



GPL/018
21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

GRUPO VII

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

OTIMIZAÇÃO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO BASEADA EM TRADE - OFF "CUSTO x EENS" E EM INDICADOR DE MÉRITO ECONÔMICO – METODOLOGIA E ESTUDO DE CASO CHESF

* João Ricardo Paes de Barros

Ascendino Flávio Dias da Silva

Albert Cordeiro G. de Melo

CHESF

UFPE

CEPEL

RESUMO

Este artigo descreve uma abordagem metodológica para planejamento da expansão de sistemas de transmissão de grande porte [1], indicando os modelos e critérios utilizados para definir as seqüências ótimas de adições de reforços de transmissão. A viabilidade da metodologia é demonstrada através dos resultados bastante coerentes, obtidos para a área Leste do sistema CHESF, onde foi possível formular configurações evolutivas aderentes ao crescimento do mercado de energia elétrica previsto.

No contexto atual e com uma concepção voltada para o futuro, infere-se que esta abordagem metodológica torna-se cada vez mais realista, uma vez que a técnica tradicional de seleção de alternativas e as baseadas em programação matemática, entre as pesquisadas [1], enfatizam apenas o aspecto de investimento do problema do planejamento da expansão da transmissão a multiestágios de tempo.

PALAVRAS-CHAVE

Planejamento da Expansão da Transmissão – Otimização – Confiabilidade – Indicador de Mérito Econômico.

1.0 INTRODUÇÃO

A introdução da competição nos mercados de energia elétrica impõe necessidades específicas ao processo do Planejamento da Expansão da Transmissão - *PET* a multiestágios de tempo, as quais estão sumarizadas nos seguintes aspectos:

- Maximização de benefícios do sistema de transmissão, reconhecendo que múltiplos agentes e aspectos da sociedade beneficiam-se deles;
- Minimização de custos, tanto na transmissão quanto no mercado de energia elétrica. Este aspecto de custo complementa o objetivo de prover o mercado competitivo de suprimento de energia, justo e equitativo, de forma que a competição possa conduzir a preços mais baixos para a tarifa de energia;
- Estabelecimento de um nível adequado de confiabilidade e de reserva de capacidade de transmissão que resulte em uma menor tarifa de energia para os consumidores finais.

Para atender as necessidades específicas acima mencionadas, reconhecendo que o *PET* deva ser elaborado de forma eficiente, no sentido de contribuir para redução da tarifa de energia para os consumidores finais, torna-se necessário explorar o caráter combi-

natório das adições de reforços de transmissão a serem implantados na rede em um determinado horizonte de planejamento.

Além destes aspectos, os agentes geradores também irão pressionar para que a rede de transmissão não seja expandida a qualquer custo, para que eles possam tomar suas decisões apoiadas não apenas nos seus custos de instalação e de combustível, sem se importarem com os custos de uso do sistema de transmissão.

2.0 OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo apresentar os aspectos conceituais de uma metodologia de otimização da expansão da transmissão baseada em modelos e critérios construídos com a finalidade de:

- Reduzir ramos da árvore de configurações evolutivas, através de um modelo e critério de parada de postergações de adições de reforços de transmissão;
- Hierarquizar alternativas com características bastante heterogêneas, por meio de um indicador de mérito econômico;
- Selecionar a alternativa de expansão ótima, via um modelo e critério baseado em técnica de trade-off "Custo x EENS".

Mais, ainda, mostrar os principais resultados da aplicação dos referidos modelos e critérios ao problema da expansão da transmissão do sistema descrito a seguir.

Com o uso desta metodologia é possível explorar a característica combinatória exigida no processo de otimização da expansão da transmissão e oferecer uma solução que possa ser implementada na prática e que seja compatível com os requisitos de maximização dos benefícios, minimização dos custos e estabelecimento de um nível de confiabilidade que contribua para uma menor tarifa de energia para os consumidores finais.

3.0 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Historicamente, o planejamento da expansão da transmissão foi realizado tomando-se como referência o critério de "N-1" componentes para dimensionamento do sistema. Este critério por se basear na análise das piores situações (contingências simples) e no uso de fatores de segurança podem, em muitos casos, levar a investimentos elevados, causados pela implantação desnecessária de redundâncias e sobre-dimensionamentos.

No outro extremo tem-se o critério "N", no qual o sistema de transmissão é dimensionado para atender o mercado de energia so-

mente em condições normais de operação. A utilização indiscriminada deste critério, sem quantificar o real impacto na qualidade de suprimento, também pode levar a situações indesejáveis sob o aspecto de baixo nível de confiabilidade de atendimento às cargas.

Observa-se, entretanto, que para formular configurações evolutivas entre estes dois critérios extremos torna-se necessário explorar o caráter combinatório das adições de reforços de transmissão possíveis de serem implantados em um determinado horizonte de planejamento. Surge, então, o problema de ordenar, comparar e pré-selecionar Alternativas de Expansão da Transmissão – AET com características bastante heterogêneas, no que diz respeito aos custos de investimentos, de potência de perdas ativas e de níveis de confiabilidade, e finalmente, selecionar a AET ótima.

O dimensionamento da rede básica de transmissão através destes dois critérios não atende ao requisito da nova estrutura da indústria de energia, visto que o principal objetivo do PET, é produzir um programa determinativo que permita uma competição justa nos ambientes da comercialização e da geração de energia elétrica. Note que há uma diferença primordial neste novo objetivo em relação à estrutura anterior: a possibilidade de competição justa no ambiente. Ou seja, enquanto a estrutura anterior estava voltada para minimizar os custos tanto na transmissão quanto no mercado de energia elétrica, a nova estrutura competitiva requer que a expansão da transmissão contribua para redução da tarifa.

Este aspecto resulta em uma mudança substancial na “função custo”, impondo que o processo de PET a multiestágios de tempo leve em consideração a otimização dos níveis de reserva de capacidades de transmissão e da confiabilidade de atendimento aos consumidores, e conseqüentemente maior gerenciamento da rede elétrica e maior contribuição para que ocorra uma competição justa.

O problema consiste, então, em estabelecer uma metodologia de amplo espectro que otimize a expansão da transmissão que contemple, simultaneamente, todas estas necessidades durante o processo de otimização da seqüência de adições de reforços e aponte a solução ótima. Para execução desta abordagem metodológica tornam-se necessários os modelos e os critérios descritos a seguir.

4.0 MODELOS UTILIZADOS

4.1 Modelo de Parada de Postergação

Diante da característica combinatória resultante do procedimento de formulação de AET com características heterogêneas, ou seja, dos sistemas intermediários - SI, torna-se necessário o estabelecimento de um mecanismo que reduza, de forma eficiente, as postergações de adições de reforços por um ou mais anos que resultem em elevados de custos de Expectativa de Energia Não Suprida – EENS, ramos da Árvore de Configurações Evolutivas – ACE gerada.

O CPPR proposto está em consonância com o conceito de benefício econômico - custo, o qual estabelece que a condição de aceitabilidade de um investimento pode ser resumida pela expressão (1), onde o primeiro membro da equação mostra os benefícios emergentes da postergação de investimentos, enquanto que o segundo membro corresponde aos custos ocasionados pelas postergações das adições dos reforços.

$$\Delta^- CINV_p^{RS \rightarrow I} \geq \Delta^+ CENS_p^{RS \rightarrow I} + \Delta^+ CPPA_p^{RS \rightarrow I} \quad (1)$$

4.1.1 Critério de Parada de Postergação de Reforços

Considera-se economicamente atrativa a postergação de um ou mais adições de reforços por um ou mais anos “k”, se o valor da redução do custo de investimento for igual ou superior ao valor do acréscimo do custo da EENS mais o acréscimo do custo da PPA, resultantes das postergações das adições dos reforços.

Considerando o Custo Unitário de Interrupção – Cuf independente da duração da interrupção, ou seja, constante, deduz-se que:

$$Cuf \leq \left(\frac{\tau \times INV_0^{RS \rightarrow I}}{fr(\tau, k)} - \sum_{k=1}^p \frac{\Delta^+ CPPA_k^{RS \rightarrow I}}{(1+\tau)^k} \right) / \left(\sum_{k=1}^p \frac{\Delta^+ EENS_k^{RS \rightarrow I}}{(1+\tau)^k} \right) \quad (2)$$

Onde,

$\Delta^- CINV_k^{RS \rightarrow I}$ - redução do custo de investimento por cada ano “k” de postergação de reforço;

$\Delta^+ CENS_k^{RS \rightarrow I}$ - acréscimo do custo de EENS por cada ano “k” de postergação de reforço;

$\Delta^+ CPPA_k^{RS \rightarrow I}$ - acréscimo do custo de PPA por cada ano “k” de postergação de reforço.

$\tau \cdot INV_k$ - redução do custo de investimento por cada “k” ano de postergação de adição de reforço.

Observe que o segundo membro da equação (2) tem a mesma dimensão do Cuf, ou seja, de US\$/MWh, e pode ser interpretado como um Custo Equivalente de Interrupção do Sistema - Ceis, associado aos anos do período de postergação “p”. Com esta concepção, a condição de parada de postergação de adições de reforços do sistema de referência superior S^{RS}, para qualquer sistema intermediário S^I, ocorre quando a relação (3) for atendida.

$$Cuf \geq Ceis_p^{RS \rightarrow I} \Rightarrow Ceis_p^{RS \rightarrow I} \leq Cuf \quad (3)$$

Neste sentido, o indicador econômico Ceis tem a capacidade de identificar e eliminar, durante o processo de formulação das configurações evolutivas, as AET situadas em regiões extremas do plano cartesiano “CTOTeq x EENS_{eq}”, ilustradas na Figura 1.

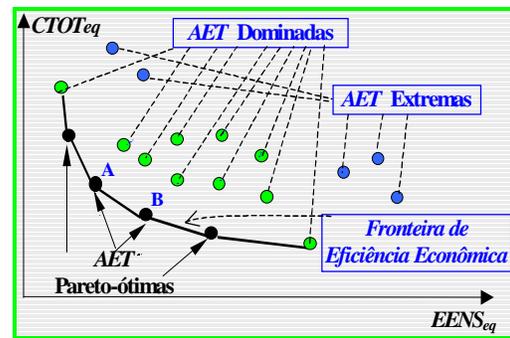


FIGURA 1: Ilustração Gráfica das AET Extremas/Dominadas, da FEE e Localização das AET Pareto-Ótimas.

4.2 Modelo de Hierarquização das Alternativas

Inspirado na análise de benefício econômico e custo de projetos, utilizado como ferramenta da engenharia econômica, o método proposto para comparação e hierarquização do conjunto de AET heterogêneas, baseia-se em um indicador econômico, denominado de Indicador de Mérito Econômico – IMEeq.

Este indicador de mérito econômico é expresso por uma relação incremental custo-benefício econômico, onde o benefício econômico incremental está associado ao alívio financeiro resultante de

postergações de reforços de transmissão e é medido pela redução do custo de investimento equivalente -

Já o custo incremental corresponde a degradação das condições operativas, em condição de contingências simples, decorrentes dos adiamentos das adições de reforços e é medido pelo acréscimo do custo de $EENS_{eq}$ mais PPA_{eq} , ou seja, pela equação:

$$\Delta^+ CMWh_{(eq)} = \Delta^+ CENS_{(eq)} + \Delta^+ CPPA_{(eq)} \quad (4)$$

A designação incremental é aplicada no sentido de se trabalhar com valores diferenciais em relação ao sistema de referência superior - S^{RS}_{eq} , que retrata, por exemplo, uma AET dimensionada com critério de "N-1" componentes da rede de transmissão.

Assim, considerando as definições acima e as variações de custos incrementais equivalentes apresentadas nesta tabela, a expressão do IME_{eq} toma a seguinte forma algébrica:

$$IME_{z(eq)} = \frac{\Delta^- CINV_{(eq)}}{\Delta^+ CMWh_{(eq)}} = \frac{\Delta^- CINV_{(eq)}}{\Delta^+ CENS_{(eq)} + \Delta^+ CPPA_{(eq)}} \quad (5)$$

Onde;

$$\Delta^+ CENS_{(eq)} = Cuf \times [EENS_{(eq)}^{RS} - EENS_{(eq)}^{a^{(-)}}] \quad (6)$$

$$\Delta^+ CPPA_{(eq)} = Cup \times [PPA_{(eq)}^{RS} - PPA_{(eq)}^{a^{(-)}}] \quad (7)$$

$a^{(-)}$ - significa que o S^{RS}_{eq} está excluído dos cálculos de $EENS_{eq}$ e de PPA_{eq} .

4.2.1 Critério de Hierarquização das Alternativas

O critério de hierarquização de AET proposto é feito através do maior para o menor valor de IME_{eq} , ou seja, através da maior para a menor relação entre o benefício econômico incremental resultante do adiamento e o custo incremental de $EENS$ mais PPA , proveniente das postergações das adições dos reforços.

Em resumo, procura-se as configurações evolutivas dos sistemas de transmissão localizados em uma região do espaço cartesiano $CINV_{eq} \times EENS_{eq}$ tal que a inclinação não seja muito acentuada, significando que uma pequena variação na parcela de custo equivalente $CMWh_{eq}$ resulta em uma acentuada variação na parcela de custo equivalente $CINV_{eq}$.

Vale salientar que, além de ordenar as AET heterogêneas o indicador IME , conforme concebido, também permite identificar as AET que se localizam na curva de trade-off " $CTOT_{eq} \times EENS_{eq}$ ", e próximas a esta, conforme ilustrada na Figura 1. As AET assim localizadas são denominadas de Pareto-ótimas.

4.3 Modelo de Seleção das AET Pareto-ótimas

Em situações de tomada de decisão baseada em múltiplos objetivos, mais especificamente sob dois objetivos conflitantes como está sendo tratado, freqüentemente, se pesquisa pela solução Pareto-Ótima para o PET .

No contexto dos dois objetivos $CTOT_{eq}$ e $EENS_{eq}$, um sistema, por exemplo, $S^A_{(eq)}$ tecnicamente viável para o problema de dois objetivos, é considerado como uma solução Pareto-ótima se nenhum outro sistema, por exemplo S^B_{eq} , também tecnicamente viável, é pelo menos economicamente tão eficiente quanto o sistema S^A_{eq} , com relação aos dois objetivos e estritamente melhor que o sistema S^A_{eq} , no que diz respeito a pelo menos um objetivo.

Com esta concepção as soluções Pareto-ótimas para o problema do PET a multistágios de tempo, são constituídas pelos sistemas de transmissão S_{eq} pertencentes a um conjunto reduzido, aqui denominado de Conjunto de Decisão - CD , composto de AET não dominadas e de maiores relações de benefícios econômicos/custo, situadas sobre a curva de Fronteira de Eficiência Econômica - FEE , conforme ilustrado na Figura 1.

4.4 Modelo de Seleção da Alternativa Ótima

A nova indústria de energia elétrica exigirá que o processo do PET leve em consideração fatores que possam contribuir para a formação do preço da energia elétrica. Um dos fatores é otimização do nível de reserva de capacidade de transmissão ao longo do período de análise e, conseqüentemente, do nível de confiabilidade que o sistema de transmissão propicia aos consumidores.

Neste sentido, a confiabilidade é uma variável que deve ser otimizada, em vez de imposta por um padrão arbitrário, onde a análise de benefício econômico/custo deve ser considerada para avaliar o impacto do trade-off inerente entre o crescimento dos custos de suprimento, necessário para atingir o nível de confiabilidade preconizado, e a correspondente redução dos custos das interrupções, isto é, os custos incorridos pelos consumidores.

O modelo matemático proposto para seleção da AET ótima se baseia em uma regra de decisão, função do conjunto reduzido de AET de maiores relações benefícios/custo - $Rd(CD)$ que consiste em selecionar o sistema S_{eq} que minimiza, simultaneamente, o $CTOT_{eq}$ e a $EENS_{eq}$ e maximiza o IME_{eq} , onde $l \in CD$.

Assim, identificado o CD , O sistema ótimo - S^*_{eq} para o PET , a multistágios de tempo, pode ser obtida da seguinte expressão:

$$Rd(CD) = \underset{l}{\text{Min}} \{ [CINV_{(eq)}^l + CPPA_{(eq)}^l] + CENS_{(eq)}^l \} \quad (8)$$

$$\text{Sujeito a: } \begin{aligned} IME_{(eq)}^* &= IME_{(eq)}^l \text{ max} \\ EENS_{(eq)}^* &= EENS_{(eq)}^l \text{ min} \end{aligned} \quad (9)$$

5.0 ESTUDO DE CASO

Para demonstrar a eficiência do método proposto, diante do leque numeroso de AET formuladas através de combinações de adições de reforços em um horizonte de dez anos, o mesmo foi testado na expansão da transmissão da área Leste da Chesf.

5.1 Sistemas de Referência Superior e Inferior

5.1.1 Reforços do Sistema de Referência Superior

As adições de reforços de transmissão necessárias para atendimento ao crescimento do mercado de energia de cada subárea, com os critérios "N-1" e "N", respectivamente, em um horizonte de dez anos, estão descritas a seguir.

Sub-área 1

R^4 - LT 500 kV Messias/Recife, nos anos 1 (N-1) e 3 (N);

R^5 - 2º AT 500/230 kV 600 MVA de Messias, nos anos 1 e 2 (N);

R^{11} - LT500 kV Xingó/Messias - C2, no ano 10 (N-1 e N).

Sub-área 2

R^1 - LT 230 kV Angelim/Tacaimbó - C3, nos anos 1 (N-1) e 4 (N);

R^3 - LT 230 kV Mirueira/Goianinha, nos anos 1 (N-1) e 3 (N);

R^6 - LT 230 kV Recife II/Mussurú - C1, nos anos 3 (N-1) e 7 (N).

R^7 - LT 230 kV Recife II/P. Ferro-C2/C. Grande, nos anos 4 e 5(N);

R^8 - LT 230 kV Pau Ferro/Mussurú - C1, nos anos 5 (N-1) e 7 (N);

R⁹ - LT230 kV Recife II/Pau Ferro C2, nos anos 6 (N-1) e 10 (N);
R¹⁰ - 4ª AT 500/230 kV 600 MVA de Recife II, nos anos 7 e 10 (N);
Sub-área 3
R² - LT 230 kV Campina Grande/Açu, nos anos 1 (N-1) e 5 (N).

5.1.2 Investimentos dos Sistemas Superior e Inferior

A Figura 2 mostra as evoluções dos custos de investimentos, em milhões de dólares dos sistemas de referência superior S^{RS} e de referência inferior S^{RI}, planejados com os critérios "N-1" e "N".

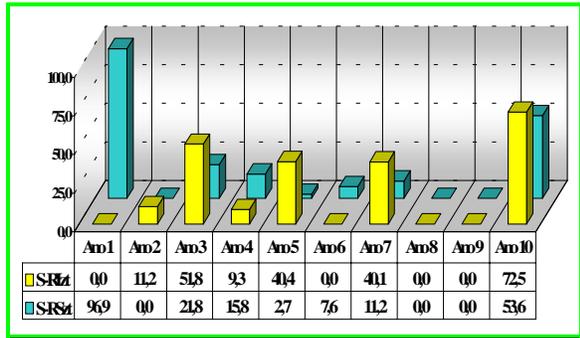


FIGURA 2: Comparação de Investimentos dos Sistemas S^{RS} e S^{RI}

5.1.3 Confiabilidade dos Sistemas Superior e Inferior

A Figura 3 mostra as evoluções das EENS anuais (em MWh/ano) do sistema de referência superior S^{RS} e inferior S^{RI}, planejados com os critérios "N-1" e "N", respectivamente.

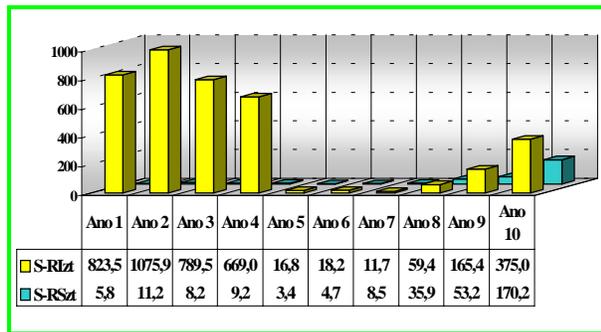


FIGURA 3: Comparação das EENS dos Sistemas S^{RS} e S^{RI}

5.2 Sistemas Intermediários

Para se ter uma idéia geral, sem nenhuma eliminação, a gama de possibilidades de combinações de adições de reforços de transmissão para formulação de AET tecnicamente viáveis, atinge o patamar de 657 no horizonte de dez anos. Diante desta gama de possibilidades, uma característica que foi explorada com o objetivo de eliminar ramos da ACE, antes de iniciar o processo de formulação das AET, se consistiu no fato de que determinadas adições de reforços de transmissão, em virtude da sua localização eletrogeográfica, não alteram os desempenhos de atendimento às demandas de energia de outras subáreas.

Na Figura 4 são apresentadas as 208 AET restantes localizadas no espaço cartesiano CTOTeq x EENSeq. Fica evidente desta Figura, que a gama de possibilidades de configurações evolutivas formulada, se constitui em um forte motivo para que se eliminem as combinações de adições de reforços antieconômicas durante o processo de formulação de AET, e conseqüentemente, contribuindo para a redução do número de ramos da ACE. Este leque inicial numero-

so de possíveis AET justifica a aplicação do CPPR, através da aplicação do conceito do Ceis.

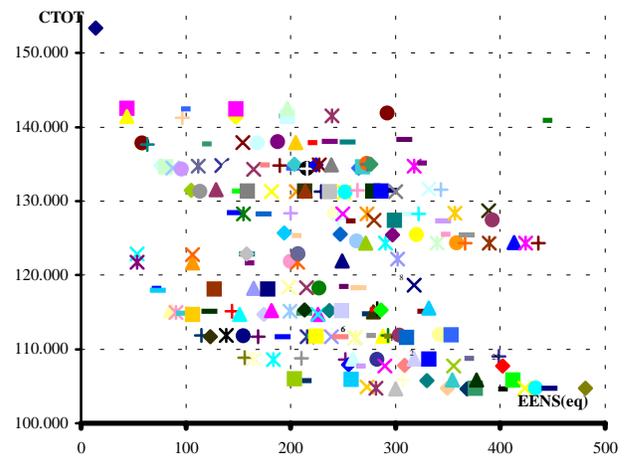


FIGURA 4: Curva de Trade-off "CTOTeq x EENSeq" - 208 AET

Como pode ser visto, a exploração desta característica sistêmica tem o efeito decisivo de reduzir a ACE em cerca de 68%, o que significa eliminar 449 AET tecnicamente viáveis.

5.3 Aplicação do CPPR aos Sistemas Intermediários

A aplicação da regra de decisão definida pelo CPPR, com a finalidade de eliminar as postergações das adições de reforços que resultam em valores de Ceis superiores ao valor de referência do Cuf, que neste estudo de caso foi considerado igual a 1000 US\$/MWh, resulta em apenas nove AET de S^I. Na Figura 5 eles são apresentadas no espaço cartesiano CTOTeq x EENSeq.

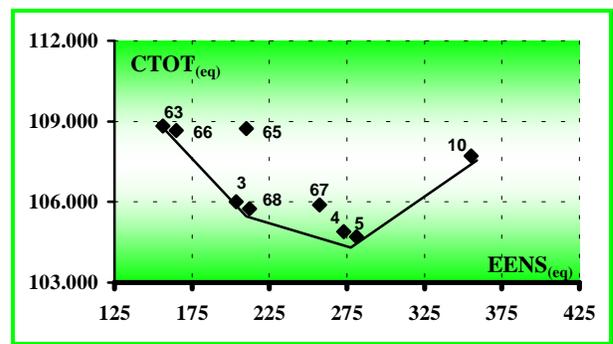


FIGURA 5: Curva de Trade-off "CTOTeq x EENSeq" - 9 AET

5.4 Aplicação do Critério de Hierarquização

O resumo dos resultados da aplicação do modelo de hierarquização aos nove S^I, indicando a ordenação e as parcelas de variações dos custos incrementais equivalentes associados a cada um das alternativas de configurações evolutivas, resultantes do crivo do CPPR, estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1: Ordenação dos S^I e Variações dos Custos Incrementais

S ^I _(eq)	IME ^I	Δ ⁻ CINV ^I _(eq)	Δ ⁺ CMWh ^I
3	12,99	51.309	3.950
4	11,30	53.158	4.680
5	10,25	53.936	5.263
10	9,65	50.934	5.277
63	10,38	49.292	4.746

65	9,03	50.211	5.560
66	9,39	50.055	5.329
67	10,96	52.244	4.764
68	11,68	52.088	4.458

Analisando a Tabela 1 constata-se que:

⇒ O sistema S^3 é preferível ao sistema S^{67} , isto é, $S^{67} \pi S^3$;

⇒ O sistema S^{66} é preferível ao sistema S^{65} , isto é, $S^{65} \pi S^{66}$.

A Figura 6 ilustra, graficamente, as sete AET resultantes da análise de hierarquização e de dominância, bem como os IME^I associados.

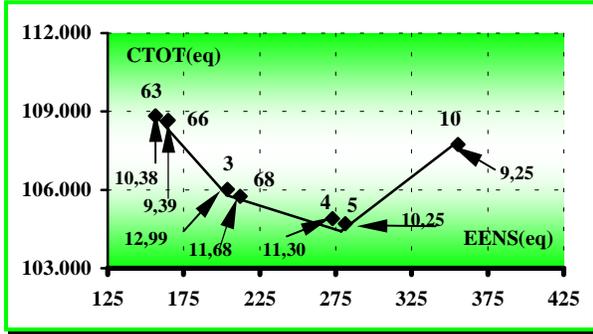


FIGURA 6: Curva de Trade-off "CTOTeq x EENSeq" - 7 AET

5.5 Seleção das AET Pareto-ótimas

Visto que as soluções Pareto-ótimas para o problema do PET são constituídas pelas AET não dominadas e que se situam sobre a curva de FEE, deduz-se que os sete sistemas de transmissão S^{eq} apresentados na Figura 6, correspondem as AET Pareto-ótimas para o estudo de caso.

5.5.1 Datas de Adições das AET Pareto-ótimas

A Tabela 2 resume as informações relativas às datas das adições de reforços destes sistemas de transmissão.

TABELA 2: Datas dos Reforços das Sete AET Pareto-ótimas

$S^I_{(eq)}$	R^1_t	R^2_t	R^3_t	R^4_t	R^5_t
3	Ano 1	Ano 4	Ano 1	Ano 3-CN	Ano 2-CN
4	Ano 1	Ano 5-CN	Ano 1	Ano 3-CN	Ano 2-CN
5	Ano 1	Ano 5-CN	Ano 2	Ano 3-CN	Ano 2-CN
10	Ano 2	Ano 5-CN	Ano 1	Ano 3-CN	Ano 2-CN
63	Ano 1	Ano 3	Ano 1	Ano 3-CN	Ano 2-CN
66	Ano 1	Ano 3	Ano 2	Ano 3-CN	Ano 2-CN
68	Ano 1	Ano 4	Ano 2	Ano 3-CN	Ano 2-CN

5.5.2 Parcelas de Custos das AET Pareto-ótimas

A Figura 7 faz uma comparação entre as três parcelas de custos equivalentes: de investimentos, de perdas ativas e de EENS, em milhões de dólares.

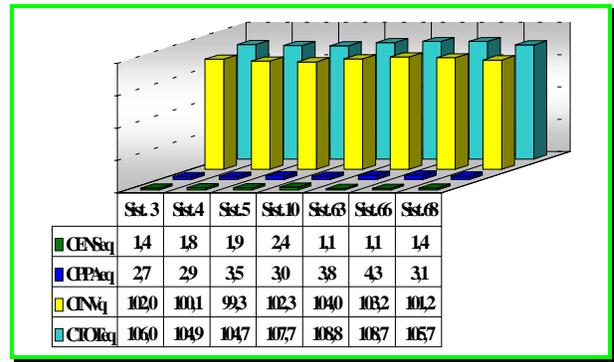


FIGURA 7: Parcelas de Custos das Sete AET Pareto-ótimas

5.5.3 Índices de Mérito das Sete AET Pareto-ótimas

A Figura 8 faz uma comparação entre os valores dos IME^{eq} das sete AET Pareto-ótimas.

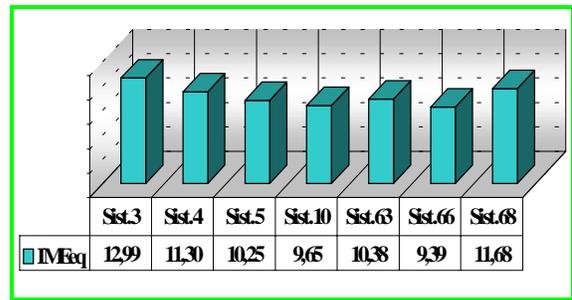


FIGURA 8: Índices de Méritos das Sete AET Pareto-ótimas

5.5.4 EENS das Sete AET Pareto-ótimas

A Figura 9 faz uma comparação entre os valores das $EENSeq$ das sete AET Pareto-ótimas.

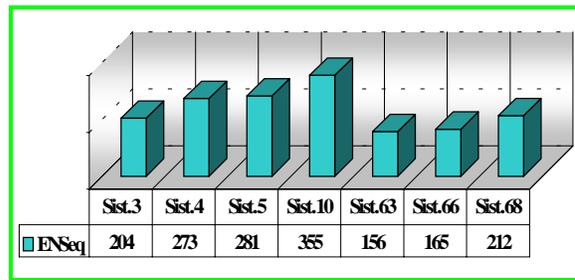


FIGURA 9: EENSeq das Sete AET Pareto-ótimas

5.5.5 Ceis das Sete AET Pareto-ótimas

A Figura 10 faz uma comparação entre os valores dos Ceis das sete AET Pareto-ótimas.

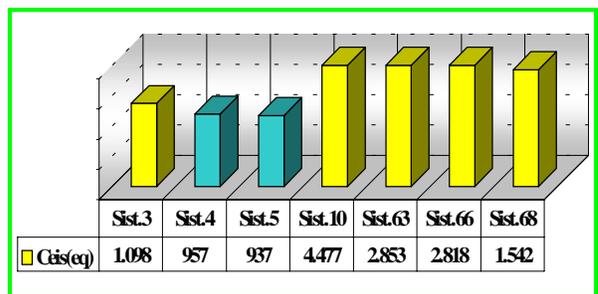


FIGURA 10: Ceis das Sete AET Pareto-ótimas

5.6 Seleção da AET Ótima

Observa-se da Figura 10, que os sistemas de transmissão S^4 e S^5 , em virtude de estarem situadas junto ao “joelho” da curva de FEE , se constituem em AET candidatas à solução ótima para o estudo de caso, visto que estão localizadas em uma região de saturação, significando que a diminuição do valor do atributo CTO_{Teq} resulta no aumento do atributo definido pela $EENSeq$.

A solução ótima corresponde ao sistema S^4 , uma vez que este sistema dimensionado segundo esta regra de decisão maximiza o $IMESeq$ e minimiza, simultaneamente, o $CTOT^{4eq}$ e a $EENS^{4eq}$.

Nos itens que se seguem, são feitas, análises comparativas entre a AET ótima e os sistemas de transmissão dimensionados para atender aos critérios “N-1”, “N” e com a seguinte estratégia, resultando em um sistema de transmissão aqui denominado de S^{PO} :

- Nos cinco primeiros anos a expansão atende ao critério “N”;
- Do sexto ao décimo ano a expansão atende ao critério “N-1”.

5.6.1 Parcelas de Custos das Três AET e da Ótima

A Figura 11 faz uma comparação entre as três parcelas de custos equivalentes: de investimentos, de perdas ativas e de EENS, em milhões de dólares.

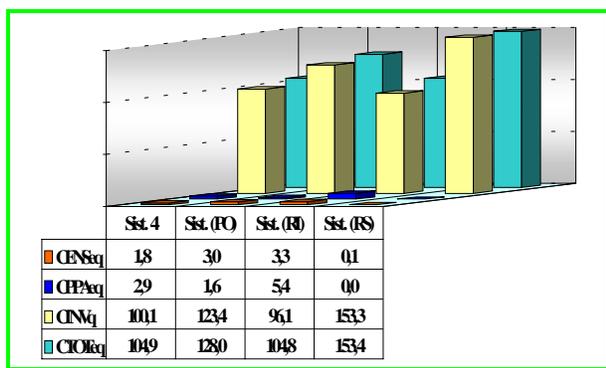


FIGURA 11: Comparação das Parcelas de Custos da AET Ótima

5.6.2 EENS das Três AET e da Ótima

A Figura 12 sintetiza os resultados alcançados, permitindo a comparação das $EENSeq$ dos sistemas S^4 , S^{RS} , S^{RI} e S^{PO} .

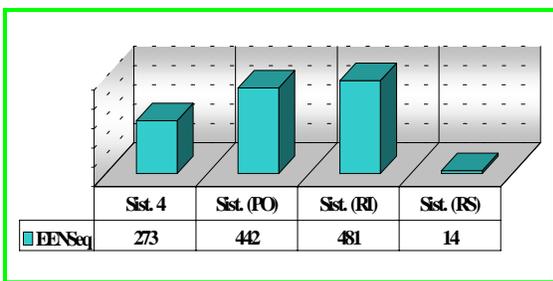


FIGURA 12: Comparação das $EENSeq$ das Três AET e da Ótima

5.7 Sensibilidade da AET Ótima

O aumento de 1000 US\$/MWh para 1500 US\$/MWh (valor médio brasileiro) no custo de valoração das $EENS$ não definiu outra AET ótima, como pode ser visto na Figura 13. Este fato mostra que a escolha da AET ótima é robusta frente ao aumento do Cuf .

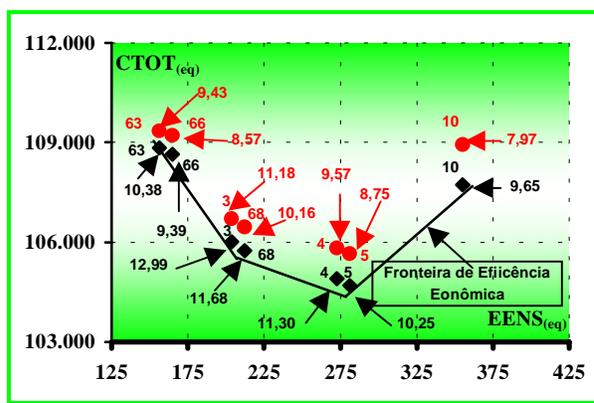


FIGURA 13: Sensibilidade da AET Ótima ao Aumento do Cuf

6.0 CONCLUSÕES

6.1 Aspectos Metodológicos

É apresentado a seguir as principais constatações obtidas dos modelos e critérios desenvolvidos e aplicados:

- O $IMEEq$ além de se constituir em um mecanismo adequado e eficiente para comparação e hierarquização de AET, tem a capacidade de identificar as AET dominadas. Através deste indicador pode-se visualizar todas as consequências, positivas e negativas, das postergações;
- Além de estabelecer uma nova escala para o tratamento das variáveis de decisão, onde os aspectos relativos à confiabilidade das configurações evolutivas, perdas ativas e custos unitários estão agregados no $IMEEq$;
- O $CPPR$, através do $Ceis$, cumpriu com êxito, seu principal objetivo, que é o de reduzir a ACE . Vale salientar que neste estudo de caso, a redução atingiu o patamar de $208-9=199$, ou seja, cerca de 95,7%, confirmando assim sua eficiência.

6.2 Aspectos Técnicos e Econômicos

Os resultados da otimização da expansão do estudo de caso capturou de forma eficiente os troncos de transmissão mais críticos, indicando como vantajosas as adições dos reforços R^1 e R^3 para atendimento ao critério “N-1” e dos reforços R^2 , R^4 e R^5 para atendimento à condição normal de operação. Da análise econômica comparativa destacam-se os aspectos:

- O custo $CINV^{4eq}$ do sistema S^4 é cerca de 53,1% inferior ao custo do sistema S^{RS} planejado com o critério “N-1” Isto significa uma redução da ordem de 54,6 milhões de dólares;
- O valor do $Ceis$ (957 US\$/MWh) do sistema S^4 ficou próximo ao valor do Cuf (1000 US\$/MWh).

Infere-se das análises que, os modelos e critérios propostos são mais realistas e compatíveis com objetivos da nova indústria de energia elétrica e oferecem ao agente de decisão uma ferramenta de auxílio precisa.

7.0 - BIBLIOGRAFIA

- [1] Barros, J. R. P.: “Uma Metodologia de Planejamento da Expansão da Transmissão Baseada em Trade-off e Indicador de Mérito Econômico” - Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica da UFPE, Recife, Dez/2000;
- [2] CEPEL – “Modelo Computacional NH2 para Análise de Confiabilidade de Sistemas de Geração/Transmissão de Grande Porte” – Manual de Metodologia.