



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

**REGRA DE DECISÃO PARA ALOCAÇÃO DE CUSTOS DE USO DE ATIVOS DE
TRANSMISSÃO E PERDAS ATIVAS BASEADAS EM COALIZÕES E NO VALOR DE SHAPLEY**

João Ricardo Paes de Barros*
Companhia Hidrelétrica do São Francisco - CHESF

Albert Cordeiro Geber de Melo
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL

RESUMO

O presente trabalho enfoca o problema de alocação de custo de uso de sistemas de transmissão juntamente com os custos das perdas ativas. O problema considerado consiste em determinar a contribuição de cada agente usuário da rede de transmissão no custo total. A parcela que cabe a cada participante é obtida através de uma combinação de formação de coalizões, com o Valor de Shapley [3] (Teoria dos Jogos Cooperativos) e com os resultados dos fluxos de potência. As propriedades deste método baseado em jogos cooperativos permitem avaliar o impacto incremental de cada agente no custo do serviço de transmissão. Tanto os critérios de formação de coalizões concebidos como os modelos de custo, foi testado em um estudo de caso que contempla a configuração da rede de transmissão planejada [6] para a área Leste do sistema CHESF.

PALAVRAS-CHAVE

Alocação de Custos, Teoria dos Jogos, Valor de Shapley, Custos de Uso de Sistemas de Transmissão e Perdas Ativas.

1.0 INTRODUÇÃO

No novo ambiente setorial, os negócios ou contratos de energia elétrica serão realizados de forma separada, envolvendo os agentes geradores (empresas geradoras e produtores independentes) e consumidores. Isto significa que os consumidores livres e os agentes distribuidores comprarão energia elétrica das empresas geradoras e pagarão pelo uso dos ativos de transmissão aos agentes transmissores, sendo natural que os custos totais envolvidos sejam cobertos por estes acessantes. Neste sentido, qualquer metodologia que se preste a determinar o preço do serviço de transmissão deve atender a alguns princípios tidos como básicos. Dentre eles constam:

- Promover a eficiência econômica, através de uma sinalização adequada aos usuários dos ativos de transmissão e que leve a uma economia de investimentos na expansão e operação da mesma;
- Ser não-discriminatória, não permitindo um tratamento diferenciado entre acessantes de naturezas distintas, tais como um autoprodutor de energia e um agente consumidor. Isto significa que o processo de tarifação que seja aplicado a um acessante deve valer igualmente para os demais e, em condições similares de uso de ativos de transmissão, deve fornecer resultados também similares;
- Ser coerente com a forma de operação e expansão da rede de transmissão, alocando os custos embutidos para cada acessante em função do grau de utilização da rede;
- Assegurar aos agentes transmissores, condições para que eles possam atender aos requisitos de receita vinculada aos custos de investimentos, de operação, manutenção e expansão da rede de transmissão;
- Ser tão estável quanto possível possibilitando aos usuários do serviço de transmissão, planejarem seus custos futuros com menor grau de incertezas;
- Ser simples em seu entendimento e transparente para todos os agentes em sua aplicação.

Diante destes requisitos, fica então evidente que a remuneração dos custos embutidos consiste em um problema de alocação. Em economia, problemas com esta característica são usualmente tratados em forma de cooperação entre agentes.

Com este conceito, os agentes geradores usam a malha elétrica da rede básica para escoar suas potências geradas até os consumidores, sendo necessário dividir entre eles estes custos de forma eficiente e mais justa possível. A busca da alocação dos custos de uso dos ativos de transmissão e perdas ativas, de forma justa e eficiente, pode ser tratada como um jogo entre os agentes que acessam a malha elétrica da rede básica. Neste jogo, estes agentes têm todo interesse de cooperar entre si, formando coalizões que resulte em uma distribuição dos custos totais mais justas possível. As coalizões são fundamentais na determinação do equilíbrio de um jogo cooperativo, uma vez que elas capturam os elementos estratégicos para que haja cooperação. Naturalmente, o valor do custo com o qual determinada coalizão será carregada deve, sempre que possível, ser menor do que como agente isolado (coalizão unitária). Esta é uma questão de extrema importância no Jogo de Alocação dos Custos de Investimentos e Perdas Ativas – *JACIPA* uma vez que, se qualquer jogador ou coalizão acreditar que está sendo sobrecarregada, ela desistirá de participar desta solução para participar de uma outra distribuição de custos que lhe pareça mais “vantajosa”.

Este artigo apresenta uma regra de decisão, justa e eficiente (atende aos seis requisitos imprescindíveis a qualquer esquema de alocação de custos), para repartição dos custos de uso de ativos de transmissão, juntamente com as perdas ativas. A regra se baseia no *Valor de Shapley*, oriundo da Teoria dos Jogos Cooperativos, para estabelecer a menor carga tarifária a ser atribuída a cada agente participante do *JACIPA*. Chama-se a atenção de que, tanto as repartições das parcelas de custos (investimentos e perdas ativas) como as tarifas nodais obtidos, por meio desta abordagem, independe do barramento de referência usado nas análises de fluxos de potência, como ocorre com os métodos tradicionais.

2.0 ABORDAGEM METODOLÓGICA PROPOSTA

A forma de repartir os custos decorrentes do uso dos circuitos da rede de transmissão, mediante jogos cooperativos, consiste em supor a existência de um número $N = \{1, 2, \dots, n\}$ de agentes usuários (os jogadores do *JACIPA*). Estes agentes do *JACIPA* podem representar tipos distintos de usuários, tais como: geradores, consumidores, proprietários de instalações de transmissão, ou uma combinação deles [5], onde cada agente deve estar capacitado a tomar decisões, bem como ter preferências baseadas no princípio da racionalidade econômica de minimização de seus custos. Os jogadores do *JACIPA* podem se agrupar de várias maneiras diferentes de acordo com seus interesses e conveniências. A forma como os jogadores em N se agrupam [4], formando um conjunto de coalizões – S ($S \subseteq N$, ou seja, representa uma partição de N) mutuamente exclusivas e excludentes, resultam nas coalizões $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$.

2.1 Algoritmo Geral da Abordagem Metodológica

O processo de valoração do serviço de transmissão consiste em estabelecer preços para cada barramento (estabelecer as *tarifas nodais*), baseados nos impactos que as diversas possibilidades de coalizões provocam na rede.

Os impactos são avaliados em função do parâmetro que define a expansão da rede elétrica e impõe, efetivamente, novos custos para ela, ou seja, o carregamento máximo dos circuitos da rede. Neste sentido, a participação de cada acessante na cobertura dos custos da rede de transmissão é obtida em função de dois fatores, a saber:

- O grau de utilização da rede pelos jogadores de cada coalizão (em MW) durante a condição de carregamento máximo;
- A extensão de uso da rede de transmissão por cada coalizão de jogadores que pode ser formada.

A Figura 1 ilustra, de forma esquemática e simplificada, as etapas necessárias para o estabelecimento dos preços nodais, mediante a Abordagem Baseada em Jogos Cooperativos - *ABJC*, levando em consideração os dois fatores acima mencionados. Como pode ser visto nesta figura, a execução da *ABJC* requer um modelo de formação das possíveis coalizões de jogadores, de obtenção dos custos associados às diversas configurações resultantes e de repartição dos custos entre os jogadores participantes do *JACIPA*.

2.2 Premissas Utilizadas na Formação das Coalizões

Para formação das possíveis coalizões de jogadores foi adotado o seguinte conjunto de premissas básicas:

- Apenas um agente compartilha um mesmo barramento da rede de transmissão. Isto significa que um conjunto de unidades geradoras, produtores independentes, caso existam, e de consumidores conectadas a um barramento representa um único jogador;
- Cada coalizão de jogadores deve conter, no mínimo, um agente gerador, um consumidor e uma linha de transmissão (existente ou planejada);

- ❑ O total de geração de cada coalizão de jogadores deve atender a carga total da coalizão formada;
- ❑ Os limites de carregamentos das linhas de transmissão e transformadores de cada coalizão formada não devem ser excedidos, tanto em condições normais como em contingências simples;
- ❑ Cada coalizão de jogadores deve conter um ou mais circuitos (existentes e planejadas) conectando todos os barramentos de cada coalizão formada.

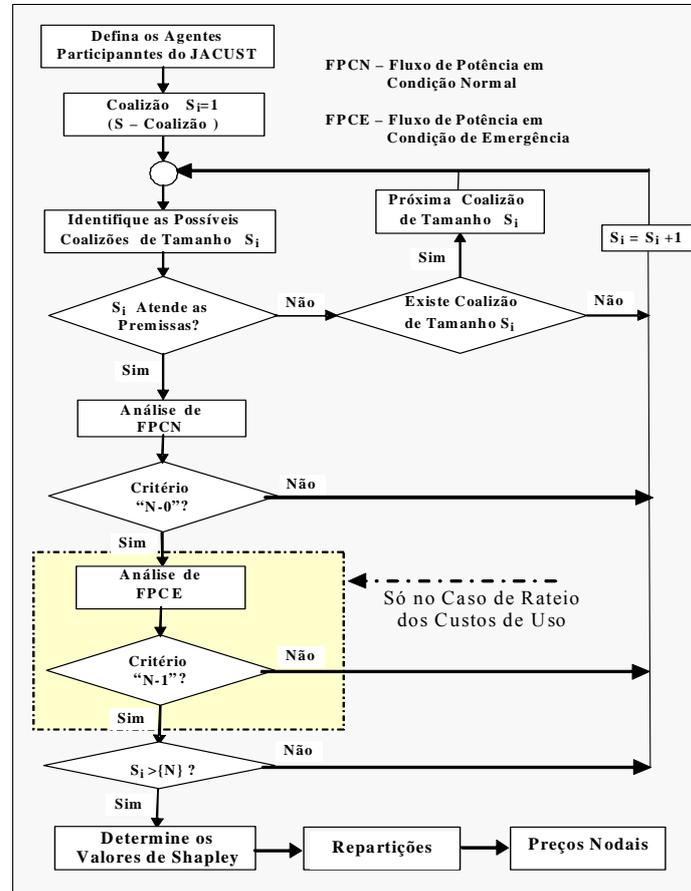


FIGURA 1: Algoritmo Geral da ABC pelo Critério "N-1"

2.3 Modelo de Obtenção dos Custos das Coalizões

Considerando a existência de "#N=|N|" agentes no JACIPA, pode-se formar " $2^{|N|} - 1$ " coalizões não vazias, sendo que "N|" são coalizões unitárias e " $|N| - 2^{|N|} - 1$ " são coalizões coletivas. Do total de coalizões não vazias, apenas "#T=|T|" são coalizões viáveis, ou seja, atendem as cinco premissas adotadas no jogo em análise.

Custos de Uso do Sistema de Transmissão – CUST

Os modelos propostos para avaliar os Custos de Uso do Sistema de Transmissão – CUST($\{T\}$) associados a todas as coalizões são definidos pela equação (1), no caso de utilização por um agente, e pela equação (2) para o caso de utilização por mais de um jogador.

$$CUST(\{J_i\}) = \min_T \left[\sum_{(i,k) \in \Omega_i} C_{ik}(\{T\}) \cdot \frac{D(\{J_i\})}{D(\{T\})} \right] \quad (1)$$

$$CUST(\{T\}) = \sum_{(i,j) \in T} C_{ij}(\{T\}) \cdot \frac{D(\{T\})}{D(\{N\})} \quad (2)$$

Ω_i – Conjunto dos "k" barramentos conectados diretamente ao jogador "Ji" (barramento "i") através dos circuitos "i-k" contidos em $\{T\}$;

C_{ik} – Custos dos circuitos que conectam os barramentos "Ji" e "k";

C_{ij} – Custos dos circuitos que pertencentes à coalizão " $\{T\}$ ";

$D(\{J_i\})$ – Demanda máxima agregada do jogador "Ji";

$D(\{T_i\})$ – Demanda máxima agregada da coalizão " $\{T\}$ ".

Como no JACIPA o objetivo principal é repartir os custos de uso da rede de transmissão entre os usuários da rede, a função $CUST(\{T\})$ representa o menor custo incorrido pela coalizão " $\{T\}$ ", satisfazendo as cinco premissas acima citadas. Conseqüentemente, o $CUST(\{T\})$ representa a forma mais econômica que cada jogador pode ser carregado pelo uso dos circuitos das coalizões viáveis.

Custos das Perdas Ativas na Transmissão - CPAT

Por sua vez, para determinação dos Custos das Perdas Ativas na Transmissão – $CPAT(\{T\})$ de todas as coalizões de tamanho " $\{T\}$ ", parte-se do princípio que elas serão repostas pelo parque gerador da área de interesse. Isto significa que o custo total das perdas deve se igualar ao custo médio de uma geração equivalente, tanto em termos de ponta como de energia [4]. Associando-se o custo de uma usina equivalente, a qual é necessário para repor as perdas na condição de demanda máxima (Custo Marginal de Expansão da Ponta – CMP), aos valores de $PPA(\{T\})$, obtêm-se as parcelas dos Custos das Perdas Ativas de Ponta $CPAP(\{T\})$. Ou seja:

$$CPAP(\{T\}) = CMP \times PPA(\{T\}) \quad (3)$$

Com o custo unitário da energia produzida pelo parque gerador da área de interesse (Custo Marginal de Expansão de Energia – CME) e o Fator de Carga - FC, obtêm-se as parcelas dos Custos das Perdas Ativas de Energia – $CPAE(\{T\})$ por meio da equação (4). Nesta equação, o coeficiente " α " varia conforme as características de cada sistema, podendo ser obtido a partir de histórico dos dados de carga.

$$CPAE(\{T\}) = [8,76 \times CME \times (\alpha \cdot FC + (1 - \alpha) \cdot FC^2)] \times PPA(\{T\}) \quad (4)$$

Tomando o somatório das duas parcelas anuais obtêm-se o Custo das Perdas Ativas na Transmissão – $CPAT(\{T\})$, conforme indicado na equação (5).

$$CPAT(\{T\}) = Cup \times PPA(\{T\}) \quad (5)$$

Onde:

$$Cup = CMP + 8,76 \times CME \times (\alpha \cdot FC + (1 - \alpha) \cdot FC^2) \quad (6)$$

Cup – Custo unitário de valoração das potências de perdas ativas, em US\$/MW.

De posse das perdas e dos custos das perdas ativas de todas as coalizões, o próximo passo consiste em determinar os custos das coalizões. Os modelos propostos para avaliar os valores de $CPAT(\{T\})$ associados a todas as coalizões são definidos pela equação (7), no caso de utilização por um agente, e pela equação (8) para o caso de utilização por mais de um agente.

$$CPAT(\{J_i\}) = Cup \times \sum_{(i,j) \in T} PPA_{ij}(\{N\}) \cdot \frac{D(\{J_i\})}{D(\{N\})} \quad (7)$$

$$CPAT(\{T\}) = Cup \times \sum_{(i,j) \in T} PPA_{ij}(\{T\}) \quad (8)$$

$D(\{N\})$ – Demanda máxima agregada da grande coalizão " $\{N\}$ ".

2.4 Modelo de Repartição de Custos e Tarifas Nodais

A idéia de que um determinado agente do JACIPA só pague pelo uso dos circuitos da rede de transmissão pode ser interpretada como um custo incremental de sua inclusão no jogo. Assim, considerando que $(\{T\}-\{J_i\})$ representa uma coalizão viável que não contém o jogador " J_i " e (T) a coalizão formada por todos os jogadores, inclusive o jogador " J_i ", o custo incremental $\Delta(T, J_i)$ de inclusão do jogador " J_i " no JACIPA [1] e [2] pode ser por equação (9):

$$\Delta(T, J_i) = v(\{T\}) - v(\{T\} \cup \{J_i\}) = v(\{T\}) - v(\{T\} - \{J_i\}) \quad (9)$$

$$v(\{T\}) = \sum_{k \in T} C_k(\{T\}) - C(\{J_i\}) \quad (10)$$

Onde;

$$C(\{J_i\}) = \begin{cases} CUST(\{J_i\}) & \text{Se for Custo de Uso} \\ CPAT(\{J_i\}) & \text{Se for Custo de Perdas Ativas} \end{cases}$$

Da equação (9) infere-se que, se um determinado jogador " J_i " não utilizar os circuitos da rede de transmissão, implica em $v(\{T\}) = 0$. Logo, $v(\{T\}) = v(\{T\} - \{J_i\})$ e, conseqüentemente, $\Delta(T, J_i) = 0$. Sendo assim, este agente do JACIPA de fato só paga apenas pelos circuitos utilizados. Chama-se a atenção de que os custos incrementais definidos pela equação (9) consideram que cada jogador " J_i " entra no JACIPA um por um, na ordem J_1, J_2, \dots, J_n , contribuindo marginalmente com o valor dado por $\Delta(T, J_i)$. Entretanto, os agentes do JACIPA podem formar coalizões de tamanhos distintos e de maneira aleatória. Ou seja, do total de $(n!)$ possibilidades de coalizões,

existem $(|T|-1)!$ maneiras de inclusões de jogadores antes do jogador “Ji” entrar no jogo, e $(n-|T|)!$ formas de inclusões de jogadores após o jogador “Ji” entrar no jogo. Logo, o termo $\Delta(T, J_i)$ ocorre $(|T|-1)!(n-|T|)!$ vezes.

Diante destas constatações infere-se que a menor carga tarifária que cada agente do JACIPA pode alcançar, ou seja, a imputação - x_i mais justa que cada jogador “Ji” pode alcançar, é dada pelo valor esperado dos custos incrementais descritos em (11). Com estas definições pode-se inferir que:

$$x_{J_i}^{Sh}(C(\{T\})) = E[\Delta(T, J_i)] = E[v(\{T\}) - v(\{T\} - \{J_i\})] \quad (11)$$

Expressando a equação (11) em termos da probabilidade do jogador “Ji”, aqui representada por $P(J_i = |T|)$, obtém-se a equação (12), a qual permite determinar o Valor de Shapley associado a cada agente.

$$x_{J_i}^{Sh}(C(\{T\})) = \sum_{T \subset N} P(J_i = |T|) \cdot \Delta(T, J_i) \quad (12)$$

$$P(J_i = |T|) = \frac{(|T|-1)! \cdot (n-|T|)!}{n!} \quad (13)$$

A equação (12) mostra que $x_{J_i}^{Sh}(C(\{T\}))$ corresponde justamente ao valor médio esperado que o jogador “Ji” contribui para a grande coalizão $\{N\}$, considerando que os agentes do JACIPA formam todas as coalizões possíveis de maneira aleatória. Este conceito permite determinar um único vetor de imputações $x_{J_i}^{Sh} = (x_{J_1}^{Sh}, x_{J_2}^{Sh}, \dots, x_{J_n}^{Sh})$, os quais representam as economias nos custos de uso da rede provenientes das coalizões.

Determinação das Repartições dos Custos

De posse dos valores das imputações, são determinadas as magnitudes das Repartições dos Custos – $RC(\{J_i\})$ (faturamento do serviço de uso da transmissão), decorrentes do uso dos circuitos da rede de transmissão e das perdas ativas, subtraindo-se os montantes dos custos embutidos das coalizões unitárias dos respectivos valores das imputações. Ou seja:

$$RC(\{J_i\}) = C(\{J_i\}) - x_{J_i}^{Sh} C(\{T\}) \quad (14)$$

Determinação das Tarifas Nodais

Os preços (tarifas) nodais da rede de transmissão – $\pi(\{J_i\})$, em R\$/kW.ano ou R\$/kW.mês, são calculados tanto para cada agente gerador como para cada consumidor do JACIPA, considerando os efeitos das possíveis formações de coalizões de agentes, sobre os circuitos da rede de transmissão, conforme indicado na equação (15).

$$\Pi(\{J_i\}) = \frac{RC(\{J_i\})}{D(\{J_i\})} \quad (15)$$

A aplicação desta forma de precificação assegura, para todos os acessantes (geradores e consumidores), a cobertura integral dos requisitos de receita da rede de transmissão, desde que mantidos os valores de carga, topologia e o despacho. Observa-se, entretanto, que as condições da rede de transmissão vão se alterando ao longo do tempo, quando são adicionados novos circuitos, atendidos novos acessantes (agentes geradores de energia e consumidores), etc. Saliencia-se que, este dinamismo do sistema conduz à necessidade de revisão periódica, tanto das repartições dos custos embutidos como dos preços nodais obtidos.

3.0 ESTUDO DE CASO

Com o objetivo de testar o comportamento da metodologia, em relação à sua capacidade de repartir os custos embutidos e sinalizar aos agentes (geradores e consumidores), através dos preços nodais, aplicou-se o algoritmo indicado na Figura 1 à rede de transmissão (reduzida a seis barramentos) da área Leste da CHESF. Ressalta-se que, este sistema de transmissão foi anteriormente planejado para atender ao crescimento do mercado de energia do 2000/2007, utilizando um método baseado em custos marginais de confiabilidade de circuitos e barramentos [5] e, posteriormente, usando um método baseado nos conceitos de coalizões e no *Valor de Shapley* [2] e [6].

3.1 Sistema de Transmissão de Referência

A área Leste abrange os estados de Pernambuco, Alagoas, Paraíba e Rio Grande do Norte. Os principais centros de cargas destes estados estão, localizados, respectivamente, em Recife, Maceió, João Pessoa e Natal, os quais são supridos a partir do complexo hidroelétrico do rio São Francisco e pelas unidades geradoras da usina de Xingó. Tal sistema de transmissão é ilustrado na Figura 2, onde estão indicadas as malhas de 230 kV e 500 kV. A configuração da rede de transmissão prevista para o ano de 2003 foi considerada como ponto de partida para identificação das capacidades de transmissão que atendem aos grandes centros de cargas.

Com relação a este sistema, observa-se que o tronco de 500 kV é composto de quatro circuitos entre as usinas do rio São Francisco e a área Leste, chegando nas subestações de Angelim e Messias. A expansão de menor custo obtida em [5] e [6] para as redes de transmissão de 500 kV e 230 kV da área Leste, considerando o atendimento ao critério de contingência simples (critério N-1), contempla a rota Xingó/Angelim.

3.2 Agentes (Jogadores) Participantes do JACIPA

Considerando as características da topologia da rede de transmissão da área Leste, aliado ao objetivo principal do JACIPA que consiste em repartir de forma justa os custos de uso dos circuitos e de perdas ativas, a rede elétrica original foi reduzida para seis barramentos, conforme ilustrado no diagrama geográfico da Figura 2.

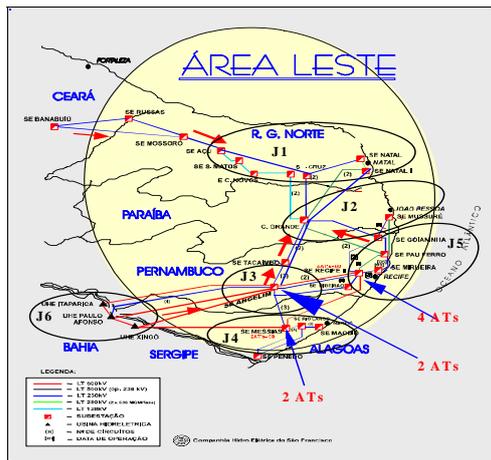


FIGURA 2: Sistema de Transmissão de Referência

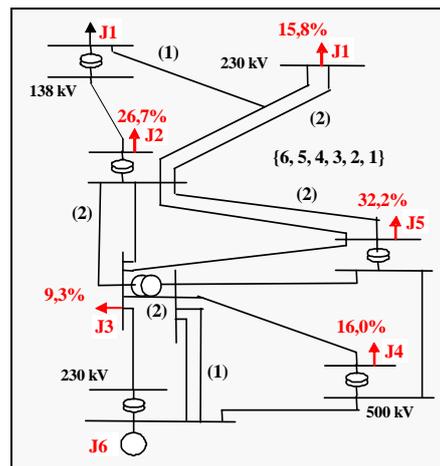


FIGURA 3: Grande Coalizão $\{N\}=\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$

Chama-se a atenção de que cada um dos barramentos atende a um determinado conjunto de agentes consumidores ou geradores. Com estas considerações os seis agentes (jogadores) passam a ter as seguintes características de consumo ou geração de energia elétrica:

- ❑ **Jogador 1:** Consiste de um barramento de consumo que agrega todo o mercado da região do Rio Grande do Norte, exceto as cargas derivadas da subestação Mossoró. A sua carga agregada é da ordem de 15,8% da demanda máxima total da área Leste (ver Figura 3);
- ❑ **Jogador 2:** Consiste de um barramento de consumo que engloba as cargas derivadas da subestação de Campina Grande, acrescido dos mercados derivados dos barramentos de Goianinha e Mussurú. A sua carga agregada é a segunda maior e representa cerca de 26,7% da demanda máxima total;
- ❑ **Jogador 3:** Consiste de um barramento de consumo que incorpora as cargas que compõem os regionais de Angelim e Tacaimbó. A sua carga agregada é a menor de todas e representa cerca de 9,3% da demanda máxima;
- ❑ **Jogador 4:** Consiste de um barramento de consumo que contempla as cargas do regional de Messias (que compreende: Rio Largo, Maceió e Penedo) A sua carga agregada é cerca de 16,0% da demanda máxima total;
- ❑ **Jogador 5:** Consiste de um barramento de consumo que incorpora as cargas do regional de Recife (que compreende: Recife II, Ribeirão, Bongí, Mirueira, Várzea e Pirapama) mais o mercado atendido pela subestação de Pau Ferro. A sua carga agregada é a maior de todas e representa cerca de 32,2% da demanda máxima total;
- ❑ **Jogador 6:** Consiste de um barramento de geração que agrega as usinas hidrelétricas do complexo de Paulo Afonso e das usinas hidrelétricas de Itaparica e Xingó.

3.3 Possíveis Coalizões do JACIPA

Considerando que existe seis jogadores no JACIPA, pode-se formar 63 (2^6-1) coalizões não vazias, sendo: Seis coalizões unitárias; quinze coalizões de 2 jogadores; vinte coalizões de 3 jogadores; quinze coalizões de 4 jogadores; seis coalizões de 5 jogadores e uma coalizão de 6 jogadores. Entretanto, deste total, apenas dezoito coalizões são viáveis [6], a saber:

- ❑ **Um agente:** Jogadores {1}, {2}, {3}, {4}, {5} e {6};
- ❑ **Dois agentes:** Jogadores {3, 6} e {4, 6};
- ❑ **Três agentes:** Jogadores {2, 3, 6}, {3, 4, 6} e {3, 5, 6};
- ❑ **Quatro agentes:** Jogadores {2, 3, 4, 6}, {2, 3, 5, 6} e {3, 4, 5, 6};
- ❑ **Cinco agentes:** Jogadores {1, 2, 3, 4, 6}, {1, 2, 3, 5, 6} e {2, 3, 4, 5, 6};

□ **Seis agentes:** Jogadores {1, 2, 3, 4, 5, 6} – Figura 3.

3.4 Valores de Shapley dos Jogadores (Agentes)

A seguir são apresentados os Valores de Shapley dos seis agentes participantes do JACIPA (cindo agentes consumidores e um agente gerador), associados aos custos de uso da rede de transmissão e das perdas ativas. Para o cálculo dos custos de uso da rede de transmissão, das dezoito coalizões viáveis, considerou-se uma taxa de atualização do capital de 12% a.a. e um período de vida útil de 30 anos, para todos os circuitos da rede de transmissão. Ademais, os custos dos componentes de cada coalizão (vãos, linhas de transmissão e autotransformadores), foram extraídos do documento “referência os custos padronizados” [7] por níveis de tensão (valores médios nacionais). Tais valores se baseiam nos custos de reposições por equipamentos similares.

Para o cálculo dos custos das perdas ativas das dezoito coalizões viáveis, foram utilizados os seguintes dados: CME=35 US\$/MWh. ano, CMP=0, fc=0,80 e $\alpha =0,2$. De posse dos custos das coalizões, foram determinadas as magnitudes dos Valores de Shapley associados ao CUST e ao CPAT, dos seis agentes participantes do JACIPA (cindo agentes consumidores e um agente produtor de energia). A Figura 4 mostra os resultados obtidos (CUST em 1000 R\$ e CPAT em US\$), onde se constata que:

- Os barramentos da rede com predominância de consumo (J1, J2, J4 e J5) apresentam valores de Shapley positivos e os que têm características predominantes de exportação de energia (J3 importador e J6 produtor) apresentam valores negativos. O nível de importação depende do grau de utilização dos circuitos pertencentes aos caminhos que chegam nestes quatro barramentos. Ou seja, é função dos montantes de reserva de capacidades de disponíveis para atendimento as suas demandas máximas agregadas;
- Já os agentes J3 e J6 nitidamente apresentam características de barramentos exportadores e produtores de energia, indicando que a maioria dos circuitos pertencentes aos caminhos que se conectam a eles são para atendimento as demandas agregadas dos outros agentes;
- As ordens de grandezas dos valores de Shapley dependem dos circuitos que pertencem os caminhos das coalizões viáveis que foram formadas. Quanto maiores forem os valores maiores serão as contribuições dos agentes para redução dos custos das perdas.

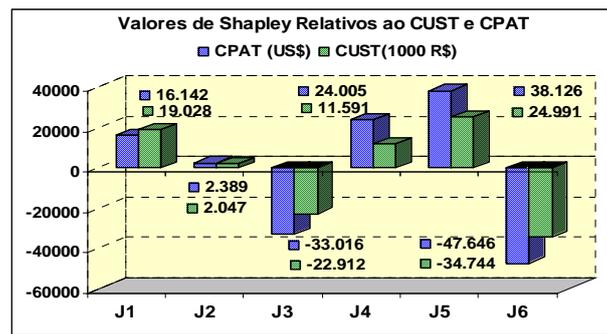


FIGURA 4: Valores de Shapley Relativos ao CUST e CPAT

3.5 Repartição dos Custos Embutidos e Perdas

Seguindo o procedimento indicado na metodologia proposta, foram obtidos os montantes das repartições, em termos absolutos, dos custos de uso do serviço de transmissão e de perdas ativas, entre os seis agentes do JACIPA. Os resultados alcançados relativos ao CUST e a CPAT estão apresentados na Figura 5. A inspeção dos valores contidos nesta figura permite extrair as seguintes principais constatações:

- Para o sistema elétrico em análise, a repartição dos custos de uso do serviço de transmissão e de perdas ativas é positiva, uma vez que se trata da divisão de custos (embutidos) associados à rede;
- A soma da repartição dos custos embutidos e de perdas ativas, entre os seis agentes, se iguala aos custos totais fixo e de perda ativa da rede que são da ordem de 153.941.000 R\$/ano e 196.548 U\$/ano, respectivamente. Esta importante constatação significa que os custos embutido total da rede de transmissão e de perdas ativas são recuperados integralmente;
- Uma vez que os agentes J3 (exportador) e J6 (gerador) não contribuem para redução da repartição do custo de uso do serviço de transmissão e das perdas ativas (*Valores de Shapley* negativos), suas participações para cobertura do custo total da rede, em termos absolutos, são elevadas. As contribuições percentuais destes dois jogadores são da ordem de 23% e 24% respectivamente, totalizando 47%.

3.6 Tarifas Nodais Agregadas dos Seis Agentes

A repartição dos custos, em termos absolutos, não permite inferir o real poder de cada agente na formação do

custo de uso da rede de transmissão. Neste sentido, as tarifas nodais necessitam serem distribuídos entre os agentes, aqui representados pelas demandas agregadas de cada barramento, conforme indicado no item 3.3. Considerando os valores dos rateios dos custos fixos e de perdas ativas apresentados na Figura 6, foram determinadas as magnitudes das repartições relativas (tarifas nodais em R\$/kW.ano e US\$/MW.ano) associadas aos seis agentes.

A inspeção dos valores contidos nesta figura nos permite extrair as seguintes constatações:

- ❑ A soma dos produtos das tarifas nodais pela demanda agregada de cada jogador se iguala ao custo total dos ativos da rede de transmissão (153.941.000 R\$/ano) e das perdas ativas na rede (\approx 196.548 U\$/ano). Este fato vem corroborar com a constatação da cobertura total dos custos fixos e de perdas ativas na rede;
- ❑ Uma vez que o montante de reserva de capacidade de transmissão de atendimento da demanda agregada do agente consumidor J3 é bem maior que o dos outros agentes, sua tarifa nodal também é mais elevada;
- ❑ O Jogador J6, composto pelas unidades geradoras do sistema CHESF (Xingó, Complexo Paulo Afonso e Itaparica), apresenta uma tarifa de uso da rede de transmissão cerca de três vezes e meia inferior que a tarifa média dos agentes consumidores, corroborando com sua característica de jogador produtor de energia.

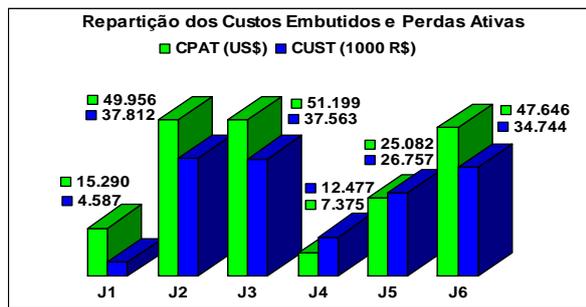


FIGURA 5: Repartição do CUST e CPAT

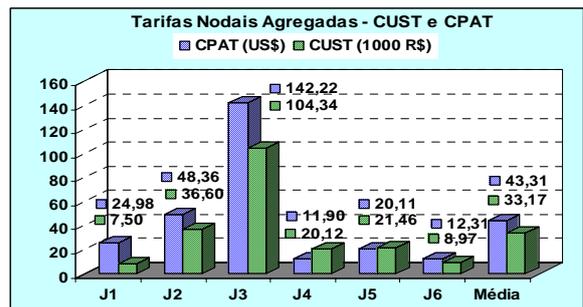


FIGURA 6: Tarifas Nodais Agregadas - CUST e CPAT

4.0 CONCLUSÕES

A seguir é feita uma descrição detalhada sobre os aspectos considerados de maior relevância, citando os rebatimentos técnicos e econômicos decorrente do emprego da abordagem metodológica proposta para repartição dos custos de uso do sistema de transmissão e perdas ativas:

- ❑ É possível alocar os custos decorrentes do uso do serviço de transmissão, combinando-se o Valor de Shapley com os resultados dos fluxos de potência. Estes aspectos conferem a metodologia proposta grande potencial de aplicação aos problemas de repartição de custos abordados;
- ❑ A metodologia proposta atende aos princípios de isonomia e não discriminação, uma vez que ela, ao fixar as tarifas nodais, trata similarmente agentes de mesma natureza. Assim, dois ou mais agentes estarão sujeitos a preços nodais iguais se estiverem conectados a um mesmo barramento. Naturalmente, a fatura paga por cada um deles, dependerá da condição de uso de cada agente;
- ❑ A abordagem metodológica proposta neste artigo permite uma repartição justa dos custos embutidos e perdas ativas, entre todos os agentes envolvidos, auferindo maiores cargas tarifárias aos agentes que utilizam mais intensamente os circuitos da rede de transmissão;
- ❑ A metodologia proposta conduz à cobertura integral do custo total da rede de transmissão e das perdas ativas, sem a necessidade de aplicação de ajustes que possam distorcer os sinais locais obtidos;
- ❑ A metodologia proposta não contempla externalidade, como o Método Nodal proposto pela ANEEL, onde a receita permitida é dividida entre os agentes geradores e consumidores, distorcendo os sinais locais;
- ❑ Os sinais locais, fornecido pela metodologia proposta, são perfeitamente coerentes com a forma de operação da rede de transmissão;
- ❑ Ao contrário da maioria das metodologias disponíveis, esta metodologia permite incorporar os custos incrementais das perdas, sem a necessidade de cálculo externo adicional;
- ❑ Os custos auferidos aos agentes usuários da rede, pelo uso do serviço de transmissão e perdas ativas, refletem em forma e intensidade da utilização da rede, dando um sinal econômico específico em função do porte de cada agente usuário dos circuitos da rede;
- ❑ As repartições dos custos fixos e das perdas ativas entre os agentes e os preços nodais obtidos independem do ponto de operação do sistema e do barramento de referência usado nas análises de fluxo de carga.

5.0 BIBLIOGRAFIA

- [1] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica: “Minuta de Resolução Estabelecendo Condições Gerais de Contratação do Acesso”, Brasília, 1999;
- [2] Contreras, J.; Wu, F.: "Coalition Formation in Transmission Planning" IEEE Trans. PAS, Vol. 14, No 3, Agosto 1999;
- [3] Mas-Colell, A.; Whinston, M. D.; Green, J. R.: “Microeconomic Theory” – Oxford University Press, 1995;
- [4] Shapley, L. S.; Shubik, M.: "Game Theory in Economics" – California, Rand Corporation, 1973;

- [5] Barros, J. R. P.; Melo, A. C. G.: "Utilização dos Custos Marginais de Potência na Formulação de Alternativas para Expansão da Transmissão – Metodologia e Estudo de Caso CHESF" - XV SNPTEE/GPL, Foz do Iguaçu, PR, 1999;
- [6] Barros, J. R. P.; Melo, A. C. G.: "Usando o Valor de Shapley para Planejar a Expansão da Transmissão e Distribuir entre Agentes os Custos da Expansão – Metodologia e Estudo de Caso CHESF" - XVII SNPTEE/GPL, Uberlândia, 2003;
- [7] ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S. A.: "Referências de Custos de Linhas de Transmissão e Subestações de Alta Tensão e Extra Alta Tensão" – Junho, 2001;
- [8] Barros, J. R. P; Melo, A. C. G.: "Usando Teoria dos Jogos Cooperativos para Repartir Custos Associados a Serviços Ancilares - Os Casos da Reserva de Transformação e da Potência Reativa" - XVI SNPTEE/GPL, 2001;
- [9] Barros, J. R. P; Melo, A. C. G.: "Usando Técnicas e Algoritmos da Teoria dos Jogos Cooperativos para Repartir Custos de Perdas Ativas na Transmissão – Metodologia e Estudo de Caso" – IIX SEPOPE, RJ, Brasil, Maio 2004;
- [10] Barros, J. R. P; Melo, A. C. G.: "Um Método para Alocação de Custos de Uso do Sistema de Transmissão Baseado em Coalizões e no Valor de Shapley" – IIX SEPOPE, Rio de Janeiro, Brasil, Maio 2004.