tal evento foi constatado na configuração A2 com reatores saturados de 5% de inclinação, quando a tensão atingiu 1.129 p.u. na barra 5437 de Ribeiro Gonçalves, o que exigiu a permanência dos reatores lineares originais nas barras 5435 e 5436 dessa subestação. Paradoxalmente, a potência fornecida à região Nordeste exibiu um ligeiro crescimento com a aplicação dessas medidas, como mostra a última linha da Tabela 1 rotulada de configuração especial, pois, com a redução da tensão, o consumo total dos reatores em operação manteve-se praticamente imutável, variando de 2.626,31 para, apenas, 2.630,99 Mvar.

Por razões similares, o desempenho das configurações que utilizam reatores saturados agrava-se com a elevação da inclinação desses reatores, não importando o tipo da linha de transmissão, se convencional ou de potência natural elevada, como assinala a Tabela 1. Diversamente, os custos de construção de um reator saturado reduzem-se com o crescimento dessa inclinação, já que uma menor quantidade de materiais ativos, ferro e cobre, será requerida para a produção do mesmo.

8.0 – CUSTOS DAS ALTERNATIVAS

A estimativa dos investimentos necessários para a consecução de cada uma das alternativas descritas para o eixo Colinas-Sobradinho será efetuada, tendo-se em conta, para simplificar os procedimentos, apenas as variações decorrentes da remoção e/ou troca de equipamentos. Nesses termos, as configurações diferem entre si quanto ao tipo de reatores em uso e se portam ou não compensação capacitiva, de modo que a avaliação dos dispêndios financeiros requeridos pelas mesmas deverá ser estabelecida com base no preço de aquisição de cada um desses equipamentos.

O custo individual dos reatores lineares e dos capacitores foi estabelecido compulsando-se a tabela elaborada pela ELETROBRÁS, (8), e promovendo interpolações ou extrapolações quando necessário. Com respeito aos reatores saturados, os estudos efetuados no âmbito LDSP, (9), demonstraram que esses equipamentos são similares em termos construtivos aos transformadores e, ainda mais, que exigem uma quantidade de material ativo (Ferro e cobre) igual ou inferior àquele despendido por um transformador de dois enrolamentos, de idêntica potência e operando na mesma tensão primária. Assim, omitindo-se os encargos relacionados com a tecnologia, com a escala de produção, e com a oportunidade do negócio, uma estimativa de preço para os reatores saturados será dada pelos valores fornecidos pela ELETROBRÁS, (8), para os transformadores trifásicos de 500 / 13.8 kV de mesma potência. Adicionalmente, para simplificar a análise, não foi considerada qualquer diferença de custo entre reatores saturados de 5 e 10 % de inclinação, muito embora os últimos utilizem uma quantidade menor de material.

Amparados nessas hipóteses, procedeu-se o cálculo dos investimentos exigidos por cada uma das configurações propostas na Tabela 1 para a LT Colinas-Sobradinho, estando os resultados parciais e globais dessa operação reunidos na Tabela 2.

TABELA 2 – Custos das diferentes configurações examinadas para a LT Colinas-Sobradinho

	CUSTO (10 ³ US \$)			CUSTO TOTAL (10 ³ US \$)
	REATOR		CAPACITOR	
	LINEAR	SATURADO		
CONFIGURAÇÃO A1	57.195,24	—	43.632,00	100.827,24
CONFIGURAÇÃO A2	—	18.786,16	43.632,00	62.418,16
CONFIGURAÇÃO ESPECIAL	17.430,60	13.066,36	43.632,00	74.128,96
CONFIGURAÇÃO B1	90.545,00	—	—	90.545,00
CONFIGURAÇÃO B2	—	25.084,40	—	25.084,40

Como se constata na Tabela 2, a aplicação de reatores saturados para a compensação em derivação das linhas convencionais proporcionou uma economia entre US \$ 38.409,08×10³ (Configuração A2) e 26.698,28×10³ (Configuração Especial), cerca de 38 e 26% respectivamente menor que a tradicional compensação via reatores lineares..

Quanto às alternativas que incorporam as linhas de potência natural elevada (Configurações B1 e B2), os dados constantes da Tabela 2 mostram que o uso dessa tecnologia somente será factível, do ponto de vista financeiro, quando a compensação for realizada através de reatores saturados, fato já conhecido entre os estudiosos. A economia advinda da configuração B2 atingirá a considerável importância de US\$ 75.742,84×10³, portanto, 75% inferior ao desembolso previsto pela configuração A1, isso ignorando-se os custos de construção dos dois tipos de linhas de transmissão

9.0 – CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho demonstra as vantagens auferidas com a aplicação dos reatores saturados para a compensação em derivação de sistemas de transmissão. No caso ora apreciado, a transferência de potência das regiões Norte e Sul para o Nordeste por intermédio do eixo Colinas-Sobradinho cresceu de 970 MW, para 1469 MW (Tabela 1 – Configuração Especial) com a simples troca dos reatores, um ganho de mais de 51% obtido a um custo 26% menor. Tais benefícios foram ainda mais expressivos quando se empregou linhas de potência natural elevada para a composição do subsistema em apreço, pois, nessa conjuntura, a potência transmitida aumentou de cerca de 65% com um desembolso financeiro 75% inferior (Tabela 1 – Configuração B2 – Reatores 5%) .

É certo que os resultados apontados acima foram coligidos para uma situação bastante particular, pois se estabeleceu o máximo carregamento das diferentes configurações do eixo Colinas-Sobradinho para uma rede equivalente e a partir de uma condição operacional arbitrariamente escolhida. Desse modo, uma avaliação exata da extensão desses ganhos para o projeto Colinas-Sobradinho do CCPE exigiria simulações no sistema interligado nacional (SIN), o que extrapola o escopo do presente trabalho.

Também é importante registrar que questões consideradas relevantes no tocante ao comportamento operacional dos reatores saturados, tais como o desempenho transitório, as perdas e a distorção harmônica introduzida no sistema, foram detalhadamente examinadas em trabalhos anteriores, (5) e (6), tendo-se comprovado um excelente desempenho desses reatores.

O êxito do presente trabalho deveu-se à elaboração no âmbito do LDSP-DEESP-UFPE de um programa de fluxo de potência, FPSAT, habilitado à representação dos reatores saturados na forma simplificada descrita no tópico 5.0. Assim, recomenda-se que nos programas em uso pelo setor elétrico brasileiro, desenvolvido pelo CEPEL (ANAREDE, FLUPOT e ANATEM), sejam implementados esse modelo do reator saturado para que possam ser feitas as avaliações de desempenho do sistema interligado nacional (SIN) considerando esse tipo de tecnologia. Tal implementação possibilitará aos agentes do setor avaliar os benefícios dessa tecnologia em projetos existentes e futuros.

10.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CCPE/CTET - 044/2001, Expansão da interligação Norte/Nordeste - Etapa 1 - Concepção de alternativas, dezembro de 2001.
- (2) CCPE/CTET - 005/2002, Expansão da interligação Norte/Nordeste - Etapa 2 – Análise em regime permanente e dinâmico, maio de 2002.
- (3) CCPE/CTET - 007/2004, Análise de viabilidade técnica e econômica da LT 500 kV Colinas - Ribeiro Gonçalves - São João do Piauí - Sobradinho, março de 2004.
- (4) CCPE/CTET - 019/2004, Estudos para definição das características básicas da LT 500 kV Colinas - Ribeiro Gonçalves - São João do Piauí - Sobradinho, junho de 2004.
- (5) CARVALHO, M. A., FONTE, L. A. M., Increasing the capacity of long EHV transmission lines, IEEE / PES Transmission and Distribution Latin America Conference, São Paulo, 2001.
- (6) CARVALHO, M. A., FONTE, L. A. M., Steady state and transient voltage control on long EHV transmission lines, IEEE / PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta, 2001.
- (7) THANAWALA, H. L., YOUNG, D. J., Saturated reactors : Some recent applications in power systems, Energy International, vol.17, no.11, november 1970.
- (8) ELETROBRÁS, Referência de custos, março de 2000.
- (9) FONTE, L.A.M., Desenvolvimento de reatores com saturação natural para aplicação em sistemas de potência, Tese de Doutorado, UFPE, fevereiro de 2004.