

## 6

# Metodologia para Remuneração do Serviço Ancilar de Reserva de Potência Quando Provido por Geradores

### 6.1.

#### Introdução

Quando um sistema de potência sofre uma contingência, como a perda de unidades de transmissão ou de geração, podem ser verificados desequilíbrios no conjunto carga-geração ou extrapolações nos limites de capacidade dos circuitos de transmissão. Nestas situações torna-se necessário o emprego de medidas corretivas que eliminem estas violações operativas, reconduzindo o sistema a um ponto de operação seguro.

Dentre o conjunto de medidas corretivas disponíveis, destacam-se o redespacho de potência ativa, o controle de tensão e o corte de carga. A medida corretiva mais severa que pode ser aplicada a um sistema de potência é o corte de carga, pois reduz o suprimento de energia elétrica a uma parcela dos consumidores finais do sistema. Esta medida corretiva possui um alto custo, pois estes consumidores devem ser compensados financeiramente pelo período em que seu fornecimento de energia permaneceu restringido.

O valor dos prejuízos sofridos por um consumidor final devido à aplicação da medida corretiva de corte de carga pode ser mensurado por meio do custo unitário de interrupção, definido em \$/MWh. Este custo unitário de interrupção varia de acordo com a natureza do consumidor, sendo reduzido para consumidores residenciais e mais elevado para consumidores comerciais e industriais. Além disso, o custo de interrupção sofre influência do tempo de duração da interrupção, possuindo valores diferenciados para horizontes de curto ou longo prazo [53].

Em estudos de confiabilidade é possível analisar o impacto da medida corretiva de corte de carga quando o sistema é submetido a diversas contingências, por meio do cálculo de índices de confiabilidade como o valor esperado de energia não suprida (EENS). Assim, quanto maior for o impacto das

contingências analisadas no estudo de confiabilidade, maior será o valor do índice de EENS para o sistema.

Contudo, o índice de EENS do sistema pode ser reduzido por meio do serviço ancilar de reserva de potência, provido por geradores conectados à rede elétrica e sincronizados com o sistema de potência. Este serviço ancilar visa disponibilizar ao OIS uma quantidade extra de potência ativa, que pode ser imediatamente utilizada durante uma situação de contingência para restabelecer o equilíbrio no conjunto carga-geração. A Figura 6-1 mostra uma representação esquemática da reserva de potência, para as situações de operação normal e contingência em um sistema de potência:

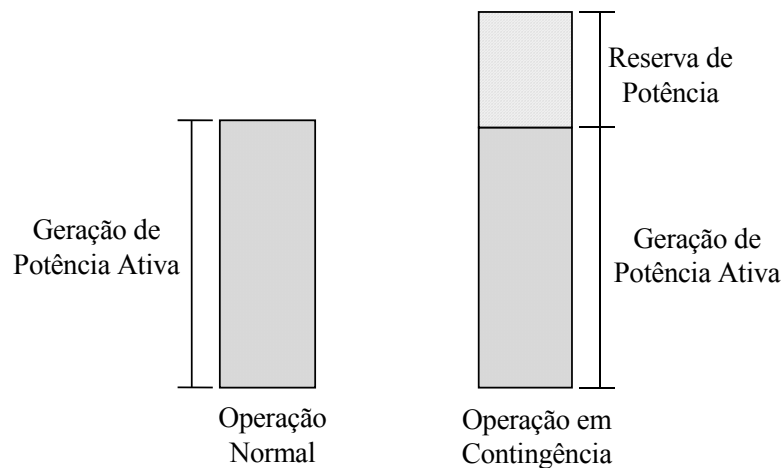


Figura 6-1 – Representação Esquemática da Reserva de Potência

Para que esta reserva de potência seja disponibilizada, torna-se necessário que os geradores reduzam os seus limites de geração de potência ativa durante a operação normal do sistema, com objetivo de reservar uma parcela de sua capacidade de geração para situações de contingência. Contudo, é possível que a receita de venda de energia destes geradores seja reduzida devido à restrição imposta em seus limites de geração de potência ativa durante a operação normal do sistema. Isto faz com que estes geradores incorram em um custo ao prover o serviço ancilar, que deve ser remunerado de alguma forma pelo OIS.

Uma forma de definir o valor da remuneração para esses geradores é por meio do seu custo de oportunidade de venda de energia, conforme mostra a Figura 6-2. O custo de oportunidade é calculado em função da parcela de energia dos geradores que deixa de ser comercializada quando estes provêm reserva, multiplicada pela diferença entre a tarifa de venda e o custo de geração da energia.

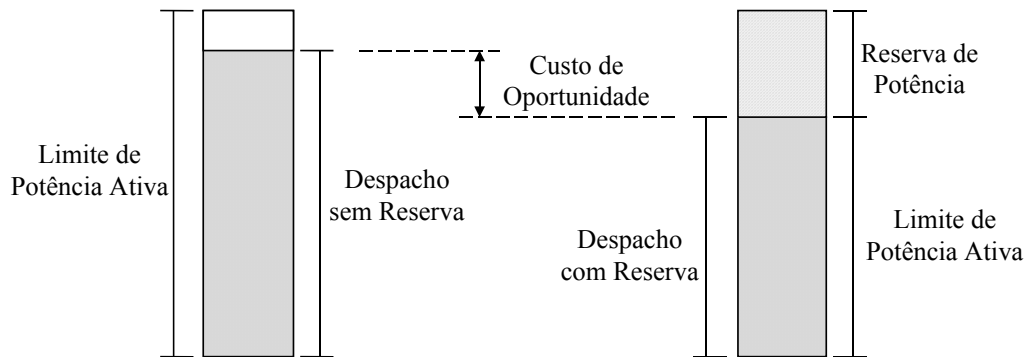


Figura 6-2 – Custo de Oportunidade dos Geradores ao Prover Reserva de Potência

Entretanto, caso o despacho dos geradores não seja restringido pela disponibilização da reserva de potência, estes não sofrerão reduções em sua receita de venda de energia e não incorrerão em custos de oportunidade. Estes geradores, portanto, não serão remunerados de acordo com o critério apresentado, mesmo que forneçam um benefício substancial de confiabilidade para o sistema de potência.

Por outro lado, em situações onde o preço de venda de energia seja excessivamente elevado e os geradores estejam no limite de suas capacidades, o custo de oportunidade pago será igualmente elevado. Desta forma, o custo do serviço ancilar provido por estes geradores poderia ultrapassar o seu benefício de confiabilidade proporcionado ao sistema.

Conclui-se, portanto, que o custo de oportunidade não é uma forma justa de remunerar o serviço ancilar de reserva de potência, pois é dependente da política de despacho dos geradores e não analisa o benefício de confiabilidade proporcionado ao sistema de potência.

Este trabalho propõe que as remunerações dos geradores sejam função do benefício proporcionado ao sistema de potência quando estes provêm o serviço ancilar de reserva de potência. Este benefício será mensurado em função da redução verificada no custo de interrupção do sistema para as situações onde os geradores provêm ou não o serviço ancilar de reserva de potência, multiplicado pelo número de horas em que o serviço é provido.

Assim, o benefício proporcionado pelo serviço ancilar de reserva de potência é calculado como:

$$\text{BENF} = (\text{CINT}_{\text{SR}} - \text{CINT}_{\text{CR}}) \cdot \text{NHS} \quad (6.1)$$

onde:

BENF      benefício proporcionado pelo serviço ancilar de reserva de potência

- $CINT_{SR}$  custo de interrupção do sistema de potência calculado quando os geradores não provêm o serviço ancilar de reserva de potência
- $CINT_{CR}$  custo de interrupção do sistema de potência calculado quando os geradores provêm o serviço ancilar de reserva de potência
- NHS número de horas em que o serviço ancilar é provido

A parcela de remuneração que cabe a cada gerador é calculada por meio da repartição do benefício entre os geradores, utilizando-se o método de Aumann-Shapley apresentado na seção 2.9. A utilização deste método garante que os critérios de justiça e eficiência sejam alcançados durante repartição do benefício.

O custo de interrupção do sistema é obtido por meio de um FPO que utiliza como função-objetivo o mínimo custo de corte de carga, calculado em um estudo de confiabilidade onde são simuladas diversas contingências. A formulação matemática desta função-objetivo é apresentada na seção 6.2.

O emprego do método de Aumann-Shapley no cálculo da repartição do benefício entre os geradores que provêm o serviço ancilar é apresentado na seção 6.3, juntamente com o cálculo de suas remunerações. A seção 6.4 apresenta um algoritmo simplificado da metodologia proposta e a seção 6.5 apresenta a aplicação deste algoritmo a uma rede fictícia de 5 barras, demonstrando passo-a-passo a metodologia proposta. Os resultados obtidos com a metodologia proposta, aplicada a dois sistemas de potência distintos, são apresentados na seção 6.6. Finalmente, a seção 6.7 apresenta as principais conclusões deste capítulo.

## **6.2.**

### **O Problema de Mínimo Custo de Corte de Carga**

O problema de mínimo custo de corte de carga visa eliminar as violações operativas do sistema de potência, como a extrapolação dos limites de carregamento dos circuitos e dos limites de tensão nas barras de carga, por meio da redução na demanda do sistema. Este problema é formulado a partir da função-objetivo de mínimo corte de carga (3.41), apresentada na seção 3.3.3, multiplicada pelo custo unitário de interrupção das barras de carga do sistema.

Formalmente:

$$CC(tPG_1^{res}, tPG_2^{res}, \dots, tPG_{NG}^{res}) = \min \sum C_{int_i} \cdot (1 - FC_i) \cdot PL_i \quad (6.2)$$

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

onde:

CC	custo de corte de carga
$C_{int_i}$	custo unitário de interrupção da barra i
$FC_i$	fração de carga efetiva na barra i (em pu)
$PL_i$	carga ativa na barra i
$\Omega_i$	conjunto de barras ligadas à barra i
$P_{ij}$	fluxo de potência ativa no circuito i-j
$PG_i$	potência ativa gerada na barra i
$Q_{ij}$	fluxo de potência reativa no circuito i-j
$QG_i$	potência reativa gerada na barra i
$QL_i$	carga reativa na barra i
$PG_i^{\min}$	limite inferior de geração de potência ativa na barra i
$PG_i^{\max}$	limite superior de geração de potência ativa na barra i
$PG_i^{res}$	limite de reserva de potência na barra i, disponível apenas na ocorrência de contingências
$QG_i^{\min}$	limite inferior de geração de potência reativa na barra i
$QG_i^{\max}$	limite superior de geração de potência reativa na 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

Observe que  $FC_i \cdot PL_i$  representa a carga ativa efetiva na barra i, enquanto que  $(1 - FC_i) \cdot PL_i$  representa o corte de carga nesta barra.

Este FPO tem por objetivo determinar o mínimo custo de corte de carga no sistema necessário para eliminar as violações operativas. O valor do custo unitário de interrupção utilizado neste FPO pode ser diferenciado por barra de

carga, com o objetivo de refletir as características de cada consumidor (residencial, comercial, industrial, etc).

A reserva de potência dos geradores possui um impacto considerável sobre o valor da função-objetivo em (6.2), pois permite ampliar os limites de geração de potência ativa durante as situações de contingência. A influência que cada gerador possui sobre o custo de corte de carga do sistema varia de acordo com sua localização na rede elétrica e com a capacidade dos circuitos de transmissão localizados ao seu redor.

### 6.3. Aplicação do Método de Aumann-Shapley à Metodologia Proposta

Aplicando-se os conceitos de Aumann-Shapley ao problema de mínimo custo de corte de carga, torna-se possível determinar a parcela de benefício proporcionada por cada gerador ao prover o serviço ancilar de reserva de potência.

Inicialmente, deve-se determinar o valor unitário de Aumann-Shapley para cada gerador, em cada contingência simulada. Este valor unitário é obtido por meio da discretização do limite de reserva de potência ativa dos geradores desde zero até seus valores nominais.

Desta forma, o valor unitário de Aumann-Shapley do gerador  $k$  na contingência  $CT$ , é obtido como:

$$\tilde{\pi}_k^{CT} = \int_{t=0}^1 \frac{\partial CC^{CT}}{\partial PG_k^{res}} (tPG_1^{res}, tPG_2^{res}, \dots, tPG_{NG}^{res}) \cdot dt \quad (6.3)$$

onde:

- $\tilde{\pi}_k^{CT}$  valor unitário de Aumann-Shapley associado ao limite de reserva de potência do gerador  $k$  na contingência  $CT$
- $CC^{CT}$  custo de corte de carga associado à contingência  $CT$
- $PG_k^{res}$  limite de reserva de potência do gerador  $k$
- $NG$  número de geradores que provêm o serviço ancilar de reserva de potência

Para propósitos de cálculo numérico, o limite de reserva de potência dos geradores é fracionado em  $n$  partes iguais, onde  $n$  é um número suficientemente grande. Isto é equivalente a discretizar a variável  $t$  no intervalo  $[0, 1]$ .

$$\tilde{\pi}_k^{CT} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\partial CC^{CT}}{\partial PG_k^{res}} \left( \frac{j}{n} \cdot PG_1^{res}, \frac{j}{n} \cdot PG_2^{res}, \dots, \frac{j}{n} \cdot PG_{NG}^{res} \right) \quad (6.4)$$

Vale salientar que apenas o limite de reserva de potência dos geradores,  $PG_k^{res}$ , é discretizado durante a aplicação do método de Aumann-Shapley. Os limites inferior e superior de potência ativa dos geradores,  $PG_k^{min}$  e  $PG_k^{max}$ , permanecem fixos durante todo o processo de cálculo.

O custo marginal  $\frac{\partial CC^{CT}}{\partial PG_k^{res}}$  é função do multiplicador de Lagrange

associado à restrição de limite superior de reserva de potência dos geradores. Para demonstrar essa relação, considere o seguinte limite de para um determinado gerador k:

$$PG_k \leq PG_k^{max} + PG_k^{res} \quad (6.5)$$

Para que a equação (6.5) seja transformada em uma equação de igualdade do tipo  $g(x,y)=0$ , torna-se necessário a adição de uma variável de folga  $s_1$ . Assim:

$$PG_k - PG_k^{max} - PG_k^{res} + s_1 = 0 \quad (6.6)$$

onde:

$s_1$  variável de folga associada ao limite de reserva de potência

De acordo com a fórmula para a derivada de uma função valor ótimo, apresentada em (3.96), conclui-se que o custo marginal associado ao limite de reserva de potência é o próprio multiplicador de Lagrange:

$$\frac{\partial CC^{CT}}{\partial PG_k^{res}} = -\lambda_k^{res} \cdot \frac{\partial [PG_k - PG_k^{max} - PG_k^{res} + s_1]}{\partial PG_k^{res}} = \lambda_k^{res} \quad (6.7)$$

$\lambda_k^{res}$  multiplicador de Lagrange associado ao limite de reserva de potência

Este custo marginal representa a sensibilidade da função-objetivo em relação ao limite de reserva de potência dos geradores, ou seja, como uma variação marginal no montante de reserva disponibilizado por um determinado gerador influencia o custo de corte de carga no sistema. Assim, caso o gerador se encontre no limite superior de reserva de potência, este não poderá contribuir para a redução da função-objetivo a menos que seu limite seja ampliado. Por outro lado, caso o gerador não se encontre em seu limite de reserva de potência,

o seu custo marginal será nulo, pois um aumento em seu limite não terá nenhum efeito sobre a função-objetivo.

A remuneração que cabe a cada gerador pelo provimento do serviço ancilar, durante a ocorrência de uma determinada contingência CT, é obtido multiplicando-se o seu valor unitário de Aumann-Shapley calculado para esta contingência pelo seu limite de reserva de potência e pelo tempo em que o serviço ancilar é provido. Assim:

$$REM_k^{CT} = \tilde{\pi}_k^{CT} \cdot PG_k^{res} \cdot T \quad (6.8)$$

onde:

- $REM_k^{CT}$  remuneração do gerador k na contingência CT
- $\tilde{\pi}_k^{CT}$  valor unitário de Aumann-Shapley do gerador k na contingência CT
- $PG_k^{res}$  limite de reserva de potência do gerador k
- T número de horas em que o serviço é provido

Contudo, este valor de remuneração para os geradores refere-se à ocorrência de uma única contingência no sistema. Como se sabe, o sistema está sujeito à ocorrência de diversas contingências, cada qual com um valor unitário de Aumann-Shapley e um valor de remuneração distinto.

A remuneração dos geradores deve ser calculada, portanto, por meio do valor unitário esperado de Aumann-Shapley obtido quando diversas contingências são simuladas no sistema, da seguinte forma:

$$REM_k = \tilde{E}[\tilde{\pi}_k^{CT}] \cdot PG_k^{res} \cdot T \quad (6.9)$$

onde:

- $\tilde{E}[\tilde{\pi}_k^{CT}]$  valor unitário esperado de Aumann-Shapley para o gerador k

Quando o sorteio das contingências é realizado pela simulação Monte Carlo não-sequencial, o valor unitário esperado de Aumann-Shapley é calculado de acordo com a fórmula a seguir:

$$\tilde{E}[\tilde{\pi}_k^{CT}] = \frac{\sum_{CT=1}^{NC} \tilde{\pi}_k^{CT}}{NC} \quad (6.10)$$

onde:

- NC número de contingências simuladas



## 6.4. Algoritmo de Solução

Esta seção apresenta um algoritmo simplificado da metodologia proposta, mostrando os passos que devem ser seguidos para sua execução.

**Passo 1** – Calcular o despacho de potência dos geradores durante a operação normal do sistema, por meio da solução da seguinte equação de balanço em um fluxo de potência:

$$PG_k = \sum_{j \in \Omega_k} P_{kj} + PL_k$$

**Passo 2** – Definir o novo limite máximo de potência ativa dos geradores de acordo com o valor de despacho definido no **Passo 1**.

$$PG_k^{\max} = PG_k$$

Este passo tem o objetivo remunerar exclusivamente a parcela de geração destinada à reserva de potência, excluindo do cálculo a capacidade ociosa dos geradores. Desta forma garante-se que o percentual de reserva de potência provido por todos os geradores seja idêntico, evitando que geradores com uma elevada capacidade ociosa sejam privilegiados durante o cálculo da remuneração do serviço ancilar. A Figura 6-3 ilustra de forma esquemática este processo.

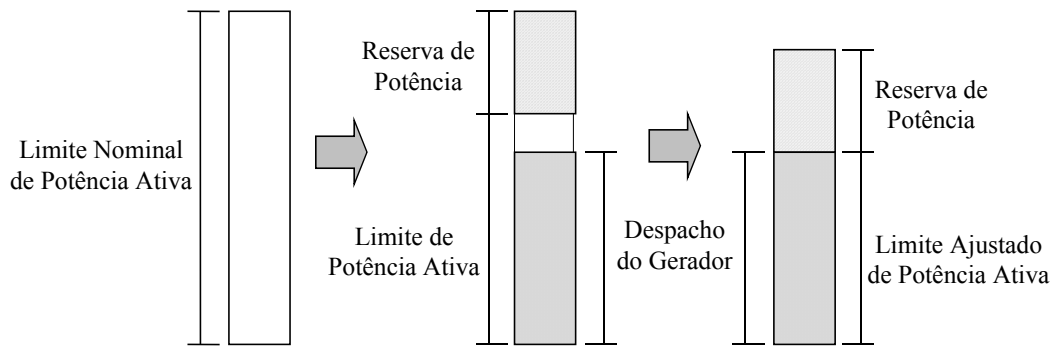


Figura 6-3 – Cálculo dos Limites de Geração e de Reserva de Potência

**Passo 3** – Inicializar a variável que irá acumular os custos marginais:

$$\pi_k^T = 0$$

onde:

$\pi_k^T$  variável que acumula os custos marginais associados ao limite de reserva de potência para o gerador k

**Passo 4** – Inicializar os parâmetros do problema

$$CONT = 0$$

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

$$t = 0$$

onde:

- CONT contador do número de discretizações  
n número de discretizações do intervalo [0,1]  
 $\Delta t$  incremento de cada discretização  
t fator multiplicativo que indica os novos limites de reserva de potência a cada discretização

**Passo 5** – Determinar os novos limites de reserva de potência dos geradores para a discretização CONT, multiplicando o fator t por seus limites nominais:

$$PG_k^{\text{res-m}} = t \cdot PG_k^{\text{res}}, k = 1, \dots, NG$$

onde:

- $PG_k^{\text{res}}$  limite de reserva de potência do gerador k  
 $PG_k^{\text{res-m}}$  limite modificado de reserva de potência do gerador k

É importante salientar que o limite de superior de potência dos geradores durante a ocorrência de contingências será dado por  $PG_k^{\text{max}} + PG_k^{\text{res-m}}$ , ou seja, este limite será calculado de acordo com o despacho do gerador, obtido para a situação de operação normal no Passo 2, somado à sua capacidade de reserva de potência.

Somente a parcela  $PG_k^{\text{res-m}}$  será discretizada pelo método de Aumann-Shapley, representando o acréscimo de limite de reserva de potência dos geradores a cada discretização. A parcela  $PG_k^{\text{max}}$ , que representa o limite de geração de potência ativa na situação de operação normal, permanecerá constante durante a resolução do método.

**Passo 6** – Inicializar o contador do número de contingências simuladas NC:

$$NC = 0$$

**Passo 7** – Sortear uma contingência CT por meio da simulação Monte Carlo não-sequencial. Determinar os custos marginais para esta contingência, por meio dos multiplicadores de Lagrange associados à restrição de limite de reserva de potência na função-objetivo de mínimo custo de corte de carga.

$$\pi_k^{\text{CT}} = \frac{\partial CC^{\text{CT}}}{\partial PG_k^{\text{res-m}}} = \lambda_k^{\text{res}}$$

**Passo 8** – Incrementar o número de contingências simuladas e estimar o valor esperado da função-teste  $\tilde{E}(F)$ :

$$NC = NC + 1$$

$$\tilde{E}(F) = \frac{1}{NC} \cdot \sum_{i=1}^{NC} F(x(i))$$

**Passo 9** – Calcular a incerteza do estimador  $\beta$ :

$$\beta = \frac{[\tilde{V}(F)]^{0.5}}{\tilde{E}(F)}$$

**Passo 10** – Verificar a convergência do processo:

Se a incerteza é aceitável ( $\beta < \text{tolerância}$ ) ou o número de contingências simuladas atingiu o limite ( $NC = NC^{\text{max}}$ )

Vá para o Passo 11

Senão

Retorne ao Passo 7

Fim se

**Passo 11** – Calcular o valor esperado dos custos marginais para cada gerador:

$$\tilde{E}[\pi_k^{CT}] = \frac{\sum_{CT=1}^{NC} \pi_k^{CT}}{NC}$$

**Passo 12** – Acumular o valor esperado dos custos marginais dos geradores em cada discretização e incrementar o contador do número de discretizações:

$$\pi_k^T = \pi_k^T + \tilde{E}[\pi_k^{CT}]$$

$$CONT = CONT + 1$$

**Passo 13** – Incrementar o parâmetro  $t$

Se  $t = 1$  então

VÁ PARA O PASSO 14

Senão

$$t = t + \Delta t$$

VOLTE AO PASSO 5

Fim

**Passo 14** – Determinar o valor unitário de Aumann-Shapley para o gerador  $k$ .

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

**Passo 15** – Determinar a remuneração dos geradores multiplicando o seu valor unitário de Aumann-Shapley pelo seu limite nominal de reserva de potência e pelo número de horas em que o serviço é prestado:

$$REM_k = \left| \tilde{\pi}_k \cdot PG_k^{res-nom} \right| \cdot T$$

## 6.5. Exemplo Numérico

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

O custo unitário de interrupção para este sistema exemplo será considerado igual a 1 \$/MW, um valor fictício assumido para todas as barras do sistema. Serão simuladas 1.000 contingências em cada discretização do método de Aumann-Shapley, o que confere uma incerteza inferior a 5% para o estimador  $\beta$ .

O valor de remuneração dos geradores é proporcional ao período em que o serviço ancilar for provido. Sendo assim, será considerado que os geradores provêm o serviço ancilar durante um período de 1 ano, ou  $T = 8.760$  h. Durante este período a configuração da rede elétrica permanecerá fixa, bem como a demanda das barras de carga e a capacidade dos geradores.

A geração de potência reativa dos geradores, bem como os tap's dos transformadores, permanecerão fixos durante a solução do problema de otimização. Com isto, o serviço ancilar de reserva de potência provido pelos geradores pode ser analisado sem sofrer influência dos demais controles do sistema.

O montante de reserva de potência dos geradores pode ser definido em função de sua capacidade nominal de geração de potência ativa. Assim, será considerado que o montante de reserva de potência dos geradores para o sistema-exemplo será igual a 10% de seus limites de geração de potência ativa. Os limites de potência ativa dos geradores e seus respectivos montantes de reserva de potência são apresentados na Tabela 6.1.

Gerador	Limite Máximo Nominal de Potência Ativa (MW)	Reserva de Potência (MW)
1	1.010,0	101,0
4	700,0	70,0
5	200,0	20,0
<b>TOTAL</b>	1.910,0	191,0

Tabela 6.1 – Limites de Potência Ativa e Reservas de Potência dos Geradores

A fim de se evitar que a capacidade ociosa dos geradores seja utilizada como reserva de potência, o limite máximo de potência ativa dos geradores será definido de acordo com seu valor de despacho. Este mecanismo de ajuste para os geradores segue os passos 1 e 2 do algoritmo descrito na seção 6.4.

Os limites máximos ajustados de potência ativa para os geradores, com e sem o acréscimo da reserva de potência, são descritos na Tabela 6.2.

Gerador	Limite Ajustado de Potência Ativa (MW) $PG_k^{max}$	Limite Ajustado de Potência Ativa + Reserva de Potência (MW) $PG_k^{max} + PG_k^{res}$
1	612,0	713,0
4	406,9	476,9
5	175,3	195,3
<b>TOTAL</b>	1.194,2	1.385,2

Tabela 6.2 – Limites Ajustados de Potência Ativa

Assim, de posse dos limites máximos ajustados de potência ativa, pode-se calcular o custo de interrupção para o sistema-exemplo de 5 barras. Este custo de interrupção é definido como o valor esperado do custo de corte de carga do sistema, calculado em um estudo de confiabilidade composta, para as situações onde os geradores provêm ou não o serviço ancilar de reserva de potência.

A Tabela 6.3 apresenta o custo de interrupção do sistema-exemplo para as duas situações consideradas.

Serviço Ancilar de Reserva de Potência	Custo de Interrupção (\$)
Geradores não Provêm o Serviço Ancilar ( $PG_k^{max}$ )	680.839,98
Geradores Provêm o Serviço Ancilar ( $PG_k^{max} + PG_k^{res}$ )	614.713,38
Benefício	66.126,60

Tabela 6.3 – Custo Interrupção do Sistema-Exemplo

O valor de benefício apresentado nesta tabela é calculado como a diferença observada no custo de interrupção do sistema quando os geradores provêm ou não o serviço ancilar de reserva de potência. Assim, de acordo com a metodologia proposta, este custo evitado deverá ser revertido aos geradores na forma de remuneração, de acordo com a sua respectiva parcela de benefício proporcionada ao sistema.

Para se obter o valor de remuneração que cabe a cada gerador, será empregado o método de Aumann-Shapley. Para este exemplo serão calculadas

10 discretizações para a solução do método, conforme apresentado nos parâmetros a seguir:

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

Os limites de reserva de potência dos geradores, modificados a cada discretização do método de Aumann-Shapley, são descritos na Tabela 6.4.

Número da Discretização	Fator t	Gerador 1	Gerador 4	Gerador 5
1	0,1	10,1	7,0	2,0
2	0,2	20,2	14,0	4,0
3	0,3	30,3	21,0	6,0
4	0,4	40,4	28,0	8,0
5	0,5	50,5	35,0	10,0
6	0,6	60,6	42,0	12,0
7	0,7	70,7	49,0	14,0
8	0,8	80,8	56,0	16,0
9	0,9	90,9	63,0	18,0
10	1,0	101,0	70,0	20,0

Tabela 6.4 – Limites de Reserva de Potência dos Geradores (MW)

Para cada discretização do método de Aumann-Shapley é realizado um estudo de confiabilidade composta, onde a cada contingência simulada é resolvido um FPO com função-objetivo de mínimo custo de corte de carga. Por meio da resolução deste FPO são obtidos os custos marginais associados ao limite de reserva de potência dos geradores. O valor esperado destes custos marginais, obtidos para cada gerador em cada discretização, é descrito na Tabela 6.5.

Número da Discretização	Fator t	Gerador 1	Gerador 4	Gerador 5
1	0,1	-0,077	-0,018	-0,105
2	0,2	-0,077	-0,018	-0,105
3	0,3	-0,077	-0,018	-0,105
4	0,4	-0,076	-0,018	-0,105
5	0,5	-0,075	-0,018	-0,103
6	0,6	-0,001	-0,018	-0,044
7	0,7	0,000	-0,018	-0,042
8	0,8	0,000	-0,018	-0,040
9	0,9	0,000	-0,018	-0,038
10	1,0	0,000	-0,018	-0,032

Tabela 6.5 – Valor Esperado dos Custos Marginais Associados aos Limites de Reserva de Potência

Os custos marginais sinalizam a contribuição individual dos geradores para a redução do custo de corte de carga no sistema, em cada discretização do método de Aumann-Shapley. Os geradores que possuem custos marginais nulos não influenciam o custo de corte de carga.

O valor unitário esperado de Aumann-Shapley é obtido como a média dos diversos valores esperados de custos marginais obtidos ao longo das discretizações. Os valores unitários esperados de Aumann-Shapley para os geradores são descritos na Tabela 6.6.

Gerador 1	Gerador 4	Gerador 5
$\tilde{\pi}_1$	$\tilde{\pi}_4$	$\tilde{\pi}_5$
-0,038	-0,018	-0,072

Tabela 6.6 – Valor Unitário Esperado de Aumann-Shapley (\$/MW)

Finalmente, a remuneração dos geradores que provêm o serviço ancilar de reserva de potência é obtida multiplicando-se o valor unitário esperado de Aumann-Shapley pelo limite nominal de reserva de potência e pelo tempo de fornecimento do serviço ancilar. Logo:

**Gerador 1:**

$$|\tilde{\pi}_1 \cdot PG_1^{\text{res}}| \cdot T = |101,0 \cdot (-0,038)| \cdot 8.760 = 33.620,88 \text{ \$/ano}$$

**Gerador 4:**

$$|\tilde{\pi}_4 \cdot PG_4^{\text{res}}| = |70,0 \cdot (-0,018)| \cdot 8.760 = 11.037,60 \text{ \$/ano}$$

**Gerador 5:**

$$|\tilde{\pi}_5 \cdot PG_5^{\text{res}}| = |20,0 \cdot (-0,072)| \cdot 8.760 = 12.614,40 \text{ \$/ano}$$

A remuneração total dos geradores (57.272,88 \$/ano) é inferior ao benefício provido pelo serviço ancilar ao sistema (66.126,60 \$/ano), o que ocasiona um erro de 13,39%. Para que o erro ocorrido no cálculo da remuneração dos geradores seja reduzido, torna-se necessário elevar o número de discretizações do método de Aumann-Shapley.

A Tabela 6.7 demonstra como o aumento do número de discretizações do método de Aumann-Shapley reduz o erro cometido na repartição do benefício entre os geradores.

Gerador	Remuneração dos Geradores (\$/ano) <sup>2</sup>		
	n = 10	n = 100	n = 1.000
1	33.620,88	37.773,73	38.150,94
4	11.037,60	11.019,44	11.027,29
5	12.614,40	13.272,64	13.341,97
<b>Remuneração Total</b>	57.272,88	62.062,81	62.520,20
<b>Benefício</b>	66.126,60	66.126,60	66.126,60
<b>Erro (%)</b>	13,39	6,15	5,45

Tabela 6.7 – 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 no incremento de reserva de potência ( $\Delta t=1/n$ ).

A Figura 6-4 ilustra, de forma gráfica, os valores unitários de Aumann-Shapley e as remunerações dos geradores calculados para 1.000 discretizações.

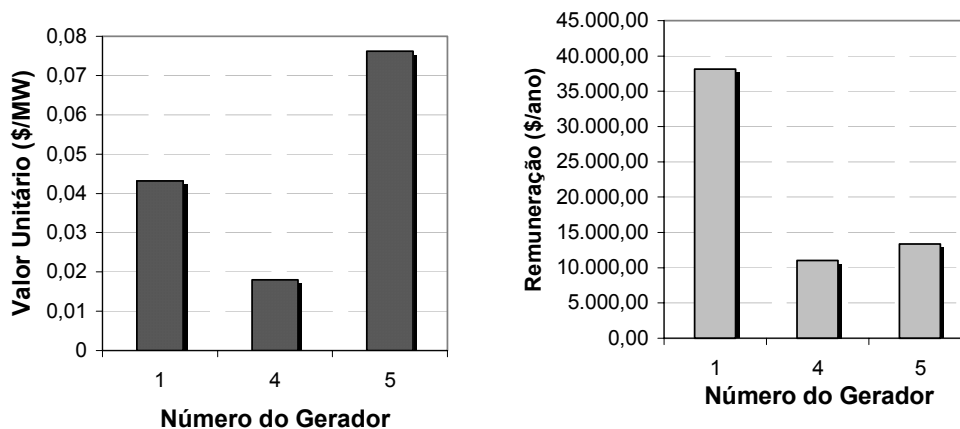


Figura 6-4 – Remuneração dos Geradores que Provêm

o Serviço Ancilar de Reserva de Potência

Para o serviço ancilar de reserva de potência, os valores unitários de Aumann-Shapley são influenciados basicamente por duas características dos geradores:

- o ponto de conexão do gerador na rede elétrica em relação às barras de carga, de forma semelhante ao que ocorre no serviço ancilar de suporte de potência reativa;
- a taxa de indisponibilidade forçada (TIF) dos geradores e dos circuitos próximos, visto que os valores unitários de Aumann-Shapley são calculados em um estudo de confiabilidade composta.

<sup>2</sup> Os resultados associados a 100 e 1.000 discretizações não foram detalhados porque seguem o mesmo raciocínio dos resultados obtidos com 10 discretizações.



Estas características podem ser verificadas por meio do gerador 5, que possui o maior valor unitário esperado de Aumann-Shapley dentre os demais. Este gerador encontra-se conectado diretamente a uma carga do sistema, com demanda por potência ativa igual a 100 MW. Isto significa que, em qualquer situação de contingência que provoque um corte de carga nesta barra, este corte de carga será prontamente reduzido pelo gerador 5, até o seu limite de reserva de potência (20MW). Isto assegura que os custos marginais deste gerador sejam próximos ao custo unitário de interrupção do sistema na maioria das contingências, o que lhe confere um elevado valor unitário esperado de Aumann-Shapley.

O gerador 1, embora se localize em uma área privilegiada do sistema (próximo às barras de carga e distante dos demais geradores), não possui um valor unitário esperado de Aumann-Shapley muito expressivo. Isto pode ser explicado pelo fato de sua TIF (0,02) possuir o dobro do valor dos demais geradores (0,01), conforme descrito no Apêndice A.

Em outras palavras, o gerador 1 possui uma probabilidade duas vezes maior de se encontrar indisponível devido a falhas que os demais geradores. Como consequência, a influência que a reserva de potência disponibilizada por este gerador possui sobre o custo de interrupção do sistema também será reduzida.

O gerador 4, por se localizar próximo ao gerador 5, também possui a sua influência sobre o custo de interrupção do sistema reduzida de forma significativa. Isto se traduz no menor valor unitário esperado de Aumann-Shapley entre os demais geradores.

A remuneração dos geradores, calculada por meio da multiplicação de seus valores unitários esperados de Aumann-Shapley por seus montantes de reserva de potência, é ilustrada na Figura 6-4. Os geradores que se encontram em áreas com deficiência de reserva de potência possuem valores de remuneração mais elevados, proporcionalmente a suas capacidades, sinalizando de forma adequada a necessidade de expansão na oferta do serviço. Isto comprova a coerência da metodologia proposta quanto empregue ao sistema-exemplo de 5 barras.

## 6.6. Resultados Numéricos

Nesta seção são analisados os resultados numéricos obtidos com a aplicação da metodologia proposta a dois sistemas de potência distintos. O primeiro sistema a ser testado é o IEEE-RTS [50], composto por 24 barras, 11 geradores e 2 áreas.

Em seguida, com a finalidade de analisar a aplicação da metodologia em um sistema potência de grande porte, é utilizado o sistema Sul-Sudeste Brasileiro no ano de 2001. São analisados 42 geradores em 6 áreas deste sistema de potência, que correspondem aos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo.

Contudo, a aplicação da metodologia proposta de remuneração para sistemas de grande porte, como o S-SE, torna-se inviável, devido ao elevado esforço computacional demandado. Isto ocorre porque para cada discretização do método de Aumann-Shapley é necessário calcular um estudo de confiabilidade, onde são amostradas inúmeras contingências pelo método de simulação de Monte Carlo não-sequencial, conforme o algoritmo descrito na seção 6.4.

Para tornar viável a aplicação da metodologia proposta em sistemas de grande porte, uma alternativa é sortear o parâmetro  $t$  de discretização do método de Aumann-Shapley segundo uma distribuição uniforme, ao invés de discretizá-lo no intervalo  $[0,1]$ . Este artifício foi utilizado com sucesso em [13], o que demonstra a sua viabilidade quando aplicado ao método de repartição de custos de Aumann-Shapley.

O algoritmo modificado pela inclusão do sorteio do parâmetro de discretização  $t$  do método de Aumann-Shapley é descrito nos passos a seguir:

**Passo 1** – Calcular o despacho de potência dos geradores durante a operação normal do sistema por meio da solução de um fluxo de potência, de acordo com a seguinte equação de fluxo:

$$PG_k = \sum_{j \in \Omega_k} P_{kj} + PL_k$$

**Passo 2** – Definir o novo limite máximo de potência ativa dos geradores de acordo com o seu valor de despacho calculado no **Passo 1**.

$$PG_k^{\max} = PG_k$$

**Passo 3** – Inicializar a variável que irá acumular os custos marginais:

$$\pi_k^T = 0$$

**Passo 4** – Inicializar o contador do número de contingências simuladas NC:

$$NC = 0$$

**Passo 5** – Sortear o fator t, a partir de uma distribuição uniforme [0,1], e determinar os novos limites de reserva de potência dos geradores:

$$PG_k^{\text{res-m}} = t \cdot PG_k^{\text{res}}, k = 1, \dots, NG$$

**Passo 6** – Sortear uma contingência CT por meio da simulação Monte Carlo não-sequencial. Determinar os custos marginais para esta contingência, por meio da solução de um FPO com função-objetivo de mínimo custo de corte de carga.

$$\pi_k^{\text{CT}} = \frac{\partial CC^{\text{CT}}}{\partial PG_k^{\text{res}}} = \lambda_k^{\text{max}}$$

**Passo 7** – Acumular os custos marginais dos geradores em cada contingência e incrementar o contador do número contingências simuladas:

$$\pi_k^T = \pi_k^T + \pi_k^{\text{CT}}$$

$$NC = NC + 1$$

**Passo 8** – Verificar a convergência do processo

Se a incerteza é aceitável ( $\beta < \text{tolerância}$ ) ou o número de contingências simuladas atingiu o limite ( $NC = NC^{\text{max}}$ )

VÁ PARA O PASSO 9

Senão

VOLTE AO PASSO 5

Fim

**Passo 9** – Determinar o valor unitário esperado de Aumann-Shapley para o gerador k.

$$\tilde{\pi}_k = \frac{\pi_k^T}{NC}$$

**Passo 10** – Determinar a remuneração dos geradores, multiplicando o seu valor unitário esperado de Aumann-Shapley por seu limite nominal de reserva de potência e pelo número de horas em que o serviço é prestado:

$$REM_k = \left| \tilde{\pi}_k \cdot PG_k^{\text{res}} \right| \cdot T$$

Os resultados numéricos apresentados a seguir foram calculados com o algoritmo modificado. Para o cálculo dos custos marginais dos geradores durante o estudo de confiabilidade foi utilizado o programa NH2 [48], desenvolvido pelo CEPEL. Embora o NH2 permita que diversos controles do sistema de potência sejam alterados durante a solução do problema de otimização, neste estudo permitiu-se apenas a otimização dos controles de geração de potência ativa. Este critério foi adotado com o objetivo de se analisar o serviço ancilar de reserva de potência quando provido exclusivamente por geradores.

Assim, de acordo com o algoritmo modificado para a metodologia proposta, foram simuladas 30.000 contingências para o sistema de potência RTS-IEEE. O valor unitário esperado de Aumann-Shapley para os geradores que provêm o serviço ancilar é apresentado na Figura 6-5 e no Apêndice D.

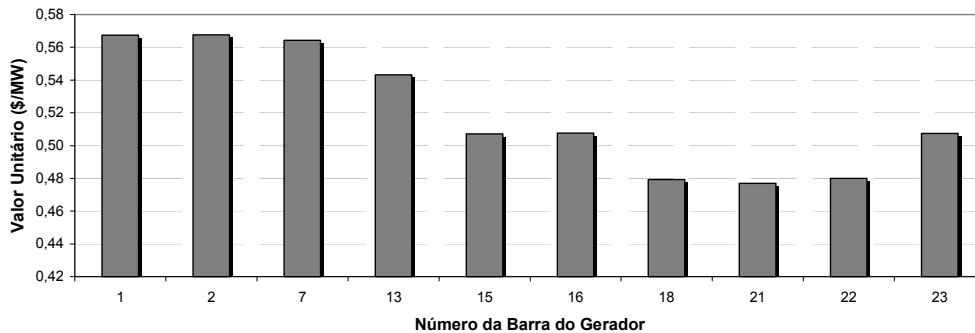


Figura 6-5 – Valor Unitário Esperado de Aumann-Shapley – Sistema IEEE-RTS

Nota-se neste gráfico que os valores unitários esperados mais elevados de Aumann-Shapley referem-se aos geradores conectados às barras 1, 2 e 7. Isto é justificado pelo fato de que estes geradores se localizam em uma área importadora de energia elétrica, ao fato de que os demais se localizam em uma área exportadora.

Destacam-se ainda neste gráfico os geradores 13, 15 e 16. Embora estes geradores não se encontrem em uma área importadora de energia elétrica, seus valores unitários esperados de Aumann-Shapley encontram-se em um valor intermediário em relação aos demais. Isto ocorre porque estes geradores possuem cargas conectadas diretamente às suas barras de geração.

Portanto, conclui-se que os geradores que conectados próximos às barras de carga possuem uma maior influência sobre a redução no custo de corte de carga para o sistema de potência, verificado em situações de contingência. Logo, a metodologia proposta é capaz de sinalizar de forma correta os pontos

onde exista escassez de reserva de potência no sistema. Nestes pontos o valor unitário esperado de Aumann-Shapley dos geradores será mais elevado, criando incentivos para que novos agentes realizem o provimento do serviço ancilar de reserva de potência.

A remuneração dos geradores, obtido pela multiplicação de seus valores unitários esperados de Aumann-Shapley por seus limites de reserva de potência, é descrito na Figura 6-6.

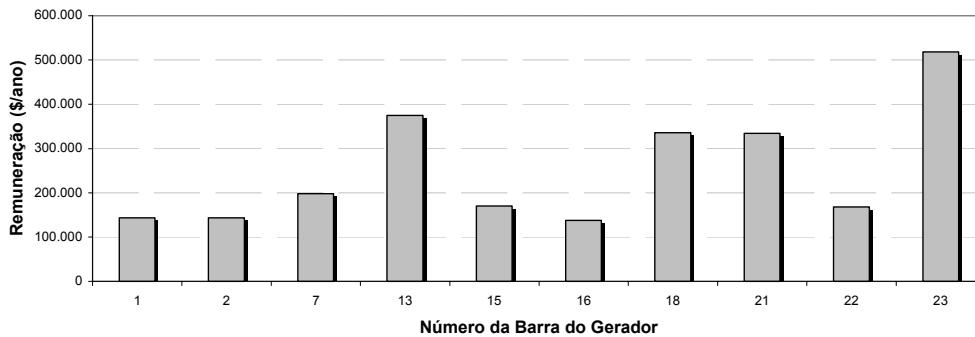


Figura 6-6 – Remuneração dos Geradores – Sistema IEEE-RTS

O valor total de remuneração dos geradores (2.522.862,35 \$/ano) é próximo do o benefício proporcionado pelo serviço ancilar ao sistema (2.458.136,55 \$/ano), resultando em um erro de 2,63%.

Com o objetivo de comprovar a eficácia da metodologia proposta em sistemas de grande porte, foram simuladas 20.000 contingências para as 6 áreas analisadas do sistema Sul-Sudeste Brasileiro. Os resultados obtidos, calculados por meio do algoritmo modificado descrito nesta seção, são apresentados nas Figuras 6-7 e 6-8.

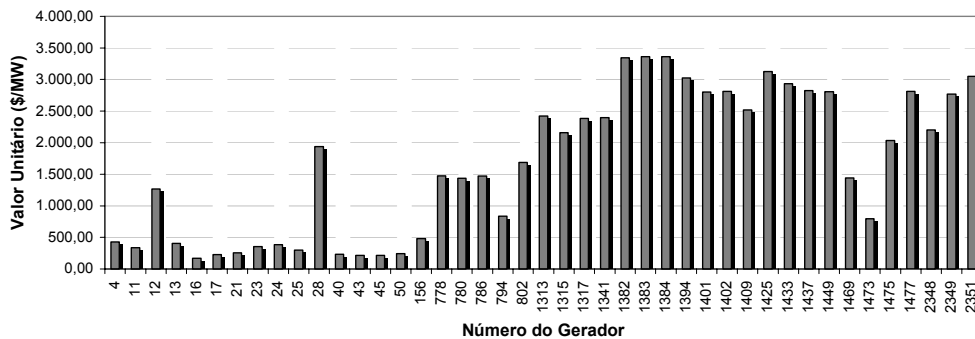


Figura 6-7 – Valor Unitário Esperado de Aumann-Shapley – Sistema S-SE

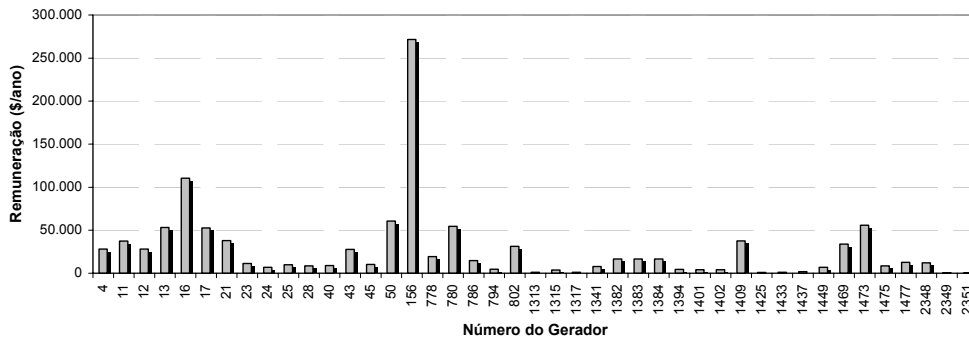


Figura 6-8 – Remuneração dos Geradores – Sistema S-SE

A remuneração total dos geradores (1.138.962,75 \$/ano) permanece próxima do benefício proporcionado pelo serviço ancilar ao sistema (1.176.807,66 \$/ano), resultando em um erro de 3,22%. Estes resultados demonstram que é viável a aplicação da metodologia proposta mesmo em sistemas de grande porte.

Para os dois sistemas de potência analisados foi considerado que o serviço ancilar seria 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. Nestes casos, o tempo de prestação do serviço ancilar deveria ser alterado de  $T = 8.760h$  para  $T = 1h$ . Além disso, a configuração da rede elétrica deveria ser atualizada a cada hora e a remuneração dos geradores recalculada. Assim, sem que se altere a metodologia proposta, torna-se possível adequá-la a diferentes horizontes de remuneração.

## 6.7. Conclusões

Este capítulo apresentou uma proposta de metodologia para remunerar os geradores que provêm o serviço ancilar de reserva de potência. O valor desta remuneração foi definido como função do benefício proporcionado pelo serviço ancilar ao sistema de potência.

Foi demonstrado que este benefício pode ser obtido por meio da diferença observada no custo de interrupção do sistema, obtido em um estudo de confiabilidade composta, para as situações onde os geradores provêm ou não o serviço ancilar. Em cada uma dessas duas situações é empregue um algoritmo

de fluxo de potência ótimo que utilize como função-objetivo o mínimo o custo de corte de carga.

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 pode ser aplicada a outros horizontes de tempo, como 1 hora, por exemplo. Nestes casos, o custo de interrupção do sistema seria calculado de acordo com o período de tempo considerado, atualizando-se constantemente a configuração do sistema. Assim, poderiam ser obtidos diversos valores horários de remuneração para os geradores, sem que seja necessário realizar modificações substanciais na metodologia proposta.

Com o objetivo de se analisar a coerência da metodologia proposta, foi calculada a remuneração dos geradores que provêm o serviço ancilar em dois sistemas distintos: o sistema IEEE-RTS e o sistema do Sul-Sudeste Brasileiro. Para enfatizar a influência da reserva de potência disponibilizada pelos geradores sobre o benefício de confiabilidade proporcionado, foi permitida apenas a otimização dos controles de geração de potência ativa.

Os resultados obtidos nos dois sistemas de potência analisados se mostraram coerentes com o serviço ancilar provido pelos geradores. Os valores unitários esperados de Aumann-Shapley foram capazes de sinalizar as áreas com carência de reserva de potência e sinalizando a necessidade de instalação de novos geradores nestas áreas.

Assim, 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 reserva de potência.