

5

Metodologia para Remuneração do Serviço Ancilar de Suporte de Potência Reativa Quando Provido por Geradores

5.1.

Introdução

Em um sistema de potência, o controle do perfil de tensão nas barras de carga é de grande importância para sua operação adequada. Este controle permite que a tensão terminal dos equipamentos elétricos permaneça dentro dos limites operativos pré-estabelecidos, além de elevar a capacidade dos circuitos de transmissão por meio da redução do fluxo de potência reativa circulante na rede elétrica.

Devido a forte ligação entre a potência reativa e a magnitude da tensão, uma das formas mais eficientes de se realizar este controle de tensão é por meio da injeção ou absorção de potência reativa na rede elétrica, caracterizada por meio do serviço ancilar de suporte de potência reativa. Este serviço ancilar pode ser realizado por diversos tipos de equipamentos, tais como bancos de capacitores e/ou reatores, geradores, compensadores síncronos e estáticos. Além disso, o ajuste de tap dos transformadores tem um papel importante no controle de tensão, pois é capaz de redirecionar o fluxo de potência reativa no sistema [4].

O OIS, ao selecionar os equipamentos mais adequados para prover o serviço ancilar de suporte de potência reativa, deve considerar, além de suas características técnicas, a remuneração exigida pelo provimento do serviço. O valor desta remuneração deve ser suficiente para recuperar os custos incorridos pelos equipamentos no provimento do serviço ancilar e encorajar o aumento da oferta, sem no entanto ultrapassar o benefício proporcionado pelo serviço ao sistema de potência [27].

O valor de remuneração dos equipamentos pode ser obtido de forma direta por meio dos seus custos fixos e variáveis incorridos durante o provimento do serviço ancilar. Os custos variáveis estão associados à operação e manutenção

dos equipamentos que provêm o serviço ancilar, enquanto que os custos fixos se referem ao investimento financeiro necessário para aquisição do equipamento, amortizado ao longo de sua vida útil. Assim, com o objetivo de incentivar a eficiência econômica, deverão ser selecionados pelo OIS os equipamentos que apresentarem os menores custos incorridos durante o provimento do serviço ancilar de suporte de potência reativa.

Esta estratégia se aplica de forma adequada aos equipamentos que possuem como único objetivo o suprimento de potência reativa ao sistema, como os bancos de capacitores e/ou reatores, por exemplo. Entretanto, verifica-se que a aplicação desta estratégia não é trivial para o caso dos geradores, pois estes equipamentos possuem a capacidade de fornecer tanto potência reativa quanto potência ativa. Isto dificulta a definição dos custos incorridos pelos geradores durante o suprimento do serviço ancilar, tornando o cálculo de sua remuneração uma tarefa de difícil execução.

Este trabalho propõe que a remuneração dos geradores que provêm o serviço ancilar de suporte de potência reativa seja função do seu benefício proporcionado ao sistema de potência [27]. O valor deste benefício é obtido por meio da redução no custo de instalação de novas fontes de potência reativa para as situações onde os geradores provêm ou não o serviço ancilar.

Assim, o benefício proporcionado pelos geradores que provêm o serviço ancilar de suporte de potência reativa pode ser calculado como:

$$BSR = CIQ_{SS} - CIQ_{CS} \quad (5.1)$$

onde:

- BSR benefício proporcionado pelo serviço ancilar de suporte de potência reativa
- CIQ_{SS} custo de instalação de novas fontes de potência reativa quando os geradores não provêm o serviço ancilar
- CIQ_{CS} custo de instalação de novas fontes de potência reativa quando os geradores provêm o serviço ancilar

O custo de instalação de novas fontes de potência reativa em cada uma das situações é obtido por meio de um FPO que utiliza como função-objetivo o mínimo custo de instalação de novas fontes de potência reativa. A seção 5.2 apresenta a formulação matemática desta função-objetivo, generalizada para as duas situações citadas.

A parcela de benefício proporcionada por cada gerador é obtida por meio do método de partição de custos de Aumann-Shapley, apresentado na seção 2.9. A remuneração dos geradores será definida de acordo com sua parcela de benefício, de forma justa e eficiente. A aplicação deste método à proposta de remuneração do serviço ancilar de suporte de potência reativa é apresentada na seção 5.3.

A seção 5.4 descreve um algoritmo para a metodologia proposta. A seção 5.5 apresenta a aplicação deste algoritmo a uma rede fictícia de 5 barras, demonstrando passo-a-passo o cálculo da remuneração dos geradores.

Na seção 5.6 são analisados os resultados numéricos obtidos com a aplicação da metodologia proposta a dois sistemas de potência distintos: o sistema IEEE-RTS e o sistema Sul-Sudeste Brasileiro. Finalmente, a seção 5.7 apresenta as principais conclusões obtidas neste capítulo.

5.2.

O Problema de Mínimo Custo de Instalação de Novas Fontes de Potência Reativa

O problema de mínimo custo de instalação de novas fontes de potência reativa tem como objetivo determinar a localização e o dimensionamento das novas fontes de potência reativa que serão instaladas no sistema. A instalação destas novas fontes visa eliminar as violações operativas existentes, por meio do controle do perfil de tensão nas barras do sistema.

Com o objetivo de simplificar o problema de instalação de novas fontes de potência reativa, algumas premissas são adotadas:

- apenas os equipamentos que fornecem exclusivamente potência reativa, como compensadores síncronos e bancos de capacitores e/ou reatores, por exemplo, são consideradas como novas fontes de potência reativa;
- a instalação das novas fontes de potência reativa é realizada de forma linear, ou seja, é possível instalar apenas uma fração de um compensador síncrono, por exemplo;
- o custo unitário de instalação das novas fontes de potência reativa é considerado constante para todas as barras do sistema, independente do montante de potência reativa instalado e do ponto de conexão da nova fonte no sistema.

Cabe salientar que o custo unitário de instalação de novas fontes de potência reativa é fortemente dependente do tipo de equipamento utilizado e da necessidade de potência reativa do sistema. Assim, se for necessário uma injeção discreta de potência reativa em um determinado ponto da rede elétrica, deverá se optar por um banco de capacitores e/ou reatores, que possui um custo unitário baixo. Por outro lado, se esta injeção de potência reativa necessita ser realizada de forma dinâmica, deve-se optar por um compensador síncrono ou um SVC (static var-compensator), que possuem custos unitários mais elevados.

Sendo assim, este problema pode ser formulado a partir da função-objetivo de mínima injeção de potência reativa, descrita em (3.38), multiplicada pelo custo unitário de instalação de novas fontes de potência reativa. Logo:

$$CIQ(QG_1^{\min}, QG_1^{\max}, \dots, QG_{NG}^{\min}, QG_{NG}^{\max}) = \text{Min} \sum CQ_{Ci} QC_i + \sum CQ_{Ii} QI_i \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \text{s.a.} \quad & \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij} = PG_i - PL_i \\ & \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij} = QG_i - QL_i + QC_i - QI_i \\ & PG_i^{\min} \leq PG_i \leq PG_i^{\max} \\ & QG_i^{\min} \leq QG_i \leq QG_i^{\max} \\ & V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \\ & 0 \leq QC_i \leq QC_i^{\max} \\ & 0 \leq QI_i \leq QI_i^{\max} \end{aligned}$$

onde:

CIQ	custo de instalação de potência reativa
CQ_{Ci}	custo unitário de instalação de novas fontes de potência reativa capacitiva na barra i
QC_i	capacidade da nova fonte de potência reativa capacitiva instalada na barra i
CQ_{Ii}	custo unitário de instalação de novas fontes de potência reativa indutiva na barra i
QI_i	capacidade da nova fonte de potência reativa indutiva instalada na barra i
Ω_i	conjunto de barras ligadas a barra i
P_{ij}	fluxo ativo no circuito i-j
PG_i	potência ativa gerada na barra i
PL_i	carga ativa na barra i
Q_{ij}	fluxo reativo no circuito i-j
QG_i	potência reativa gerada na barra i

QL_i	carga reativa na barra i
QC_i	potência reativa capacitiva instalada na barra i
QI_i	potência reativa indutiva instalada na barra i
PG_i^{\min}	limite inferior de geração de potência ativa barra i
PG_i^{\max}	limite superior de geração de potência ativa barra i
QG_i^{\min}	limite inferior de geração de potência reativa barra i
QG_i^{\max}	limite superior de geração de potência reativa barra i
V_i	módulo da tensão na barra i
V_i^{\min}	limite inferior de tensão na barra i
V_i^{\max}	limite superior de tensão na barra i
QC_i^{\max}	limite superior de instalação de novas fontes de potência reativa capacitiva na barra i
QI_i^{\max}	limite superior de instalação de novas fontes de potência reativa indutiva na barra i

Analisando-se as restrições de balanço de potência reativa nas barras do sistema em (5.2), observa-se que a geração de potência reativa por parte dos geradores possui um impacto considerável na definição do valor da função-objetivo. Quanto maior for o suporte de potência reativa disponibilizado pelos geradores, menor será o custo de instalação de novas fontes de potência reativa.

Entretanto, esta relação não apresenta uma característica linear para todos os geradores. A influência que cada gerador possui sobre o custo de instalação de novas fontes de potência reativa varia de acordo com a sua localização na rede elétrica e com seus limites de geração.

5.3. Aplicação do Método de Aumann-Shapley à Metodologia Proposta

Aplicando-se os conceitos de Aumann-Shapley ao problema de mínimo custo de instalação de novas fontes de potência reativa, torna-se possível determinar a parcela de benefício proporcionada por cada gerador ao prover o serviço ancilar de suporte de potência reativa.

Inicialmente, deve-se determinar o valor unitário de Aumann-Shapley, por meio da discretização dos limites de geração de potência reativa dos geradores

de zero até seus valores nominais. Os valores unitários de Aumann-Shapley, referentes aos limites mínimo e máximo de geração de potência reativa, são calculados a partir das seguintes fórmulas:

$$\tilde{\pi}_k^{\min} = \int_{t=0}^1 \frac{\partial \text{CIQ}}{\partial \text{QG}_k^{\min}} (t\text{QG}_1^{\min}, t\text{QG}_1^{\max}, \dots, t\text{QG}_{\text{NG}}^{\min}, t\text{QG}_{\text{NG}}^{\max}) \cdot dt \quad (5.3)$$

$$\tilde{\pi}_k^{\max} = \int_{t=0}^1 \frac{\partial \text{CIQ}}{\partial \text{QG}_k^{\max}} (t\text{QG}_1^{\min}, t\text{QG}_1^{\max}, \dots, t\text{QG}_{\text{NG}}^{\min}, t\text{QG}_{\text{NG}}^{\max}) \cdot dt \quad (5.4)$$

onde:

- $\tilde{\pi}_k^{\min}$ valor unitário de Aumann-Shapley associado ao limite inferior de geração de potência reativa do gerador k
- $\tilde{\pi}_k^{\max}$ valor unitário de Aumann-Shapley associado ao limite superior de geração de potência reativa do gerador k
- QG_k^{\min} limite inferior de geração de potência reativa do gerador k
- QG_k^{\max} limite superior de geração de potência reativa do gerador k
- NG número de geradores que provêm o serviço ancilar de suporte de potência reativa

Para propósitos de cálculo numérico, os limites inferior e superior de geração de potência reativa são fracionados em n partes iguais, onde n é um número suficientemente grande. Isto equivale a discretizar a variável t no intervalo [0, 1], conforme as equações:

$$\tilde{\pi}_k^{\min} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\partial \text{CIQ}}{\partial \text{QG}_k^{\min}} \left(\frac{j}{n} \cdot \text{QG}_1^{\min}, \frac{j}{n} \cdot \text{QG}_1^{\max}, \dots, \frac{j}{n} \cdot \text{QG}_{\text{NG}}^{\min}, \frac{j}{n} \cdot \text{QG}_{\text{NG}}^{\max} \right) \quad (5.5)$$

$$\tilde{\pi}_k^{\max} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\partial \text{CIQ}}{\partial \text{QG}_k^{\max}} \left(\frac{j}{n} \cdot \text{QG}_1^{\min}, \frac{j}{n} \cdot \text{QG}_1^{\max}, \dots, \frac{j}{n} \cdot \text{QG}_{\text{NG}}^{\min}, \frac{j}{n} \cdot \text{QG}_{\text{NG}}^{\max} \right) \quad (5.6)$$

Os custos marginais $\frac{\partial \text{CIQ}}{\partial \text{QG}_k^{\min}}$ e $\frac{\partial \text{CIQ}}{\partial \text{QG}_k^{\max}}$ são função dos multiplicadores

de Lagrange associados às restrições de limite inferior e superior de geração de potência reativa em um problema de FPO. Para demonstrar essa relação, considere os seguintes limites de geração de potência reativa dos geradores:

$$\text{QG}_k \leq \text{QG}_k^{\max} \quad (5.7)$$

$$\text{QG}_k^{\min} \leq \text{QG}_k \quad (5.8)$$

onde:

- QG_k geração de potência reativa na barra k

QG_k^{\min} limite inferior de geração de potência reativa

QG_k^{\max} limite superior de geração de potência reativa

Para as equações (5.7) e (5.8) sejam transformadas em equações de igualdade do tipo $g(x,y)=0$, torna-se necessário a adição de variáveis de folga.

Assim:

$$QG_k - QG_k^{\max} + s_1 = 0 \quad (5.9)$$

$$QG_k - QG_k^{\min} - s_2 = 0 \quad (5.10)$$

onde:

s_1 variável de folga associada ao limite superior de geração de potência reativa

s_2 variável de folga associada ao limite inferior de geração de potência reativa

De acordo com a fórmula para a derivada de uma função valor ótimo, apresentada em (3.96), os custos marginais associados aos limites inferior e superior de geração de potência reativa são os próprios multiplicadores de Lagrange:

$$\frac{\partial CIQ}{\partial QG_k^{\max}} = -\lambda_k^{\max} \cdot \frac{\partial [QG_k - QG_k^{\max} + s_1]}{\partial QG_k^{\max}} = \lambda_k^{\max} \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial CIQ}{\partial QG_k^{\min}} = -\lambda_k^{\min} \cdot \frac{\partial [QG_k - QG_k^{\min} - s_2]}{\partial QG_k^{\min}} = \lambda_k^{\min} \quad (5.12)$$

λ_k^{\max} multiplicador de Lagrange associado ao limite superior de geração de potência reativa

λ_k^{\min} multiplicador de Lagrange associado ao limite inferior de geração de potência reativa

Para o problema de mínimo custo de alocação de potência reativa, os multiplicadores de Lagrange representam a sensibilidade da função-objetivo em relação aos limites superior e inferior de potência reativa dos geradores. Ou seja, como uma variação marginal nos limites de geração de potência reativa de um determinado gerador influencia o custo de instalação de novas fontes de potência reativa no sistema.

Caso o gerador se encontre no seu limite de geração de potência reativa, este não poderá contribuir para a redução da função-objetivo a menos que seus limites sejam ampliados. Os multiplicadores de Lagrange indicam o valor desta

redução marginal na função-objetivo, sem que seja necessário alterar os limites de geração. Entretanto, caso o gerador não tenha alcançado seu limite de geração, o seu multiplicador de Lagrange será nulo, pois um aumento em seus limites não terá nenhum efeito sobre a função-objetivo.

Multiplicando-se os valores unitários de Aumann-Shapley pelos limites de geração de potência reativa dos geradores, obtêm-se a remuneração dos geradores que provêm o serviço ancilar de suporte de potência reativa como função do seu benefício proporcionado ao sistema. Assim:

$$REM_k = \left| \tilde{\pi}_k^{\min} \cdot QG_k^{\min} \right| + \left| \tilde{\pi}_k^{\max} \cdot QG_k^{\max} \right|, k = 1, \dots, NG \quad (5.13)$$

onde:

- REM_k remuneração do gerador k que provê o serviço ancilar de suporte de potência reativa
- $\tilde{\pi}_k^{\min}$ valor unitário de Aumann-Shapley associado ao limite inferior de geração de potência reativa do gerador k
- $\tilde{\pi}_k^{\max}$ valor unitário de Aumann-Shapley associado ao limite superior de geração de potência reativa do gerador k
- QG_k^{\min} limite inferior de geração de potência reativa do gerador k
- QG_k^{\max} limite superior de geração de potência reativa do gerador k

A seguir é apresentado um algoritmo simplificado para a metodologia proposta de remuneração do serviço ancilar de suporte de potência reativa quando provido por geradores.

5.4. Algoritmo de Solução

Passo 1 – Inicializar as variáveis que irão acumular os multiplicadores de Lagrange:

$$\begin{aligned} \pi_k^{\min-T} &= 0 \\ \pi_k^{\max-T} &= 0 \end{aligned}$$

onde:

- $\pi_k^{\min-T}$ variável que acumula os multiplicadores de Lagrange associados ao limite inferior de geração de potência reativa
- $\pi_k^{\max-T}$ variável que acumula os multiplicadores de Lagrange associados ao limite superior de geração de potência reativa

Passo 2 – Inicializar os parâmetros do problema

$$\text{CONT} = 0$$

$$\Delta t = \frac{1}{n}$$

$$t = 0$$

onde:

CONT contador do número de discretizações

n número de discretizações do intervalo [0,1]

Δt incremento de cada discretização

t fator multiplicativo utilizado para definir o valor dos limites de geração de potência reativa a cada discretização

Passo 3 – Determinar os novos limites de geração de potência reativa para a discretização CONT, multiplicando o fator t pelos limites nominais do gerador:

$$QG_k^{\text{min-m}} = t \cdot QG_k^{\text{min}}$$

$$QG_k^{\text{max-m}} = t \cdot QG_k^{\text{max}}$$

onde:

QG_k^{min} limite inferior de geração de potência reativa

$QG_k^{\text{min-m}}$ limite inferior modificado de geração de potência reativa

QG_k^{max} limite superior de geração de potência reativa

$QG_k^{\text{max-m}}$ limite superior modificado de geração de potência reativa

Passo 4 – Determinar os custos marginais dos geradores em cada discretização, por meio dos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de limite superior e inferior de geração de potência reativa.

$$\frac{\partial \text{CIQ}}{\partial QG_k^{\text{min-m}}} (QG_1^{\text{min-m}}, QG_1^{\text{max-m}}, \dots, QG_{\text{NG}}^{\text{min-m}}, QG_{\text{NG}}^{\text{max-m}}) = \lambda_k^{\text{min}}$$

$$\frac{\partial \text{CIQ}}{\partial QG_k^{\text{max-m}}} (QG_1^{\text{min-m}}, QG_1^{\text{max-m}}, \dots, QG_{\text{NG}}^{\text{min-m}}, QG_{\text{NG}}^{\text{max-m}}) = \lambda_k^{\text{max}}$$

Passo 5 – Acumular os custos marginais dos geradores em cada discretização e incrementar o contador do número de discretizações

$$\pi_k^{\text{min-T}} = \pi_k^{\text{min-T}} + \frac{\partial \text{CIQ}}{\partial QG_k^{\text{min-m}}}$$

$$\pi_k^{\text{max-T}} = \pi_k^{\text{max-T}} + \frac{\partial \text{CIQ}}{\partial QG_k^{\text{max-m}}}$$

$$\text{CONT} = \text{CONT} + 1$$

Passo 6 – Incremente o parâmetro t

Se t = 1 então

VÁ PARA O PASSO 7

Senão

$$t = t + \Delta t$$

VOLTE AO PASSO 3

Fim

Passo 7 – Determine os valores unitários de Aumann-Shapley:

$$\tilde{\pi}_k^{\min} = \frac{\pi_k^{\min-T}}{\text{CONT}}$$

$$\tilde{\pi}_k^{\max} = \frac{\pi_k^{\max-T}}{\text{CONT}}$$

Passo 8 – Calcular a remuneração de cada gerador que provê o serviço ancilar de suporte de potência reativa, multiplicando os valores unitários de Aumann-Shapley de cada gerador por seus respectivos limites nominais de geração de potência reativa.

$$\text{REM}_k = \left| \tilde{\pi}_{\min}^k \cdot \text{QG}_k^{\min} \right| + \left| \tilde{\pi}_{\max}^k \cdot \text{QG}_k^{\max} \right|$$

5.5. Exemplo Numérico

Para ilustrar a aplicação deste método, considere o sistema-exemplo de 5 barras mostrado na Figura 5-1. Os dados referentes às barras CA e aos circuitos de transmissão deste sistema são descritos no Apêndice A.

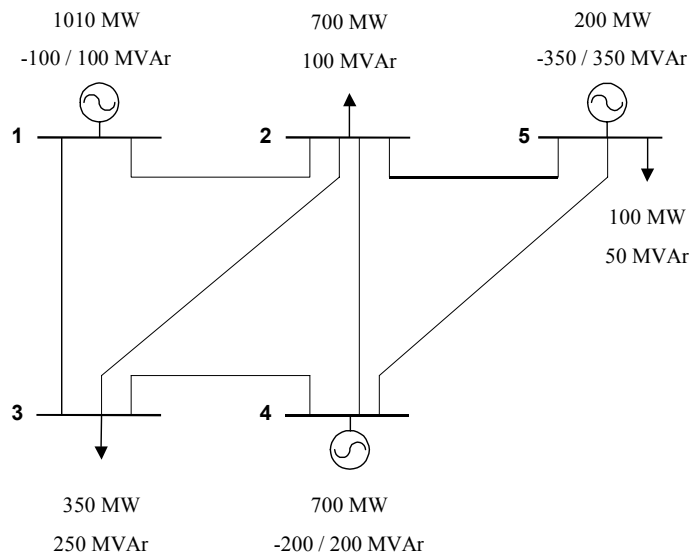


Figura 5-1 – Sistema-Exemplo de 5 Barras

Os valores unitários de Aumann-Shapley serão calculados pelo programa FLUPOT [50], desenvolvido pelo CEPEL. A geração de potência ativa dos geradores, os tap's dos transformadores e demais controles do sistema

permanecerão fixos durante a solução do problema de otimização, com exceção da geração de potência reativa. Com isto, o suporte de potência reativa provido pelos geradores pode ser analisado de forma isolada, sem influência dos demais controles do sistema.

O custo unitário de instalação de novas fontes de potência reativa para este sistema-exemplo será definido de acordo com os seguintes parâmetros fictícios mostrados na Tabela 5.1:

Descrição	Valor
Custo de Investimento	100,00 \$/MVA _r
Custo de Operação (anual)	1,00 \$/MVA _r
Custo de Manutenção (anual)	1,05 \$/MVA _r
Vida Útil do Equipamento	10 anos

Tabela 5.1 – Parâmetros da Nova Fonte de Suporte de Potência Reativa

O custo unitário de instalação de novas fontes de potência reativa será obtido somando-se os custos de operação e manutenção da nova fonte ao seu custo de investimento, amortizado ao longo de sua vida útil.

O método Price será utilizado para o cálculo da amortização do custo de investimento ao longo da vida útil da nova fonte de potência reativa. Este método de amortização possui como característica a uniformidade no valor das prestações a serem pagas, que permanecem constantes ao longo do período de amortização. A fórmula de cálculo das prestações no método Price é: [51]

$$P = \frac{i \cdot (1+i)^{np}}{(1+i)^{np} - 1} \cdot C_{inv} \quad (5.14)$$

onde:

- P valor da prestação paga durante a amortização
- i taxa de juros considerada na amortização
- np número de períodos de amortização
- C_{inv} custo de investimento

Considerando-se que as prestações serão pagas anualmente ao longo da vida útil da nova fonte de potência reativa e que o custo de investimento será amortizado a uma taxa de desconto de 5% a.a., obtêm-se o seguinte valor para a prestação anual:

$$P = \frac{0,05 \cdot (1+0,05)^{10}}{(1+0,05)^{10} - 1} \cdot 100 \$ / MVA_r = 12,95 \$ / MVA_r$$

Somando-se a parcela anual de amortização aos custos anuais de operação e manutenção da nova fonte, obtêm-se o seguinte custo unitário anual de instalação de novas fontes de potência reativa:

$$CQ = P + CO + CM = 12,95 + 1,00 + 1,05 = 15,00 \text{ \$ / MVAr}$$

onde:

- CQ custo unitário anual da nova fonte de suporte de potência reativa
- P valor da amortização anual do custo de investimento
- CO custo de operação anual
- CM custo de manutenção anual

De posse deste custo unitário é possível determinar o custo de instalação de novas fontes de potência reativa para o sistema-exemplo de 5 barras.

O custo de instalação de novas fontes de potência reativa será calculado de acordo com o problema de FPO formulado em (5.2), considerando as situações onde os geradores provêm ou não o serviço ancilar. Os valores obtidos para as duas situações são apresentados na Tabela 5.2.

Serviço Ancilar de Suporte de Potência Reativa	Custo de Instalação de Novas Fontes de Potência Reativa (\$/ano)
Geradores não Provêm o Serviço Ancilar	7.235,40
Geradores Provêm o Serviço Ancilar	3.150,00
Benefício	4.085,40

Tabela 5.2 – Custo Evitado de Instalação de Novas Fontes de Potência Reativa

Observa-se nesta tabela que o custo de instalação de novas fontes de potência reativa foi reduzido quando os geradores provêm o serviço ancilar. O valor desta redução representa o benefício proporcionado pelo serviço ancilar para o sistema de potência. Assim, de acordo com a metodologia proposta, o valor deste benefício será repartido entre os geradores que provêm o serviço ancilar a fim de determinar o valor de suas remunerações.

A repartição do benefício, realizada pelo método de Aumann-Shapley, será realizada inicialmente com 10 discretizações para este exemplo. Assim:

$$n = 10 \text{ e } \Delta t = \frac{1}{n} = 0,10$$

Segundo o algoritmo de solução apresentado na seção 5.4, os limites de geração de potência reativa devem ser modificados a cada discretização do problema, conforme mostrado na Tabela 5.3.

Número da Discretização	Fator t	Gerador 1 (MVar)		Gerador 4 (MVar)		Gerador 5 (MVar)	
		Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
1	0,1	-10	10	-20	20	-35	35
2	0,2	-20	20	-40	40	-70	70
3	0,3	-30	30	-60	60	-105	105
4	0,4	-40	40	-80	80	-140	140
5	0,5	-50	50	-100	100	-175	175
6	0,6	-60	60	-120	120	-210	210
7	0,7	-70	70	-140	140	-245	245
8	0,8	-80	80	-160	160	-280	280
9	0,9	-90	90	-180	180	-315	315
10	1,0	-100	100	-200	200	-350	350

Tabela 5.3 – Limites de Geração de Potência Reativa

Para cada discretização resolve-se um FPO, a partir do qual são calculados os custos marginais associados aos limites de geração de potência reativa dos geradores, de acordo com (5.11) e (5.12). O valor destes custos marginais calculados para cada gerador são apresentados na Tabela 5.4, em cada discretização.

Número da Discretização	Fator t	Gerador 1		Gerador 4		Gerador 5	
		Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
1	0,1	0,00	-15,00	0,00	-14,63	0,00	-14,98
2	0,2	0,00	-14,96	0,00	-14,51	0,00	-14,75
3	0,3	0,00	-14,91	0,00	-13,51	0,00	-0,07
4	0,4	0,00	-14,85	0,00	-13,43	0,00	-0,02
5	0,5	0,00	-14,78	0,00	-13,29	0,00	-0,01
6	0,6	0,00	-14,69	0,00	-0,06	0,00	-0,01
7	0,7	0,00	-14,57	0,00	-0,02	0,00	0,00
8	0,8	0,00	-1,28	0,00	-0,01	0,00	0,00
9	0,9	0,00	-0,07	0,00	-0,01	0,00	0,00
10	1,0	0,00	-0,04	0,00	-0,01	0,00	0,00

Tabela 5.4 – Custos Marginais Associados aos Limites de Potência Reativa

Os custos marginais sinalizam a contribuição individual dos geradores para a redução do custo de instalação de novas fontes de potência reativa no sistema, por isso possuem valores negativos. Os geradores que possuem custos marginais nulos, ou próximos a zero, não possuem influência sobre a redução do custo da função-objetivo.

O valor unitário de Aumann-Shapley, apresentado na Tabela 5.5, é obtido como o valor médio dos custos marginais calculados em cada discretização.

Gerador 1		Gerador 4		Gerador 5	
$\tilde{\pi}_1^{\min}$	$\tilde{\pi}_1^{\max}$	$\tilde{\pi}_4^{\min}$	$\tilde{\pi}_4^{\max}$	$\tilde{\pi}_5^{\min}$	$\tilde{\pi}_5^{\max}$
0,00	-10,51	0,00	-6,95	0,00	-2,98

Tabela 5.5 – Valor Unitário de Aumann-Shapley (\$/MVar)

O valor de remuneração que cabe a cada gerador pelo provimento do serviço ancilar de suporte de potência reativa é calculado multiplicando-se o seu valor unitário de Aumann-Shapley pelos seus limites de geração de potência reativa.

Gerador 1:

$$REM_1 = |QG_1^{\min} \cdot \tilde{\pi}_1^{\min}| + |QG_1^{\max} \cdot \tilde{\pi}_1^{\max}| = |-100 \cdot 0,00| + |100 \cdot (-10,51)|$$

$$REM_1 = 1.051,00 \text{ \$/ano}$$

Gerador 4:

$$REM_4 = |QG_4^{\min} \cdot \tilde{\pi}_4^{\min}| + |QG_4^{\max} \cdot \tilde{\pi}_4^{\max}| = |-200 \cdot 0,00| + |200 \cdot (-6,95)|$$

$$REM_4 = 1.390,00 \text{ \$/ano}$$

Gerador 5:

$$REM_5 = |QG_5^{\min} \cdot \tilde{\pi}_5^{\max}| + |QG_5^{\max} \cdot \tilde{\pi}_5^{\max}| = |-350 \cdot 0,00| + |350 \cdot (-2,98)|$$

$$REM_5 = 1.043,00 \text{ \$/ano}$$

Observa-se que a remuneração total dos geradores que provêm o serviço ancilar (3.484,00 \$/ano) não recupera integralmente o benefício proporcionado ao sistema (4.085,40 \$/ano), ocasionando em um erro de 14,72%. Para reduzir o erro cometido no cálculo da remuneração dos geradores é necessário que o número de discretizações do método de Aumann-Shapley seja aumentado.

A Tabela 5.6 demonstra como a elevação do número de discretizações do método de Aumann-Shapley reduz o erro cometido no cálculo da remuneração dos geradores.

Gerador	Remuneração dos Geradores (\$/ano) ¹		
	n = 10	n = 100	n = 1.000
1	1.051,00	1.170,15	1.176,45
4	1.390,00	1.506,75	1.516,50
5	1.043,00	1.353,45	1.373,25
Remuneração Total	3.484,00	4.030,35	4.066,20
Benefício	4.085,40	4.085,40	4.085,40
Erro (%)	14,72	1,35	0,47

Tabela 5.6 – Remuneração dos Geradores

Observa-se nesta tabela que a precisão do método de Aumann-Shapley aumenta conforme o número de discretizações n se eleva, devido à redução do incremento de potência reativa ($\Delta t=1/n$).

¹ Os resultados associados a 100 e 1.000 discretizações não foram detalhados porque seguem o mesmo raciocínio dos resultados obtidos com 10 discretizações.

A Figura 5-2 ilustra, de forma gráfica, os valores unitários de Aumann-Shapley e as remunerações dos geradores calculados com 1.000 discretizações.

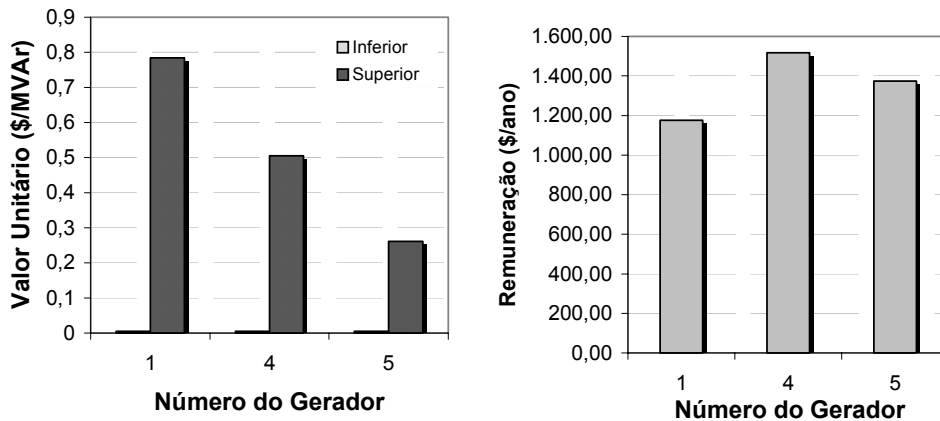


Figura 5-2 – Valor Unitário e Remuneração dos Geradores que Provêm o Serviço Ancilar de Suporte de Potência Reativa

O primeiro gráfico evidencia a necessidade de potência reativa capacitiva do sistema de potência, representada pelos expressivos valores unitários de Aumann-Shapley referentes aos limites superiores de potência reativa dos geradores, em contraste com os valores unitários nulos referentes aos limites inferiores. Estes valores unitários representam a parcela de benefício que cada gerador proporciona ao sistema ao prover o serviço ancilar de suporte de potência reativa. Pode-se observar neste gráfico também que os custos unitários são diferenciados de acordo com localização dos geradores na rede elétrica. Isto enfatiza a característica local do serviço ancilar de suporte de potência reativa.

Esta característica local pode ser melhor observada por meio do gerador 1, que se destaca com o maior valor unitário de Aumann-Shapley na Figura 5-2. Isto ocorre porque este gerador se localiza em um ponto privilegiado da rede elétrica: distante dos geradores 4 e 5 e próximo às barras de carga 2 e 3.

Devido a sua localização, o gerador 1 possui influência direta sobre o controle de tensão nas barras carga, o que se reflete em uma redução significativa no custo de instalação de novas fontes de potência reativa no sistema. Esta redução, que determina a parcela de benefício proporcionado pelo gerador 1, é explicitada por meio de seus valores unitários de Aumann-Shapley.

O gerador 4, embora também se encontre eletricamente próximo às barras de carga 2 e 3, obteve um valor unitário de Aumann-Shapley inferior. Isto pode ser explicado pelo fato deste gerador encontrar-se próximo ao gerador 5, o que reduz a sua influência sobre o controle de tensão nas barras de carga localizadas em sua vizinhança. Como a influência do gerador 4 é inferior ao do

gerador 1, a parcela de benefício proporcionado por este gerador também será inferior.

O gerador 5 possui o menor valor unitário de Aumann-Shapley, embora se encontre diretamente conectado a uma carga reativa de 50 MVar. Contudo, esta carga representa apenas uma parcela da capacidade de geração de potência reativa deste gerador (350 MVar). A parcela de capacidade restante (300 MVar) destina-se ao controle de tensão nas barras de carga 2 e 3 do sistema.

Observa-se que o gerador 5 encontra-se eletricamente distante destas barras de carga e próximo ao gerador 4, o que reduz de forma significativa a sua influência sobre o controle de tensão nestas barras. Isto faz com o que a parcela de benefício proporcionada pelo gerador 5 seja a menor do sistema, o que se traduz no menor valor unitário de Aumann-Shapley dentre os demais geradores.

Este exemplo demonstra como a característica local do serviço ancilar de suporte de potência reativa influencia os valores unitários de Aumann-Shapley dos geradores. Esta característica permite sinalizar de forma adequada à necessidade de expansão na oferta do serviço, remunerando com tarifas mais elevadas os geradores que se encontram em áreas com deficiência de potência reativa e que são mais eficientes no controle da tensão das barras de carga localizadas em sua vizinhança.

Conclui-se, portanto, que os resultados obtidos com a metodologia proposta para o sistema-exemplo de 5 barras são coerentes com o serviço ancilar provido pelos geradores, o que comprova a eficácia da metodologia proposta.

5.6. Resultados Numéricos

Nesta seção são analisados os resultados numéricos obtidos com a aplicação da metodologia proposta a dois sistemas de potência distintos:

- sistema IEEE-RTS, composto por 24 barras, 11 geradores e 2 áreas;
- sistema Sul-Sudeste Brasileiro, composto por 2.292 barras, 176 geradores e 55 áreas na configuração do ano de 2001.

Admitiu-se que o montante de serviço ancilar provido por cada gerador é igual a sua capacidade nominal de geração de potência reativa. Admitiu-se

também que o custo unitário da nova fonte de potência reativa é igual a 15 \$/MVA_r para os dois sistemas de potência, conforme calculado na seção 5.5.

Os resultados numéricos serão obtidos utilizando-se o algoritmo apresentado na seção 5.4. Os valores unitários de Aumann-Shapley serão calculados pelo programa FLUPOT [50], desenvolvido pelo CEPEL. Embora o FLUPOT permita que diversos controles do sistema de potência sejam alterados durante a solução do problema de otimização, neste estudo será permitida a otimização dos controles de geração de potência reativa e perfil de tensão nas barras de carga apenas. Este critério foi selecionado com o objetivo de se analisar o serviço ancilar de suporte de potência reativa quando prestado exclusivamente por geradores.

A primeira análise a ser realizada irá tratar da aplicação da metodologia proposta ao sistema IEEE-RTS [52]. O diagrama unifilar deste sistema de potência é mostrado na Figura 5-3.

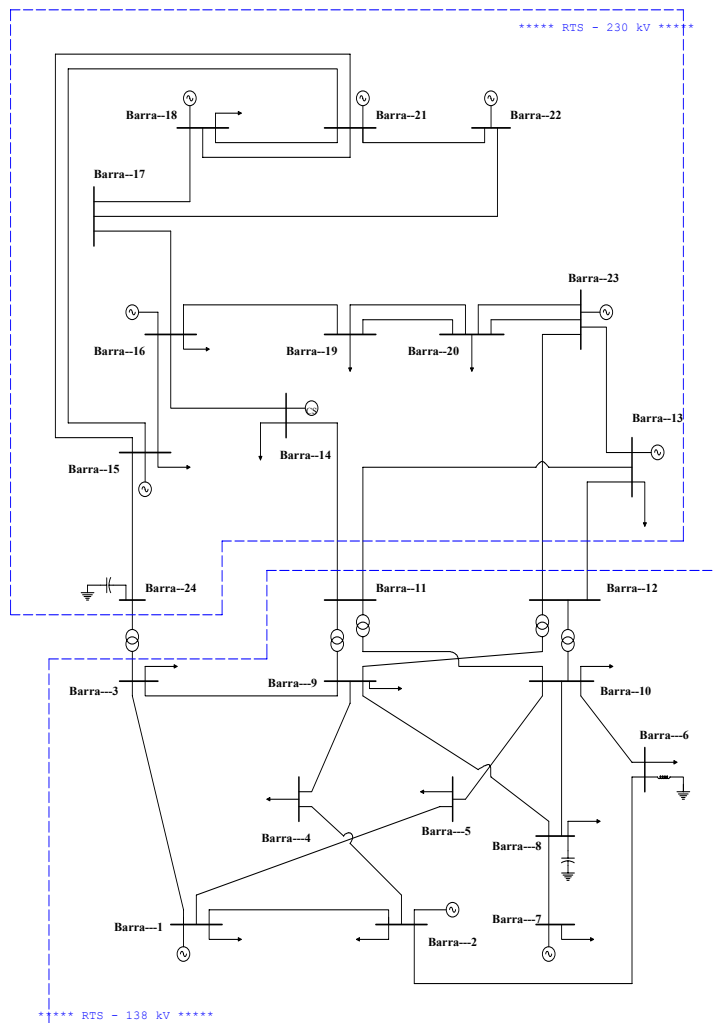


Figura 5-3 – Diagrama Unifilar do Sistema IEEE-RTS

Os valores unitários de Aumann-Shapley, referentes aos limites inferior e superior de geração de potência reativa dos geradores, são apresentados na Figura 5-4 e no Apêndice C.

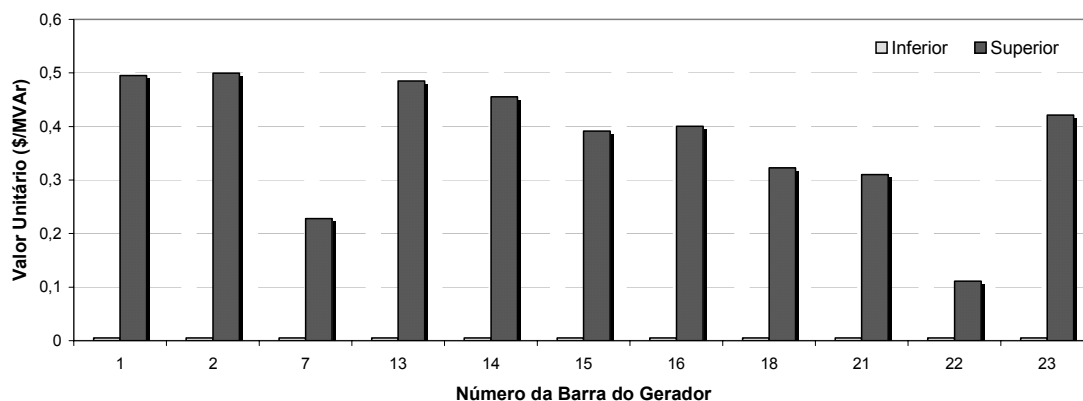


Figura 5-4 – Valor Unitário de Aumann-Shapley – Sistema IEEE-RTS

Pode-se observar que os valores unitários de Aumann-Shapley associados ao limite inferior de geração de potência reativa são nulos. Isto ressalta a deficiência de potência reativa capacitiva deste sistema, que é suprida em parte pelo serviço ancilar prestado pelos geradores.

Destacam-se neste gráfico os geradores 22 e 7, com os menores valores unitários de Aumann-Shapley. O reduzido valor unitário do gerador 22 pode ser explicado por sua localização em uma área com excesso de geração, distante portanto das barras de carga onde se deseja realizar o controle de tensão.

O gerador 7, embora se encontre em uma área com carência de geração, também possui um dos menores valores unitários de Aumann-Shapley do sistema. Isto ocorre porque este gerador, conectado ao sistema de potência por um único circuito de geração, possui um equipamento de suporte de potência reativa instalado na sua barra de fronteira com o sistema (barra 8). Este equipamento reduz de forma significativa a influência do gerador 7 sobre o controle de tensão nas barras de carga em sua vizinhança, levando a valores unitários de Aumann-Shapley reduzidos.

No outro extremo, com valores unitários de Aumann-Shapley significativos, encontram-se os geradores 1, 2 e 14. Estes geradores se encontram em uma área com escassez de geração e próximos às barras de carga do sistema, o que favorece o controle de tensão realizado por seus suportes de potência reativa. O gerador 13 se encontra em uma área intermediária e por isso também possui um valor unitário de Aumann-Shapley significativo.

À medida que os geradores vão se distanciando das cargas, o seus valores unitários de Aumann-Shapley vão sendo reduzidos. Isto ocorre com os demais geradores, localizados em uma área com excesso de geração.

As remunerações dos geradores, calculadas por meio de seus valores unitários de Aumann-Shapley multiplicados por seus limites de geração de potência reativa, são apresentados na Figura 5-5.

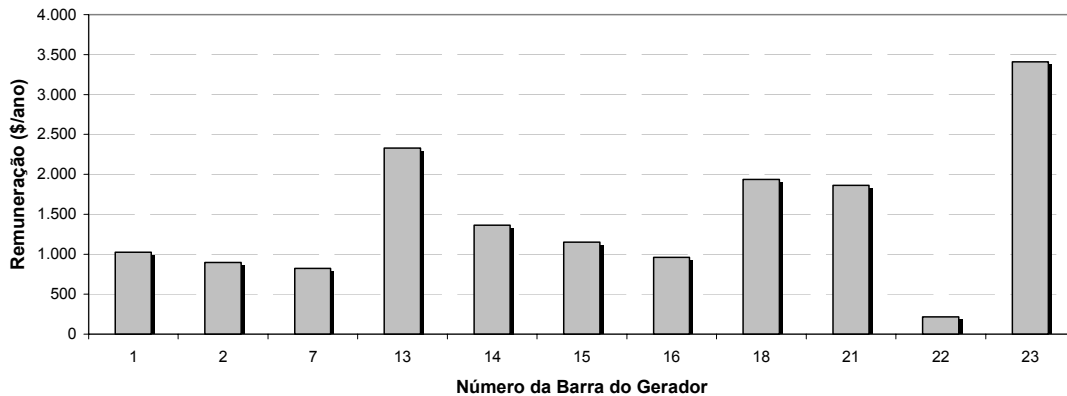


Figura 5-5 – Remuneração dos Geradores – Sistema IEEE-RTS

Verifica-se que a remuneração total dos geradores (15.972,60 \$/ano), obtida por meio da discretização dos seus limites de potência reativa em 1.000 pontos, é bastante próxima do benefício proporcionado pelo serviço ancilar (15.979,95 \$/ano), resultando em um erro inferior a 1%.

Com o objetivo de comprovar a eficácia da metodologia proposta em sistema de grande porte, será calculada a remuneração dos geradores que provêm o serviço ancilar de suporte de potência reativa no sistema Sul-Sudeste Brasileiro. Os resultados obtidos são mostrados no Apêndice C e nas Figuras 5-6 a 5-13.

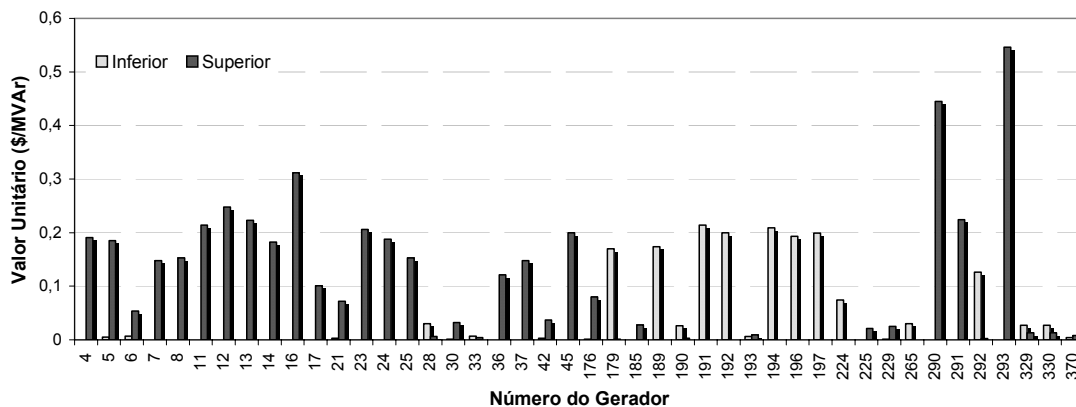


Figura 5-6 – Valor Unitário de Aumann-Shapley – Sistema S-SE (1)

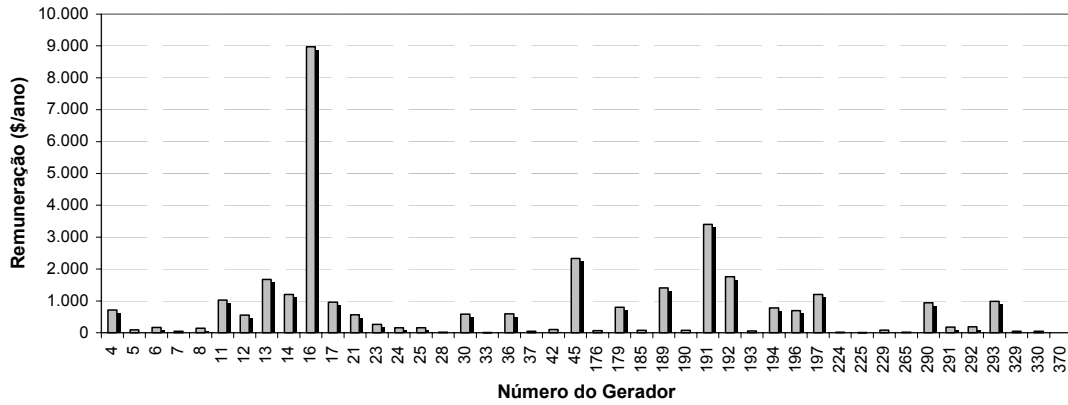


Figura 5-7 – Remuneração dos Geradores – Sistema S-SE (1)

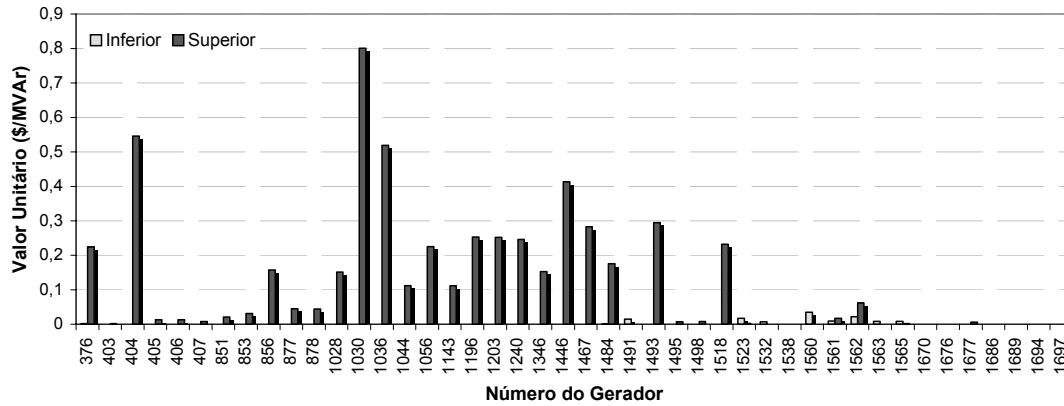


Figura 5-8 – Valor Unitário de Aumann-Shapley – Sistema S-SE (2)

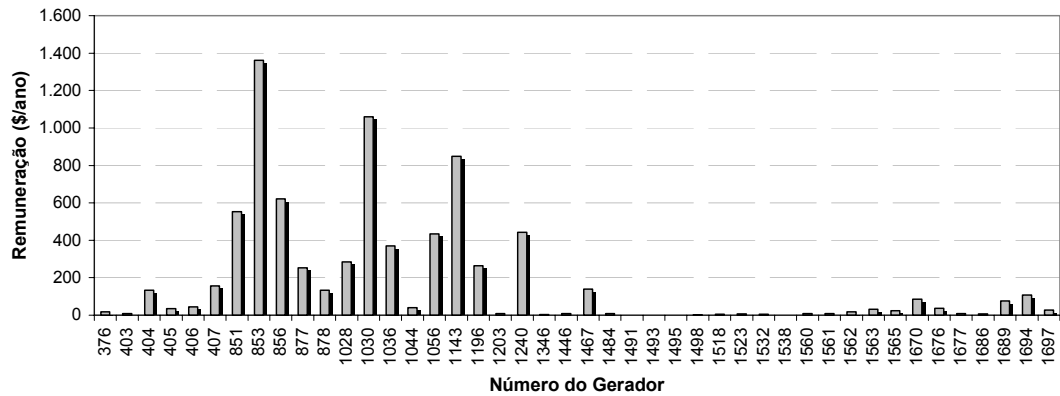


Figura 5-9 – Remuneração dos Geradores – Sistema S-SE (2)

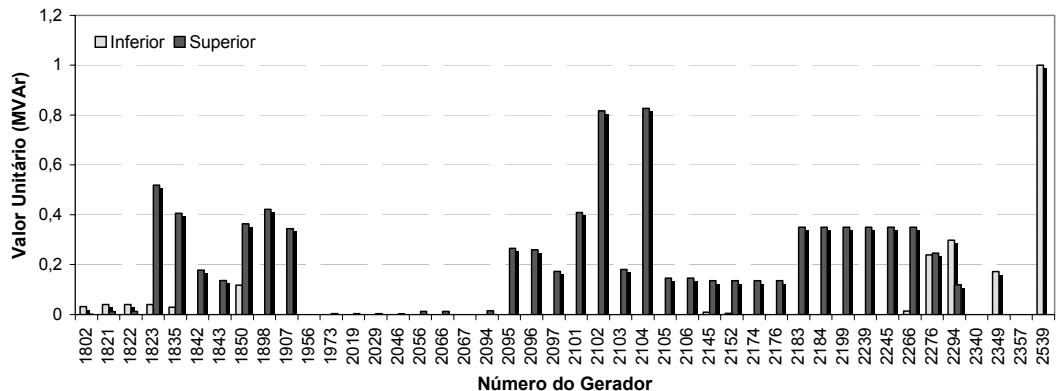


Figura 5-10 – Valor Unitário de Aumann-Shapley – Sistema S-SE (3)

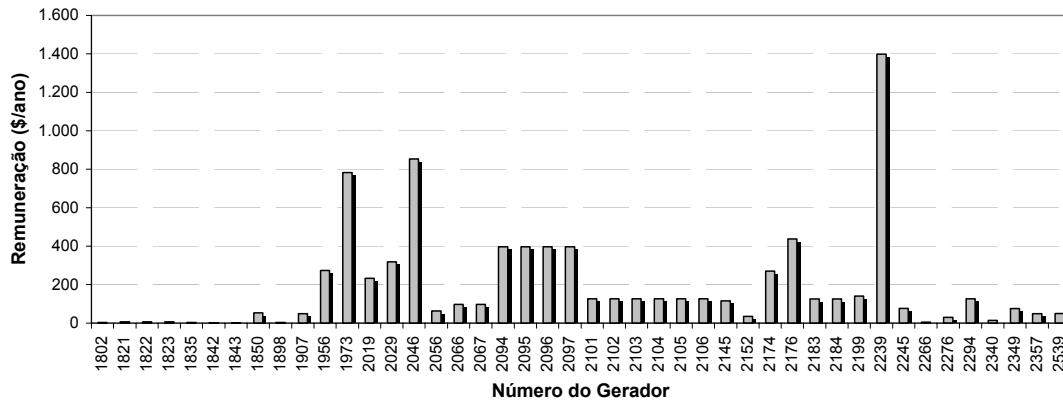


Figura 5-11 – Remuneração dos Geradores – Sistema S-SE (3)

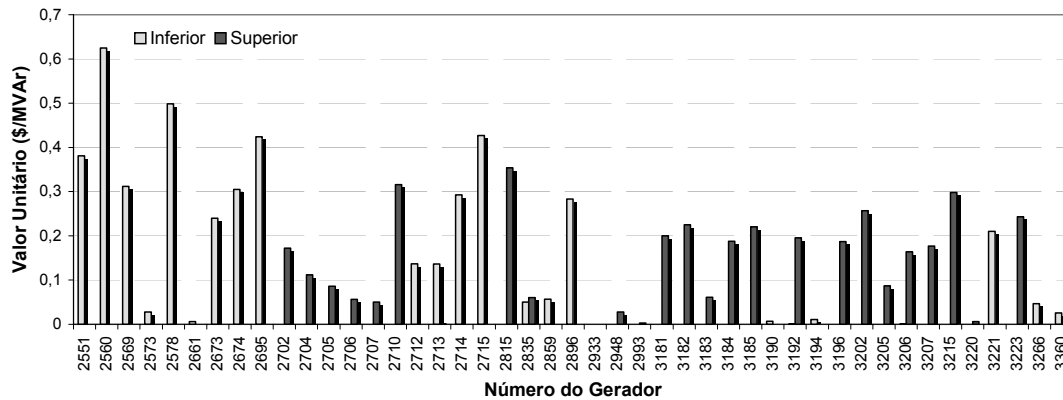


Figura 5-12 – Valor Unitário de Aumann-Shapley – Sistema S-SE (4)

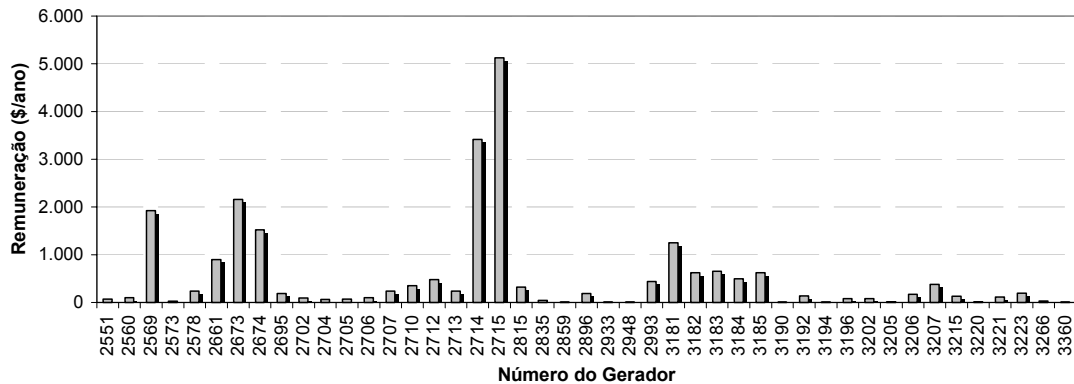


Figura 5-13 – Remuneração dos Geradores – Sistema S-SE (4)

A remuneração total dos geradores (72.489,45 \$/ano) permanece próxima ao benefício proporcionado pelo serviço ancilar (70.562,70 \$/ano), resultando em um erro de 2,73% quando os limites de geração de potência reativa são discretizados em 1.000 pontos. Estes resultados demonstram que a metodologia proposta para precificação do serviço ancilar de suporte de potência reativa mantém suas características de justiça e eficiência mesmo em sistema de grande porte.

Para os dois sistemas de potência analisados considerou-se que o serviço ancilar é provido pelos geradores por um período de 1 ano, durante o qual a configuração do sistema de potência permanece inalterada. Entretanto, a metodologia proposta poderia ser aplicada para horizontes de remuneração mais curtos, como 1 hora, por exemplo.

Neste caso, o cálculo do custo unitário da nova fonte de potência reativa deveria considerar que os pagamentos seriam realizados em uma base horária, em lugar da base anual. Sendo assim, a configuração da rede elétrica deveria ser constantemente atualizada e a remuneração dos geradores deveria ser recalculada para cada hora de operação do sistema de potência.

5.7. Conclusões

Este capítulo apresentou a metodologia proposta de remuneração para os geradores que provêem o serviço ancilar de suporte de potência reativa. O valor desta remuneração é definido em função do benefício proporcionado pelo serviço ancilar ao sistema de potência.

Foi demonstrado que este benefício pode ser obtido por meio da redução observada no custo de instalação de novas fontes de potência reativa para as situações onde os geradores provêem ou não o serviço ancilar. Em cada uma das situações foi empregado um algoritmo de fluxo de potência ótimo, com função-objetivo de mínimo custo de instalação de novas fontes de potência reativa.

O custo unitário de instalação de novas fontes de potência reativa foi definido com base nos custos de investimento, manutenção e operação de uma nova fonte de potência reativa. O valor deste custo unitário varia de acordo com as necessidades de potência reativa do sistema e do tipo de equipamento a ser utilizado. Por exemplo, se for necessário uma injeção discreta de potência reativa em um determinado ponto da rede elétrica, deverá se optar por um banco de capacitores ou reatores, que possui um custo unitário baixo. Por outro lado, se esta injeção de potência reativa necessita ser realizada de forma dinâmica, deve-se optar por um compensador síncrono ou um SVC (static var-compensator), que possuem custos unitários mais elevados.

Foi considerado que o serviço ancilar seria provido por um período de 1 ano, durante o qual a configuração do sistema de potência permaneceria

inalterada. Entretanto, foi comentado que a metodologia poderia ser aplicada a outros horizontes de tempo, como 1 hora, por exemplo. Nestes casos o custo unitário seria calculado em uma base horária e a configuração do sistema deveria ser constantemente atualizada. Assim, seriam obtidos diversos valores horários de remuneração para os geradores, sem que seja necessário realizar modificações substanciais na metodologia proposta.

Com o objetivo de verificar a eficácia da metodologia, foi calculada a remuneração dos geradores que provêm o serviço ancilar em dois sistemas de potência distintos: o sistema IEEE-RTS, com 24 barras, e Sul-Sudeste Brasileiro, com 2.292 barras. Para enfatizar a influência que os geradores exercem sobre o controle de tensão no sistema, foi permitida apenas a otimização dos controles de potência reativa dos geradores e perfil de tensão nas barras do sistema.

Os resultados obtidos nos dois sistemas de potência se mostraram coerentes com o serviço ancilar prestado pelos geradores. Os valores unitários de Aumann-Shapley foram capazes de sinalizar a repartição do benefício proporcionado pelo serviço ancilar de suporte de potência reativa entre os geradores. Observou-se que este benefício se mostrou mais elevado nas áreas com carência de suporte de potência reativa, o que comprova a coerência da metodologia proposta, mesmo quando aplicada a sistemas de grande porte.

Conclui-se que esta metodologia poderá auxiliar o Operador Independente do Sistema na tarefa de definir uma estrutura de remuneração para os geradores que provêm o serviço ancilar de suporte de potência reativa.