

6 Remuneração do Benefício Agregado pelos Agentes Participantes da Regulação da Frequência

Como já se sabe, a reserva operativa específica para a regulação de frequência é uma reserva girante e poderia supor-se que o seu valor econômico determinado através de (5.1) ou (5.8), fosse o bastante para a completa remuneração do serviço. Entretanto, a regulação envolve mais do que simplesmente uma reserva, constituindo ainda um serviço qualificado, com muito maior solicitação sobre turbinas e geradores, além da necessidade de equipamentos e instalações específicas, além de pessoal especializado. Isto exige uma remuneração diferenciada específica para o serviço prestado, premiando ainda a 'maior qualidade' deste serviço.

6.1 Remuneração do Benefício Agregado pela Reserva Operativa para Regulação de Frequência

O procedimento desenvolvido na Seção 5.4, finalizado com as equações (5.17), (5.18) e (5.19), deve ser aplicado também para as unidades geradoras participantes da regulação de frequência, obtendo-se as remunerações unitárias referentes a estas reservas:

$$Be_RRg_{ijdm}^{(P)} = C_{int} \cdot BI_RRg_{icdm}^{(P)}, \quad j \in P \text{ e } j \in CH_c \quad (6.1)$$

$$Be_RRg_{ijdm}^{(M)} = C_{int} \cdot BI_RRg_{icdm}^{(M)}, \quad j \in M \text{ e } j \in CH_c \quad (6.2)$$

$$Be_RRg_{ijdm}^{(L)} = C_{int} \cdot BI_RRg_{icdm}^{(L)}, \quad j \in L \text{ e } j \in CH_c \quad (6.3)$$

para $c = 1, 2, \dots, n_c$

6.2 Remuneração do Benefício Agregado pelo Serviço de Regulação de Frequência

Para se determinar a remuneração deste serviço, propõe-se uma técnica semelhante àquela proposta para as reservas de confiabilidade, isto é, a utilização da eficiência do serviço fornecido, considerando-se os resultados obtidos para o sistema como um todo. É possível entretanto, considerar-se o desempenho individual de cada área de controle, e até de cada unidade geradora participante. A primeira dificuldade para isto encontra-se no fato de não se conhecer um valor de custo, análogo ao custo unitário da interrupção, mas relacionado à regulação de frequência. Sabe-se que a operação de geradores, principalmente os térmicos e nucleares, e de cargas, de forma destacada aquelas que operam com relógios síncronos, são bastante afetados pela regulação de frequência. Qual seria o impacto financeiro para os diferentes consumidores de não se ter a frequência em seu valor nominal durante um certo tempo?

Para se avaliar a eficiência do desempenho da regulação de frequência podem ser utilizados índices obtidos a partir da análise, por exemplo, do comportamento da própria frequência, do erro de tempo ou do erro de controle de área (ECA). Utilizando-se tais índices, existe a possibilidade de se estimar o benefício incremental proporcionado por este serviço, também com base na melhoria neles obtida ao se aumentar a quantidade de reserva disponível para a regulação de frequência. Em um sistema interligado, se oirmos como um todo, os desvios de frequência podem ser considerados como bons indicadores do desempenho do sistema de regulação, que pode ter sido prejudicado pela existência de erros de controle de área fora dos padrões, em uma ou mais áreas de controle. Entretanto, é importante uma análise do desempenho da regulação de frequência por área, para que se detecte quais não estão realizando boa regulação, através dos erros de controle de área, que neste caso representam indicadores melhores. [Vieira F°, 1984].

Mostra-se na seção 6.2.1 uma técnica para a obtenção de um fator de avaliação da eficiência ou qualidade da regulação de frequência, através do comportamento dos desvios de frequência ao longo do tempo, e que será utilizado no desenvolvimento da metodologia proposta. Será mostrado ainda que este fator possui relação com o erro de tempo acumulado em períodos horários.

A remuneração básica de uma determinada unidade geradora, pelo benefício proporcionado pela sua participação no serviço de regulação de frequência do sistema, será então definida como:

$$BE_SR_{ij} = VRF \cdot (FER_j^{(2)} - FER_j^{(1)})_i \quad (6.4)$$

ou:

$$BE_SR_{ij} = VRF \cdot (\Delta FER_j)_i \quad (6.5)$$

onde:

$FER_j^{(2)}$ - fator de eficiência horária da regulação de frequência, após a disponibilização de reservas operativas para regulação de frequência pela unidade geradora i , na hora j ;

$FER_j^{(1)}$ - fator de eficiência horária da regulação de frequência, antes da disponibilização de reservas operativas para regulação de frequência pela unidade geradora i , na hora j ;

VRF - custo associado à deficiência de regulação de frequência no sistema, ou seja, à condição da frequência estar fora dos valores nominais durante um certo período de tempo;

$(\Delta FER_j)_i$ - variação do fator de eficiência horária da regulação de frequência, devido à disponibilização de reservas operativas para regulação pela unidade geradora i , na hora j .

Não se tem ainda conhecimento de como o custo VRF pode ser calculado, ou se existe algum esforço neste sentido. Neste trabalho não se pretende analisá-lo ou desenvolver estudos com o objetivo de determinar tal valor. Será utilizado o próprio custo unitário de interrupção, o que se justifica pelo fato de que as perdas de geração, quedas de frequência e cortes de carga se interrelacionam fortemente, podendo as interrupções ocorrerem como resultado final de grandes quedas de frequência não revertidas.

Quando a frequência cai, a capacidade de regulação, ou seja, a reserva prevista com este fim é diminuída, podendo ser até completamente exaurida. Pode haver assim necessidade de se lançar mão da reserva girante destinada à confiabilidade para se complementar a regulação de frequência, mesmo em condições normais de operação. Se

ocorre então uma perturbação no sistema que resulte numa queda adicional de frequência, existe o risco de que a reserva girante não seja suficiente para estabilizar a frequência, após a perturbação. O desequilíbrio de potência resultante poderia causar cortes de carga controlados por frequência, ou na pior hipótese, um *black-out* no sistema.

A remuneração básica do benefício do serviço de regulação será, então:

$$BE_SR_{ij} = C_{int} \cdot (\Delta FER_j)_i \quad (6.6)$$

A qualidade ou eficiência da regulação de frequência, avaliada em função dos desvios de frequência, depende de uma série de características e parâmetros, principalmente:

- características próprias do sistema ou da área de controle, tal como a taxa de variação da carga com a frequência, ou regulação própria, caracterizada pelo coeficiente de amortecimento D , a constante de tempo de resposta do sistema ou da área TS , e a sua característica natural β , função de D e TS ;
- parâmetros dos controladores (reguladores de velocidade), como a constante de tempo TR , e o estatismo S ;
- características próprias e parâmetros das turbinas, tais como as constantes de tempo envolvidas, como a constante de tempo da água TA , e a constante de tempo de resposta do servo-motor do mecanismo de admissão, no caso de turbinas hidráulicas TM e as constantes de tempo das turbinas térmicas TT , que traduzem a taxa de tomada de carga de cada tipo de conjunto turbina-gerador;
- ganho dos variadores de velocidade τ , e ajuste de *bias* B ;
- eficiência da metodologia de previsão dos valores horários de demanda média e de ponta;
- capacidade de geração disponível para prover a reserva de regulação.

Para um certo conjunto de unidades geradoras participando do serviço de regulação de frequência, o valor do desvio de frequência remanescente Δf_t , em um certo instante de tempo t , após determinado período de tempo Δt de atuação da regulação, depende do acréscimo na potência gerada neste período que, por sua vez, é uma função dos fatores relacionados, e do desvio de frequência no instante anterior $\Delta f_{t-\Delta t}$. O período de tempo Δt depende basicamente das constantes de tempo envolvidas e ele, juntamente com Δf_t , constituem os indicadores a serem utilizados para a verificação da eficiência da regulação de frequência. Assim pode-se escrever:

$$\Delta f_t = (f_t - f_n) = f(PG_t - PG_{t-\Delta t}) = f(D, TS, \beta, TR, S, TA, TM, TT, \tau, B, \Delta f_{t-\Delta t}) \quad (6.7)$$

sendo f_n a frequência nominal do sistema.

Em regime permanente, supondo-se que o coeficiente de amortecimento D é nulo, pode-se considerar que a variação da frequência em um certo intervalo de tempo é:

$$(f_t - f_{t-\Delta t}) = -S \cdot (PG_t - PG_{t-\Delta t}) \quad (6.8)$$

Supondo-se que a geração é aumentada, este aumento equivale a uma redução da reserva de regulação. A equação (6.8) pode ser então rescrita:

$$[(f_t - f_n) - (f_{t-\Delta t} - f_n)] = -S \cdot (\Delta RRg_t) \quad (6.9)$$

onde ΔRRg_t é a variação da reserva para regulação de frequência provocada por uma variação na frequência.

De (6.9):

$$\Delta f_t - \Delta f_{t-\Delta t} = -S \cdot (RRg_t - RRg_{t-\Delta t}) \quad (6.10)$$

Assim, para o desvio de frequência no instante t , vem:

$$\Delta f_t = -S \cdot RRg_t \quad (6.11)$$

Em valores por unidade, tem-se:

$$\Delta f_t[\text{pu}] = -S[\text{pu}] \cdot rr_t \quad (6.12)$$

sendo rr_t o valor percentual da reserva para regulação no instante t . As equações (6.11) e (6.12) representam a variação de frequência que se consegue anular, dado um certo valor da reserva de regulação.

Como a avaliação da eficiência do serviço de regulação será feita por meio dos desvios de frequência, para o conjunto de unidades geradoras participantes, o valor do fator de eficiência horária da regulação de frequência FER, segundo (6.11), pode ser colocado como, utilizando-se valores por unidade :

$$FER_j = f(\Delta f_t) = f(S, rr_j) \quad (6.13)$$

Considerando que o estatismo é constante e supondo-se que a demanda do sistema não varia, caso haja um acréscimo Δrr_j no valor em pu da reserva para regulação, tem-se:

$$FER_j^{(2)} = f(FER_j^{(1)}, rr_j^{(1)}, \Delta rr_j) \quad (6.14)$$

Simulando-se sucessivos acréscimos de valor constante, no valor em pu da reserva de regulação, vem a partir de (6.14):

$$FER_j^{(k)} = f(FER_j^{(k-1)}, rr_j^{(k-1)}, \Delta rr_j), \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (6.15)$$

Com a recursividade observada em (6.15), pode-se escrever:

$$FER_j^{(k)} = f(rr_j^{(k)}), \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (6.16)$$

Neste caso também pode-se considerar que a diferença $(FER_j^{(2)} - FER_j^{(1)})_i$ vista em (6.4), que define a remuneração unitária da unidade i pelo benefício proporcionado pelo seu serviço de regulação de frequência, representa uma aproximação da derivada da FER

para um incremento unitário no valor pu da reserva operativa para regulação. Assim, o valor da derivada que representa a taxa de variação instantânea da FER em relação à reserva, será utilizado para a definição desta remuneração. As vantagens da sua utilização são que ele pode ser obtido diretamente das curvas FER x rr e independe dos montantes de reserva, sendo um valor adimensional que representa a inclinação destas curvas para qualquer valor de FER. Esta será denominada 'benefício incremental do serviço de regulação de frequência', dada por:

$$BI_SR_{ij} = \frac{dFER_j}{drr_j} \quad (6.17)$$

O benefício incremental deve ser avaliado para o valor em pu da reserva de regulação observado na hora j, uma vez conhecido o fator FER desta hora. Daí, a remuneração dada por (6.6), será:

$$BE_SR_{ij} = C_{int} \cdot BI_SR_{ij} = C_{int} \cdot \left. \frac{dFER_j}{drr_j} \right|_{rr_j^{(OBS)}} \quad (6.18)$$

6.2.1 Cálculo de um Fator para Avaliação da Eficiência da Regulação de Frequência

Analisando as variações da frequência em relação ao seu valor nominal em um certo período de tempo, vê-se que eles possuem componentes rápidos e lentos. Os componentes rápidos são determinados pela atuação da regulação primária e os lentos pela atuação da regulação secundária da frequência, ou seja, pelo controle automático da geração.

O serviço de regulação de frequência, considerando-se todos os elementos que o compõem, relacionados na introdução da Seção 6.1, pode ser avaliado como eficiente se:

- os componentes lentos dos desvios de frequência são nulos ou possuem valores pequenos, alternando-se constantemente o seu sinal, de forma que o seu valor médio em períodos de tempo mais longos, como por exemplo uma hora, esteja próximo de zero;

- a ação da regulação não permitiu que a frequência permanecesse em valores anormais durante períodos grandes de tempo, nem atingisse valores excessivamente distantes do valor nominal.

Assim, a eficiência é alta se as componentes lentas da frequência encontrarem-se sempre próximos à frequência nominal do sistema.

Nesta hipótese, a parcela de reserva de regulação a ser utilizada para a correção dos desvios seria pequena, aumentando pouco o risco do sistema tornar-se mais vulnerável à perturbações, se esta correção fosse feita. No período de tempo analisado, de uma hora, por exemplo, o ideal é que o montante de reserva de regulação disponível, permaneça próximo do seu valor percentual mínimo $rr_j^{\min}$, a maior parte do tempo possível:

Este valor é geralmente definido pelo operador do sistema, em relação à sua demanda prevista a cada hora, representando o valor da reserva para regulação abaixo do qual fica comprometido o desempenho do sistema elétrico em responder às variações instantâneas normais da demanda. Todos os esforços e recursos disponíveis devem ser utilizados para manter a reserva para regulação acima deste mínimo, já que a sua definição é motivada pela preocupação com a qualidade da frequência do sistema.

Se, em caso contrário, os componentes lentos ou permanentes dos desvios de frequência forem significativos e permanecerem afastados de zero durante períodos consideráveis de tempo, a eficiência da regulação de frequência diminuiu. Isto significa que uma parcela maior da reserva deveria ser utilizada para a correção dos desvios durante períodos longos, ficando o montante de reserva restante mais distante do valor mínimo previsto, o que faz com que o risco de curto prazo do sistema seja aumentado, pela sua maior exposição.

Assim, pode-se considerar que a medida da distância entre a reserva de regulação disponível, após a anulação de um certo desvio de frequência, e a reserva mínima prevista, utilizando-se os desvios de frequência observados, representa uma avaliação do desempenho da regulação de frequência efetuada no sistema, possuindo robustez, simplicidade, e facilidade de implementação.

A reserva remanescente em um instante de tempo possui uma faixa de variação cujos valores extremos são definidos pelos valores extremos dos componentes lentos, ou

permanentes dos desvios de frequência Δf_{p_t} , a serem anulados. O valor mínimo é $\Delta f_{p_t} = 0$, e o valor máximo $\Delta f_{p_t} = \Delta f^{\text{máx}}$, é representado pela variação da frequência capaz de consumir toda a reserva de regulação existente, em um certo instante de tempo.

Supondo-se que o estatismo em regime permanente de todas as unidade geradoras participantes da regulação de frequência, na base de potência de cada uma delas, seja tal que o estatismo equivalente do sistema possa ser considerado como de 0,05 pu, e que o nível de reserva de regulação $rr_j^{\text{mín}}$, seja de 5% (0,05 pu) da capacidade de geração disponível do sistema, o desvio máximo da variação de frequência capaz de ser anulado é de:

$$\Delta f^{\text{máx}} = -rr^{\text{mín}} \cdot S = -0,05 \cdot 0,05 = 0,0025 \text{ pu} = -0,150 \text{ Hz} \quad (6.19)$$

Em um dado instante de tempo t , o valor da reserva de regulação remanescente, $RRf_t^{(R)}$, no caso de um certo desvio permanente de frequência, Δf_{p_t} , pode ser obtido como se segue.

De (6.12) vem:

$$\Delta f_{p_t} = -rr_t^{(UT)} \cdot S \quad (6.20)$$

$$rr_t^{(UT)} = -\frac{\Delta f_{p_t}}{S} \quad (6.21)$$

Em (6.21), $rr_t^{(UT)}$ é a parcela da reserva de regulação que deveria ser utilizada pelos dispositivos de regulação por efeito do desvio de longa duração da frequência Δf_{p_t} , para retornar a frequência ao seu valor nominal. Um valor negativo para esta parcela significa que a frequência encontra-se acima do seu valor nominal sendo o desvio positivo.

Para a reserva de regulação remanescente em pu, em função do desvio Δf_{p_t} , tem-se, então:

$$rr_t^{(R)} = rr_j^{\min} - rr_t^{(UT)} \quad (6.22)$$

ou, de (6.12) e (6.21):

$$rr_t^{(R)} = rr_j^{\min} + \frac{\Delta fp_t}{S} = rr_j^{\min} \cdot \left(1 + \frac{\Delta fp_t}{|rr_j^{\min} \cdot S|} \right), \quad t \in j \quad (6.23)$$

Com (6.19) em (6.23) vem:

$$rr_t^{(R)} = rr_j^{\min} \cdot \left(1 + \frac{\Delta fp_t}{|\Delta f_j^{\max}|} \right), \quad t \in j \quad (6.24)$$

e para o valor da reserva remanescente, em um certo instante de tempo t , em unidades de potência tem-se:

$$RRf_t^{(R)} = RRf_j^{\min} \cdot \left(1 + \frac{\Delta fp_t}{|\Delta f_j^{\max}|} \right), \quad t \in j \quad (6.25)$$

Em (6.25), $RRf_j^{\min}$ representa o requisito mínimo de reserva para regulação em uma certa hora j , em unidades de potência

O termo entre parêntesis em (6.24) será denominado ‘fator de eficiência instantâneo da regulação de frequência’:

$$FEI_t = \left(1 + \frac{\Delta fp_t}{|\Delta f_j^{\max}|} \right) = \left(1 + \frac{\Delta fp_t}{|rr_j^{\min} \cdot S|} \right), \quad t \in j \quad (6.26)$$

Ele mede o percentual de utilização da reserva de regulação em um instante t , para se anular o desvio de frequência observado, podendo ser também interpretado como a distância entre a reserva remanescente ao se anular esse desvio de frequência e a reserva mínima horária exigida.

Como fator de avaliação da eficiência, ele só possui significado se o seu valor for menor que 1. Isso ocorre apenas se a frequência encontrar-se abaixo do seu valor nominal, pois Δfp_t é negativo, sendo neste caso a reserva para regulação remanescente $rr_t^{(R)}$, menor que $rr_j^{\min}$. Entretanto a eficiência deve ser garantida, tratando-se tanto de valores negativos quanto de valores positivos dos desvios de frequência, ou seja, não se podem aceitar tanto as frequências abaixo quanto acima do valor nominal.

Com isto (6.26) será rescrita como:

$$FEI_t = \left(1 - \left| \frac{\Delta fp_t}{\Delta f_j^{\max}} \right| \right) = \left(1 - \left| \frac{\Delta fp_t}{rr_j^{\min} \cdot S} \right| \right), \quad t \in j \quad (6.27)$$

Para um certo intervalo de tempo T, o fator de eficiência é calculado como:

$$FE^{(T)} = \overline{FEI_t} = \frac{\sum_{t=1}^{nf^{(T)}} FEI_t}{nf^{(T)}}, \quad t \in T \quad (6.28)$$

sendo $nf^{(T)}$ o número de valores da frequência observados no intervalo de tempo T.

No caso de intervalos de uma hora, ele será denominado ‘fator de eficiência horária da regulação de frequência’, FER_j , calculado como:

$$FER_j = \overline{FEI_t} = \frac{\sum_{t=1}^{nf_j} \left(1 - \left| \frac{\Delta fp_t}{\Delta f_j^{\max}} \right| \right)}{nf_j}, \quad t \in j \quad (6.29)$$

sendo nf_j o número de valores da frequência observados, na hora j.

Considerando (6.27) vem:

$$FER_j = \overline{FEI_t} = \frac{\sum_{t=1}^{nf_j} \left(1 - \left| \frac{\Delta fp_t}{rr_j^{min} \cdot S} \right| \right)}{nf_j}, \quad t \in j \quad (6.30)$$

Este fator é capaz de medir ainda a permanência dos desvios de frequência afastados do seu valor nominal e com ela avaliar a qualidade da regulação secundária de frequência realizada a cada hora.

Uma outra forma de se interpretar o fator de eficiência dado por (6.30) é mostrada em seguida. Desenvolvendo (6.30) vem:

$$FER_j = \frac{1}{nf_j} \cdot \sum_{t=1}^{nf_j} \left(1 - \left| \frac{\Delta fp_t}{\Delta f_j^{max}} \right| \right) = \frac{1}{nf_j} \cdot \left[\sum_{t=1}^{nf_j} (1) - \frac{1}{|\Delta f_j^{max}|} \cdot \sum_{t=1}^{nf_j} |\Delta fp_t| \right], \quad t \in j \quad (6.31)$$

daí:

$$FER_j = \frac{1}{nf_j} \cdot \left[nf_j - \frac{1}{|\Delta f_j^{max}|} \cdot \sum_{t=1}^{nf_j} |\Delta fp_t| \right] = \left[1 - \frac{1}{|\Delta f_j^{max}|} \cdot \frac{\sum_{t=1}^{nf_j} |\Delta fp_t|}{nf_j} \right], \quad t \in j \quad (6.32)$$

Em (6.32), tem-se, para o desvio médio horário (considerando-se apenas os componentes lentos da frequência):

$$\overline{|\Delta fp_j|} = \frac{\sum_{t=1}^{nf_j} |\Delta fp_t|}{nf_j}, \quad t \in j \quad (6.33)$$

Como o erro de tempo em segundos/minuto é numericamente igual ao desvio médio de frequência em um certo intervalo de tempo, ou seja:

$$\varepsilon_T = \overline{\Delta fp_j} = \frac{\sum_{t=1}^{nf_j} (\Delta fp_t)}{nf_j}, \quad t \in j \quad (6.34)$$

e considerando este erro composto de duas parcelas, uma positiva $\varepsilon_T^{(+)}$, e outra negativa $\varepsilon_T^{(-)}$, ou seja:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_T^{(+)} + \varepsilon_T^{(-)} \quad (6.35)$$

vem, de (6.32), (6.34) e (6.35) :

$$FER_j = 1 - \frac{\left(\varepsilon_T^{(+)} + \left| \varepsilon_T^{(-)} \right| \right)}{\left| \Delta f_j^{\text{máx}} \right|} = \frac{\left| \Delta f_j^{\text{máx}} \right| - \left(\varepsilon_T^{(+)} + \left| \varepsilon_T^{(-)} \right| \right)}{\left| \Delta f_j^{\text{máx}} \right|} \quad (6.36)$$

Como se observa, o fator de eficiência horária da regulação de frequência pode ser colocado como uma função das componentes positiva e negativa do erro de tempo no período considerado.

6.2.1.1 Procedimento para o Cálculo do Fator de Eficiência Horária da Regulação de Frequência

Este fator pode ser obtido por meio dos procedimentos a seguir, que visam primeiramente separar e quantificar os componentes lentos dos desvios de frequência presentes em uma série de observações deste desvios.

1. Obter leituras instantâneas de frequência $f_t^{(\text{OBS})}$, um certo número de vezes por minuto, para cada hora em que se pretende avaliar a eficiência da regulação. O intervalo de medição depende do sistema de monitoração implantado em cada centro de controle e geralmente é de 2 ou 4 segundos.
2. Obter os desvios instantâneos de frequência:

$$\Delta f_t = f_t^{(\text{OBS})} - f_n$$

onde f_n é de 60 Hz, no caso do Sistema Elétrico Brasileiro.

3. Proceder à filtragem dos desvios Δf_t , obtendo-se os desvios instantâneos filtrados de frequência, $\Delta f_t^{(F)}$ que representam os componentes lentos ou permanentes da variação da frequência, Δf_p , cuja redução ou anulação é de responsabilidade da regulação (secundária) de frequência. Esta filtragem será feita por meio de um filtro de médias móveis.
4. Calcular os fatores instantâneos de eficiência FEI_t , para um certo valor de $rr_j^{\min 12}$. Serão considerados tanto os desvios positivos quanto os negativos, uma vez que, como já colocado, independentemente do seu sinal, a presença dos desvios indica ineficiência da regulação. Os fatores instantâneos de eficiência serão calculados por (6.37), na qual se usam os módulos dos desvios de frequência filtrados $|\Delta f_t^{(F)}|$.

$$FEI_t = \left(1 - \frac{|\Delta f_t^{(F)}|}{|\Delta f_j^{\max}|} \right) = \left(1 - \frac{|\Delta f_t^{(F)}|}{|rr_j^{\min} \cdot S|} \right) \quad (6.37)$$

5. Obter os fatores de eficiência horária da regulação secundária de frequência, FER_j , utilizando (6.30), que são as médias dos fatores instantâneos FEI_t a cada hora.

O valor de FER_j pode ser visto também como um indicador da proporção média da reserva de regulação, remanescente a cada hora, em função da qualidade da regulação de frequência realizada.

¹² Como nem sempre se tem disponível a cada hora, exatamente o valor percentual mínimo exigido para a reserva de regulação $rr_j^{\min}$, propõe-se a utilização dos valores percentuais realmente observados para esta reserva $rr_j^{(OBS)}$, conforme se vê nas seções 6.2.2, 6.3 e 6.4.

6.2.1.2 Aplicação Numérica: Obtenção de Fatores de Eficiência Horária da Regulação Secundária de Freqüência

Esta aplicação tem como objetivos analisar a aplicação do filtro de médias móveis e mostrar a obtenção dos fatores de eficiência FER_j , utilizando-se dados reais de freqüência de um sistema.

Dados: medições de freqüência de 2 em 2 segundos.

- Origem dos dados: CEMIG (Centro de Controle – Belo Horizonte)
- Data e período de medição: 17 de outubro de 2002, das 17:30 às 21:00 h.
- $S = 5\%$ (0,05 pu) e $rr_j^{\min} = 5\%$ (0,05 pu)

Em primeiro lugar foram aplicados filtros de médias móveis, variando-se a largura das janelas. Em seguida foram efetuadas novas filtragens sobre os dados obtidos da primeira filtragem. Os resultados são mostrados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Fatores de Eficiência Horária da Regulação Secundária de Freqüência

Filtro/Hora	17:00 h	18:00 h	19:00 h	20:00 h
Filtro de 10 minutos (Uma aplicação)	0,964232	0,902327	0,952514	0,915930
Filtro de 10 minutos (Duas aplicações)	0,974440	0,908008	0,948314	0,911932
Filtro de 6 minutos (Uma aplicação)	0,951003	0,901785	0,952661	0,911803
Filtro de 6 minutos (Duas aplicações)	0,951645	0,901783	0,953549	0,911136

Como se observa na Tabela 6.1, os fatores são menores que 1,00 e variam de hora a hora, ocorrendo o menor valor às 18:00 horas. Quanto ao filtro de médias móveis aplicado, para as janelas utilizadas, a variação dos valores obtidos é pouco significativa, o que indica pouca influência da largura destas janelas. Por esta razão será adotado o filtro de 6 minutos, aplicado duas vezes. Na Figura 6.1 e na Figura 6.2 são mostrados as curvas da freqüência no tempo.

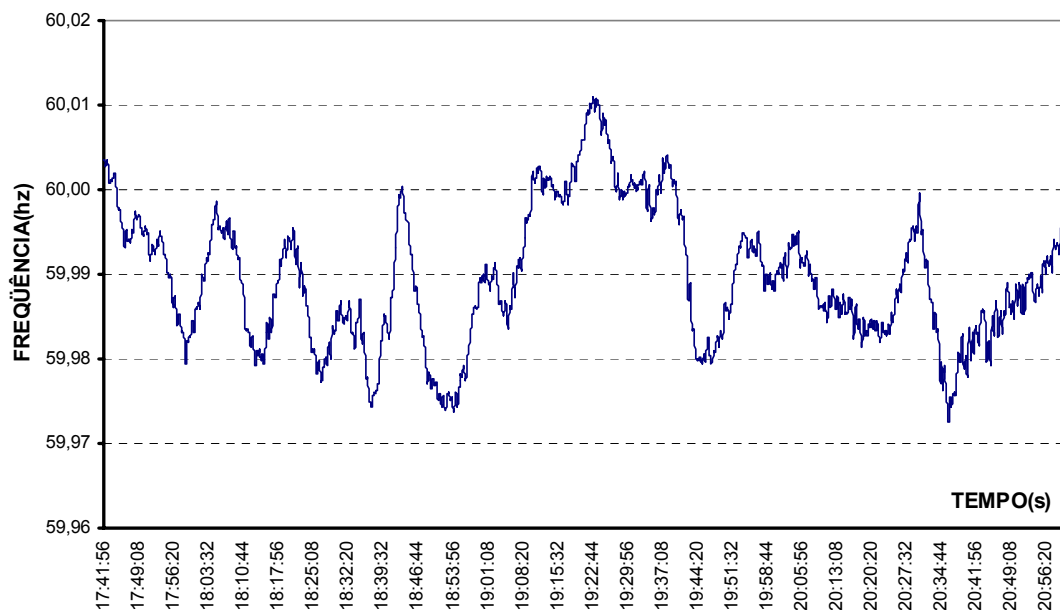


Figura 6.1 – Valores Filtrados da Frequência - Filtro de 6 Minutos, Uma Aplicação

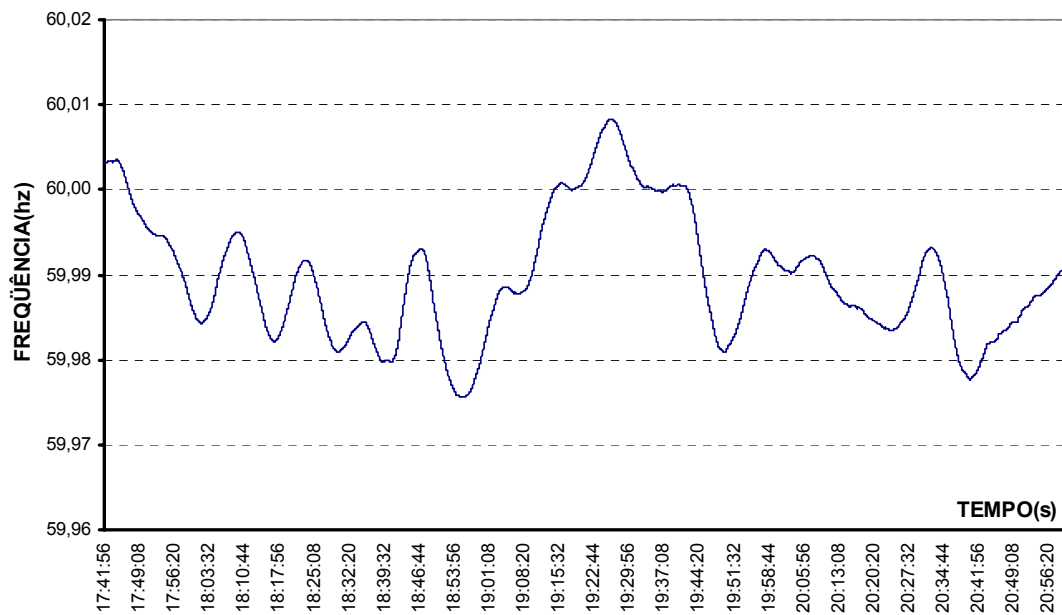


Figura 6.2 – Valores Filtrados da Frequência - Filtro de 6 Minutos, Duas Aplicações

6.2.2 Procedimento para o Cálculo da Remuneração do Benefício Agregado pelo Serviço de Regulação de Frequência

O procedimento proposto baseia-se na simulação da variação da reserva operativa para regulação de frequência e no acompanhamento da conseqüente variação diária do fator de eficiência horária da regulação. Os dados de entrada são as medições horárias da frequência, do sistema, geralmente feitas em intervalos de dois segundos. As etapas deste procedimento são descritas a seguir.

1. Levantar os valores pu médios das reservas de regulação observados nos períodos de carga leve, média e pesada de cada dia d, mês m:

$$rr_{dm}^{(L)}, rr_{dm}^{(M)} \text{ e } rr_{dm}^{(P)}$$

2. Com os registros de frequência observados em cada hora j, do dia d, do mês m, determinar os valores pu do tempo em que a regulação foi feita 'para cima' e 'para baixo', TC_{jdm} e TB_{jdm} :

$$TC_{jdm} = \sum_t (\Delta fp_t^{(-)})_{jdm} / \sum_{t=1}^{nf_j} (\Delta fp_t)_{jdm} \quad (6.38)$$

$$TB_{jdm} = \sum_t (\Delta fp_t^{(+)})_{jdm} / \sum_{t=1}^{nf_j} (\Delta fp_t)_{jdm} \quad (6.39)$$

sendo:

$(\Delta fp_t^{(-)})_{jdm}$ - desvios de frequência negativos, observados na hora j, do dia d, do mês m;

$(\Delta fp_t^{(+)})_{jdm}$ - desvios de frequência positivos, observados na hora j, do dia d, do mês m;

$(\Delta fp_t)_{jdm}$ - desvios de frequência observados na hora j, do dia d, do mês m.

A regulação para cima representa aquela em que houve realmente necessidade de reserva de potência, pois o valor da frequência diminuiu e teve que ser corrigido, por meio do aumento da geração,

3. Montar as curvas FER x rr(pu), para cada hora j, de cada dia d, do mês m, através da variação dos percentuais de reserva para regulação, em relação à capacidade do sistema. Isso é conseguido por meio da metodologia descrita na seção 6.2.1, com (6.40) e (6.41).

De (6.19), (6.30) e (6.37) vem:

$$FER_{jdmv} = \frac{\sum_{t=1}^{nf_j} \left(1 - \frac{|\Delta f_t^{(F)}|}{|rr^{(k)} \cdot E|} \right)}{nf_j} \quad (6.40)$$

$$rr^{(k)} = rr^{(k-1)} + \Delta rr; \quad k = 1, \dots, K; \quad rr^{(0)} > 0 \quad (6.41)$$

O valor de Δrr pode ser feito tão pequeno quanto se queira, de forma a se minimizar o erro do processo de ajuste de curvas que será implementado.

4. Montar as curvas do benefício incremental do serviço de regulação de frequência BI_SR x rr. Essas curvas devem ser obtidas para cada hora j de cada dia d, a partir das curvas FER x rr, através de (6.17).

As expressões aproximadas das curvas FER x rr e BI_SR x rr são obtidas através de interpolações polinomiais baseadas no método dos mínimos quadrados. O critério de aceitação dos coeficientes dos polinômios é dado por (5.13). A forma típica destas duas curvas pode ser vista na Figura 6.3.

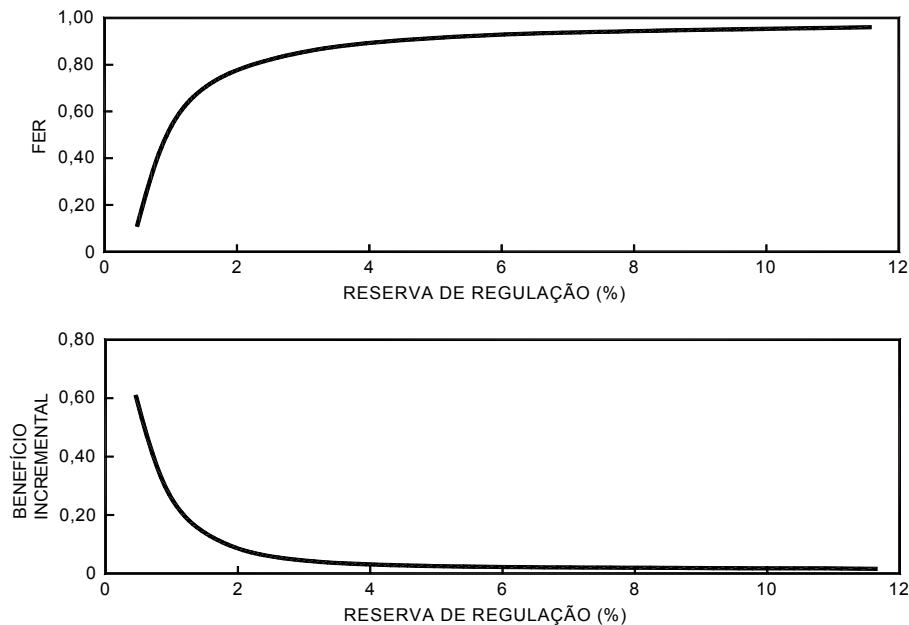


Figura 6.3 - Formas Típicas das Curvas FER x rr e BI_SR x rr

5. Calcular as remunerações básicas do benefício do serviço de regulação de frequência, para cada hora, de cada dia e de cada mês.

- 5.a Com os valores das reservas médias diárias observadas, $rr_{dm}^{(L)}$, $rr_{dm}^{(M)}$ e $rr_{dm}^{(P)}$, nas curvas do benefício incremental, BI_SR x rr, das horas componentes dos patamares de carga leve, média e pesada respectivamente, de cada dia, obter os valores do benefício incremental por patamar:

$$BI_SR_{jdm}^{(L)}, \text{ para } j \in L;$$

$$BI_SR_{jdm}^{(M)}, \text{ para } j \in M;$$

$$BI_SR_{jdm}^{(P)}, \text{ para } j \in P.$$

- 5.b Através de (6.18), determinar as remunerações básicas, por patamar de carga, de cada unidade geradora participante:

$$BE_SR_{ijdm}^{(P)} = C_{int} \cdot BI_SR_{jdm}^{(P)}, \quad j \in P \quad (6.42)$$

$$BE_SR_{ijdm}^{(M)} = C_{int} \cdot BI_SR_{jdm}^{(M)}, \quad j \in M \quad (6.43)$$

$$BE_SR_{ijdm}^{(L)} = C_{int} \cdot BI_SR_{jdm}^{(L)}, \quad j \in L \quad (6.44)$$

6.2.2.1 Procedimento para o Cálculo da Remuneração da Regulação de Frequência

As remunerações finais do benefício do serviço de regulação de frequência são obtidas a partir dos valores determinados por (6.42), (6.43) e (6.44):

$$BEF_SR_{ijdm}^{(P)} = (1 + TC_{jdm}) \cdot BE_SR_{jdm}^{(P)}, \quad j \in P \quad (6.45)$$

$$BEF_SR_{ijdm}^{(M)} = (1 + TC_{jdm}) \cdot BE_SR_{jdm}^{(M)}, \quad j \in M \quad (6.46)$$

$$BEF_SR_{ijdm}^{(L)} = (1 + TC_{jdm}) \cdot BE_SR_{jdm}^{(L)}, \quad j \in L \quad (6.47)$$

Para calcular as remunerações unitárias horárias do benefício da regulação de frequência, para as unidades geradoras participantes deste serviço, considera-se que elas são representadas pela composição de pagamentos referentes às reservas de regulação e ao serviço de regulação, como definido por (4.14). No seu cálculo devem ser portanto utilizadas também (6.1) (6.2) e (6.3). Tem-se, assim:

$$Be_Reg_{ijdm}^{(P)} = Be_RRg_{ijdm}^{(P)} + (1 + TC_{jdm}) \cdot \frac{BEF_SR_{ijdm}^{(P)}}{RRg_{ijdm}}, \quad j \in P \quad (6.48)$$

$$Be_Reg_{ijdm}^{(M)} = Be_RRg_{ijdm}^{(M)} + (1 + TC_{jdm}) \cdot \frac{BEF_SR_{ijdm}^{(M)}}{RRg_{ijdm}}, \quad j \in M \quad (6.49)$$

$$Be_Reg_{ijdm}^{(L)} = Be_RRg_{ijdm}^{(L)} + (1 + TC_{jdm}) \cdot \frac{BEF_SR_{ijdm}^{(L)}}{RRg_{ijdm}}, \quad j \in L \quad (6.50)$$

A consideração da proporção em que a regulação é feita 'para cima' em cada hora, faz com que em uma hora em que houve apenas regulação para baixo, a parcela de pagamento pelo serviço de regulação seja mínima. No caso de ter havido apenas regulação 'para cima' esta parcela terá valor máximo. A reserva de potência será sempre remunerada da mesma forma, pois mesmo não sendo necessária como reserva de regulação, poderá ser utilizada como reserva de confiabilidade.

A utilização do custo unitário de interrupção para o cálculo da remuneração básica horária do serviço de regulação de frequência, equivale a se utilizar para a remuneração de cada unidade geradora participante, um valor unitário (\$/MWh) diferente, proporcional à sua reserva para regulação em cada hora.

É importante que se defina também um valor máximo (*cap*) para a remuneração básica do serviço de regulação de frequência. No caso brasileiro, a proposta é de que este valor seja representado pelo valor de BE_SR_{jdm} referente ao percentual de reserva de regulação definido pelo limite de variação de frequência em regime permanente, de 59,90 a 60,10 Hz, definido nos Procedimentos de Rede [ONS, 2002]. Tem-se então para este valor máximo:

$$rr(0,10 \text{ Hz}) = \Delta f^{\max}(0,10 \text{ Hz})/S = 0,10/60/0,05 = 0,03 = 3\% \quad (6.51)$$

6.2.2.2 Contabilização Mensal da Remuneração da Regulação de Frequência

A contabilização mensal do pagamento de cada uma das unidades geradoras participantes é feita por meio de (6.52) e (6.53):

Contabilização diária:

$$BE_Reg_{idm} = \sum_{j=1}^{24} [RRg_{ijdm} \cdot Be_Reg_{ijdm}^{(P,M,L)}] \quad (6.52)$$

Contabilização mensal:

$$BE_Reg_{im} = \sum_{d=1}^{nd} BE_Reg_{idm} \quad (6.53)$$

sendo nd o número de dias no mês.

6.3 Estudo de Caso 02: Cálculo da Remuneração da Regulação de Frequência (Reservas e Serviço)

Este estudo¹³ foi desenvolvido para um período de 10 dias, de 17/11/2003 a 26/11/2003, o mesmo abrangido pelo estudo referente às reservas para confiabilidade, sendo utilizadas as leituras de frequência de 2 em 2 segundos, efetuadas no COSR-SE, Rio de Janeiro (Botafogo). As leituras referentes ao dia 20/11/2003 são mostradas na Figura 6.4.

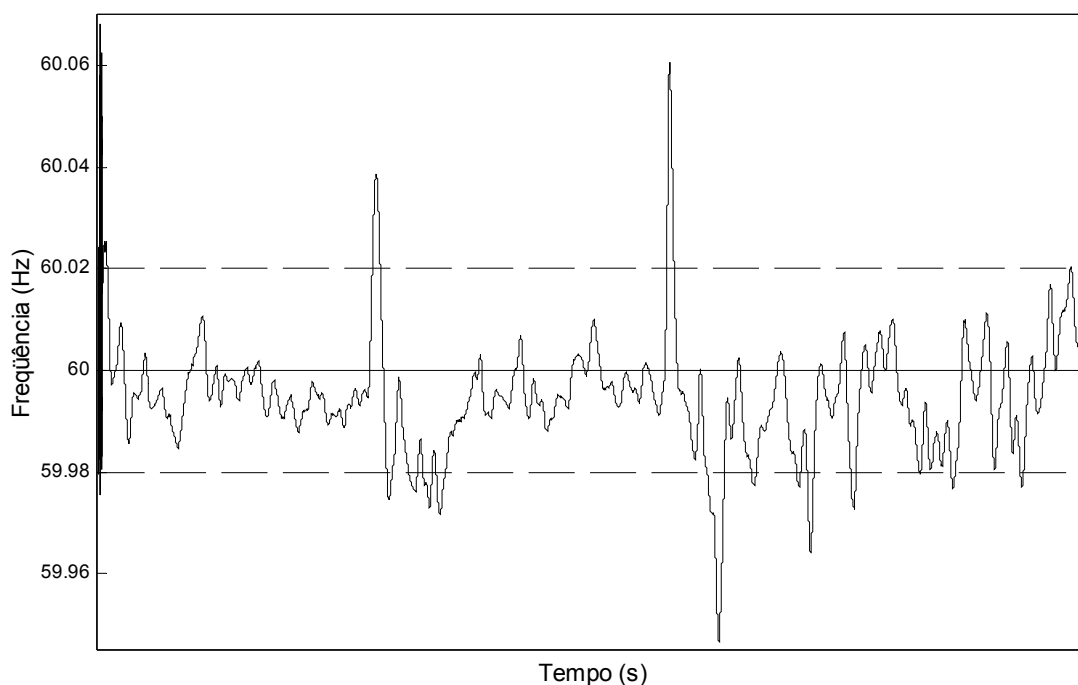


Figura 6.4 – Leituras de Frequência - Após Dupla Aplicação do Filtro de 6 Minutos

Após a filtragem dos valores das frequências, calcularam-se os percentuais horários de regulação ‘para cima’ e ‘para baixo’. Na Tabela 6.2 são colocados os percentuais de regulação para cima observados nos 10 dias do estudo, enquanto que na Figura 6.5, para o dia 20/11/2003, são ilustrados percentuais horários de regulação para cima e para baixo.

¹³ O estudo de caso 01 encontra-se no Capítulo 5, Seção 5.4, e parte dele será utilizado também no Capítulo 6.

Tabela 6.2 - Percentuais Horários de Regulação 'Para Cima'

HORA	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10
01	39,93	97,27	42,37	97,64	9,76	7,63	16,85	6,60	41,83	63,48
02	0,00	99,52	49,06	53,65	6,44	62,85	82,20	83,44	70,46	27,92
03	26,47	100,00	100,00	91,69	0,06	52,10	0,00	96,32	61,37	26,76
04	46,99	100,00	89,38	100,00	8,73	74,59	94,58	97,73	99,47	100,00
05	84,35	100,00	99,59	100,00	100,00	100,00	35,60	50,59	93,70	100,00
06	52,95	88,24	100,00	36,40	92,33	29,82	7,41	95,94	19,13	89,43
07	94,88	91,78	100,00	100,00	93,23	100,00	74,87	86,15	86,05	100,00
08	99,38	93,23	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	93,48
09	100,00	92,09	100,00	96,83	82,75	100,00	100,00	99,89	100,00	92,88
10	86,61	100,00	100,00	89,18	100,00	100,00	77,31	100,00	100,00	100,00
11	93,22	64,89	100,00	63,26	15,21	100,00	100,00	93,23	76,88	100,00
12	99,73	73,73	100,00	80,38	6,63	78,72	100,00	87,28	99,46	100,00
13	94,77	100,00	100,00	23,73	97,74	100,00	34,52	100,00	97,40	100,00
14	90,36	100,00	81,62	99,91	100,00	98,96	80,78	97,90	100,00	85,52
15	76,46	100,00	98,58	99,34	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
16	89,88	100,00	100,00	95,98	95,20	52,28	100,00	95,83	100,00	100,00
17	1,15	82,44	91,48	97,90	58,08	100,00	53,25	73,58	67,86	76,89
18	24,05	77,38	87,43	73,43	47,10	100,00	18,14	67,13	0,00	62,73
19	73,36	81,29	56,99	80,23	80,34	100,00	100,00	78,55	78,21	87,56
20	97,13	100,00	95,32	93,81	84,90	72,75	99,89	97,22	99,89	88,21
21	34,13	63,57	26,12	65,60	16,95	19,91	51,62	6,57	37,62	90,35
22	71,19	87,91	16,64	88,78	94,27	93,90	27,22	62,83	21,05	99,69
23	7,31	4,81	12,63	0,00	46,63	52,97	2,49	13,50	0,69	53,82
24	39,93	97,27	42,37	97,64	9,76	7,63	16,85	6,60	41,83	63,48

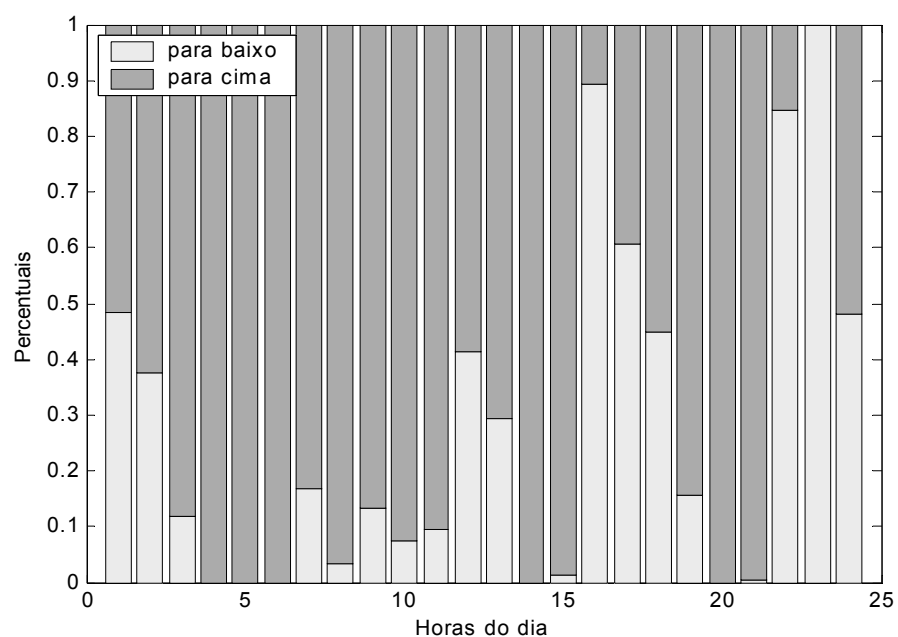


Figura 6.5 – Percentuais Horários de Regulação 'Para Cima' e 'Para Baixo'

Foram obtidos então os fatores de eficiência horária da regulação de frequência, em função do percentual de reserva de regulação para as 24 horas do dia 20/11/2003. Em seguida, foram determinados os benefícios incrementais horários do serviço de regulação, através de (6.17). Serão mostradas apenas quatro curvas, tanto para os fatores de eficiência horária, quanto para os benefícios incrementais. Elas podem ser vistas na Figura 6.6 e na Figura 6.7.

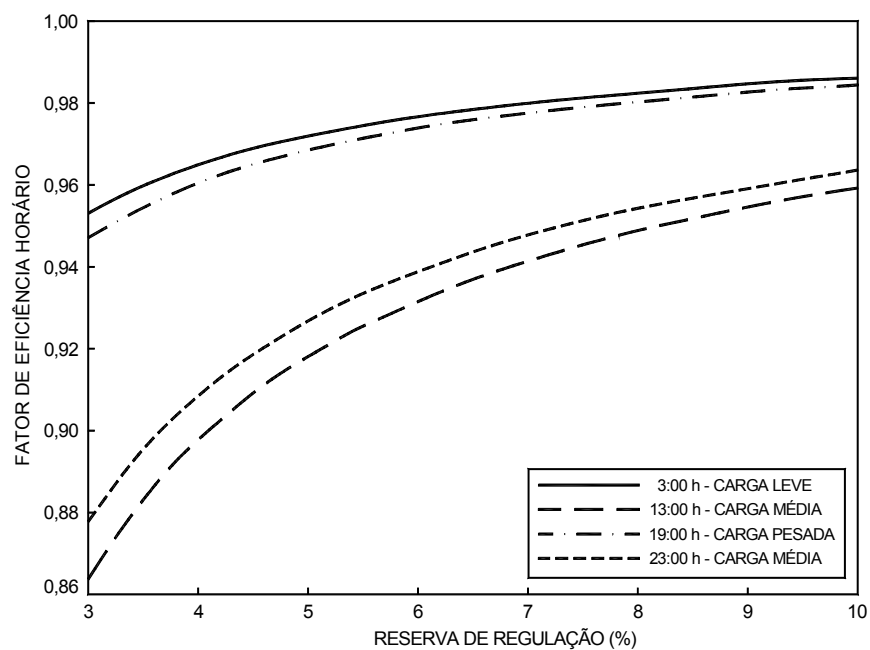


Figura 6.6 – Curvas do Fator de Eficiência Horária x Reserva Percentual

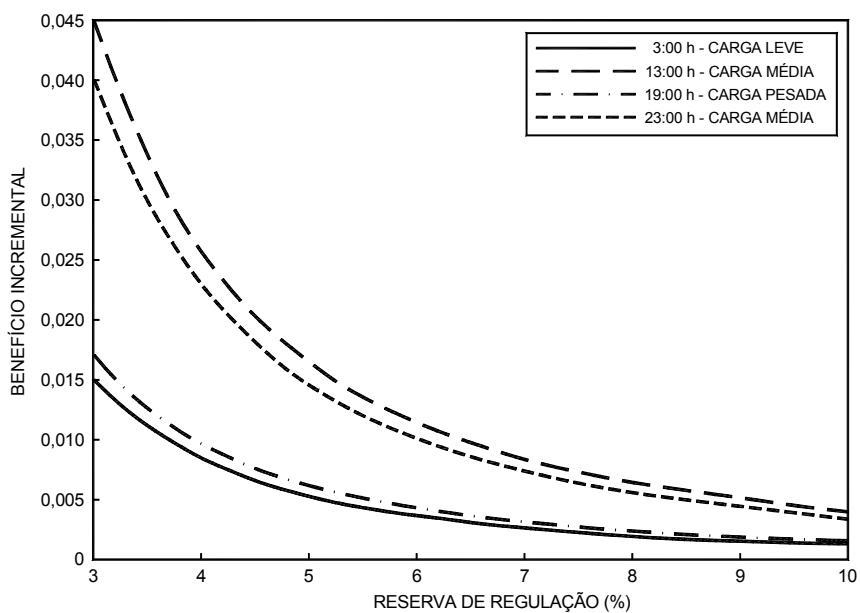


Figura 6.7 – Curvas do Benefício Incremental Horário x Reserva Percentual

Os percentuais médios de reserva para regulação de frequência, observados nos dias de estudo, são mostrados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Percentuais Médios de Reserva para Regulação de Frequência Observados

PATAMAR/DIA		Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10
PESADA	$Ds_{adm}^{(L)}$	3,20	2,80	3,12	3,05	3,18	3,60	3,85	3,15	2,92	3,25
MÉDIA	$Ds_{adm}^{(M)}$	3,60	3,45	3,40	3,65	3,20	4,25	4,60	3,40	3,35	3,52
LEVE	$Ds_{adm}^{(P)}$	4,00	4,35	4,90	4,75	3,95	5,30	5,60	4,60	4,10	3,90

Os valores calculados para o benefício incremental e para a remuneração horária básica, pelo serviço de regulação de frequência são mostrados na Tabela 6.4 e na Tabela 6.5

Tabela 6.4 - Benefício Incremental do Serviço de Regulação de Frequência - pu

HORA	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10
01	0,03606	0,02666	0,01108	0,01432	0,01313	0,01119	0,01381	0,00979	0,03102	0,01304
02	0,01697	0,01014	0,00417	0,01075	0,01009	0,01044	0,00663	0,01067	0,01674	0,01927
03	0,01507	0,01809	0,00662	0,00683	0,01279	0,00861	0,00886	0,00849	0,00694	0,00918
04	0,00859	0,01204	0,00971	0,00315	0,02408	0,00571	0,02142	0,00505	0,00628	0,00589
05	0,01692	0,00435	0,00824	0,01095	0,01413	0,00460	0,00322	0,00988	0,01039	0,02068
06	0,01889	0,01526	0,01127	0,01072	0,01721	0,01285	0,00674	0,02247	0,01332	0,03707
07	0,04100	0,01311	0,01206	0,01734	0,01502	0,00407	0,01483	0,01163	0,01402	0,01558
08	0,03679	0,02657	0,05059	0,04419	0,03149	0,01800	0,01315	0,02056	0,02670	0,06231
09	0,03496	0,01600	0,05442	0,03916	0,04017	0,01786	0,02285	0,03967	0,06126	0,02535
10	0,05309	0,03797	0,04423	0,01280	0,04148	0,03153	0,02649	0,03744	0,05903	0,03600
11	0,01444	0,04382	0,03232	0,01503	0,02616	0,02672	0,01129	0,02920	0,02538	0,05150
12	0,02126	0,01159	0,03171	0,01081	0,01207	0,01118	0,02325	0,00858	0,02104	0,02882
13	0,01957	0,01243	0,01915	0,00950	0,04360	0,00849	0,01366	0,01216	0,02385	0,03301
14	0,05015	0,02140	0,03432	0,02904	0,03475	0,01065	0,00921	0,02071	0,03221	0,03188
15	0,12870	0,06794	0,01836	0,03834	0,03195	0,00999	0,01877	0,01364	0,06518	0,01135
16	0,05990	0,13325	0,02632	0,04100	0,01142	0,01564	0,05327	0,01261	0,05920	0,01321
17	0,02479	0,01416	0,05369	0,02518	0,01180	0,01206	0,02149	0,00962	0,04059	0,01147
18	0,03060	0,03536	0,02263	0,03683	0,01512	0,02191	0,02122	0,02123	0,01369	0,01072
19	0,06201	0,03834	0,01561	0,02862	0,02013	0,01999	0,03434	0,01140	0,07300	0,01456
20	0,02323	0,04497	0,02250	0,03009	0,02238	0,03889	0,03022	0,04104	0,04564	0,02659
21	0,04178	0,04145	0,01928	0,04971	0,01708	0,01809	0,01973	0,04353	0,06889	0,01123
22	0,01462	0,01469	0,02052	0,01613	0,03318	0,00608	0,00500	0,02528	0,01846	0,01703
23	0,02601	0,01931	0,02495	0,02200	0,02040	0,01384	0,01079	0,01492	0,03027	0,02946
24	0,02017	0,01103	0,02690	0,02662	0,00967	0,00705	0,02423	0,01997	0,04049	0,01441

Tabela 6.5 - Remuneração Horária Básica do Serviço de Regulação de Frequência - R\$

$$Be_SR_{jdm}^{(L,MP)}$$

HORA	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10
01	166,58	123,19	51,17	66,16	60,65	51,71	63,82	45,23	143,32	60,25
02	78,39	46,84	19,28	49,64	46,59	48,22	30,63	49,28	77,34	89,00
03	69,62	83,57	30,57	31,54	59,10	39,79	40,94	39,24	32,06	42,42
04	39,69	55,62	44,85	14,55	111,27	26,39	98,96	23,32	29,03	27,23
05	78,18	20,08	38,09	50,59	65,27	21,25	14,88	45,64	48,02	95,56
06	87,27	70,49	52,06	49,54	79,51	59,37	31,16	103,81	61,53	171,26
07	189,40	60,57	55,70	80,12	69,41	18,80	68,51	53,71	64,77	71,99
08	169,98	122,77	233,72	204,14	145,48	83,18	60,74	94,97	123,35	287,86
09	161,52	73,93	251,41	180,91	185,59	82,53	105,58	183,26	283,00	117,13
10	245,28	175,40	204,35	59,15	191,64	145,67	122,38	172,97	272,71	166,34
11	66,70	202,44	149,33	69,45	120,86	123,45	52,17	134,88	117,26	237,91
12	98,24	53,52	146,48	49,94	55,77	51,63	107,43	39,62	97,20	133,13
13	90,40	57,43	88,48	43,88	201,43	39,21	63,09	56,16	110,19	152,50
14	231,70	98,87	158,55	134,17	160,55	49,20	42,57	95,67	148,81	147,28
15	594,62	313,87	84,80	177,15	147,60	46,15	86,73	63,01	301,11	52,42
16	276,73	615,59	121,60	189,41	52,74	72,24	246,09	58,27	273,49	61,05
17	114,54	65,40	248,06	116,35	54,52	55,72	99,26	44,43	187,52	52,97
18	141,35	163,38	104,55	170,15	69,86	101,22	98,05	98,07	63,25	49,51
19	286,48	177,14	72,11	132,23	93,01	92,35	158,66	52,69	337,23	67,28
20	107,30	207,76	103,94	138,99	103,40	179,67	139,64	189,61	210,86	122,85
21	193,00	191,50	89,05	229,66	78,90	83,56	91,15	201,08	318,25	51,86
22	67,55	67,85	94,79	74,51	153,27	28,09	23,12	116,77	85,28	78,67
23	120,14	89,20	115,26	101,65	94,25	63,95	49,86	68,92	139,85	136,10
24	93,18	50,96	124,28	123,00	44,67	32,55	111,96	92,24	187,06	66,57

Na Tabela 6.6 são relacionados os valores obtidos para a remuneração final pelo serviço de regulação de frequência, considerando-se, portanto, o valor pu da regulação 'para cima'. O seu cálculo é feito através dos segundos termos de (6.45) a (6.47).

Tabela 6.6 - Remuneração Horária Final do Serviço de Regulação de Frequência - R\$

REF _ SR^(L,M,P)_{ijdm}

HORA	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10
01	258,81	243,64	99,42	88,72	73,86	87,13	75,76	47,56	147,88	92,95
02	109,69	92,40	27,44	98,12	51,14	51,89	35,80	52,54	109,68	145,51
03	69,62	166,75	45,57	48,46	62,90	64,80	74,59	71,98	54,64	54,26
04	50,19	111,24	89,69	27,89	111,33	40,13	98,96	45,77	46,85	34,51
05	114,92	40,17	72,13	101,17	70,96	37,10	28,96	90,24	95,79	191,12
06	160,88	140,98	103,91	99,09	159,02	118,73	42,25	156,33	119,19	342,51
07	289,69	114,01	111,41	109,28	133,49	24,40	73,58	105,24	77,16	136,37
08	331,25	235,45	467,44	408,29	281,11	166,36	106,21	176,78	229,50	575,73
09	322,04	142,86	502,83	361,81	371,18	165,06	211,16	366,52	566,00	226,62
10	490,56	336,93	408,71	116,42	350,22	291,33	244,76	345,74	545,42	320,84
11	124,47	404,87	298,66	131,38	241,72	246,90	92,50	269,76	234,52	475,81
12	189,82	88,26	292,96	81,52	64,25	103,26	214,86	76,56	171,94	266,25
13	180,56	99,77	176,96	79,15	214,78	70,08	126,18	105,18	219,79	305,00
14	451,30	197,74	317,10	166,00	317,47	98,39	57,26	191,34	293,76	294,56
15	1131,94	627,74	154,02	354,13	295,21	91,83	156,80	124,70	602,22	97,25
16	488,31	1231,19	241,47	377,58	105,48	144,47	492,18	116,54	546,98	122,10
17	217,50	130,79	496,11	228,03	106,43	84,85	198,52	87,01	375,03	105,93
18	142,98	298,06	200,19	336,73	110,44	202,44	150,26	170,23	106,17	87,58
19	355,39	314,21	135,15	229,32	136,82	184,70	187,44	88,05	337,23	109,49
20	186,01	376,65	163,18	250,50	186,46	359,34	279,27	338,55	375,77	230,42
21	380,46	383,01	173,93	445,10	145,89	144,36	182,21	396,58	636,16	97,61
22	90,61	110,97	119,55	123,40	179,25	33,68	35,06	124,44	117,36	149,75
23	205,67	167,63	134,44	191,90	183,09	124,00	63,43	112,22	169,29	271,77
24	99,99	53,41	139,98	123,00	65,50	49,79	114,75	104,69	188,35	102,40

Os valores máximos das remunerações básicas, para o período estudado, são aqueles apresentados na Tabela 6.7, referentes a um percentual de reservas para regulação de 3,00%.

Tabela 6.7 – Valores Máximos da Remuneração Horária Básica do Serviço de Regulação de Frequência - R\$

HORA	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10
01	290,37	254,72	134,60	163,53	103,06	158,98	218,62	104,78	262,68	99,76
02	136,65	96,85	50,71	122,70	79,17	148,24	104,94	114,16	141,75	147,39
03	121,35	172,81	80,43	77,95	100,42	122,33	140,24	90,90	58,75	70,24
04	69,18	115,01	117,98	35,96	189,06	81,12	338,98	54,01	53,21	45,08
05	136,28	41,53	100,20	125,03	110,90	65,33	50,97	105,71	88,01	158,24
06	152,11	145,75	136,96	122,45	135,10	182,52	106,73	240,47	112,78	283,59
07	330,14	125,24	146,55	198,02	117,94	57,80	234,66	124,42	118,72	119,21
08	239,83	159,38	294,97	296,01	163,67	164,03	140,69	119,85	151,31	388,61
09	227,90	95,98	317,29	262,32	208,80	162,75	244,57	231,28	347,15	158,12
10	346,08	227,70	257,90	85,76	215,60	287,26	283,48	218,29	334,52	224,55
11	94,11	262,80	188,46	100,70	135,97	243,45	120,84	170,22	143,84	321,17
12	138,61	69,48	184,86	72,41	62,74	101,81	248,86	50,00	119,24	179,72
13	127,55	74,55	111,67	63,63	226,62	77,33	146,15	70,88	135,17	205,87
14	326,92	128,35	200,10	194,55	180,62	97,02	98,61	120,74	182,54	198,83
15	838,98	407,46	107,02	256,86	166,06	91,02	200,91	79,53	369,36	70,76
16	390,45	799,14	153,46	274,65	59,34	142,45	570,04	73,54	335,48	82,42
17	161,62	84,90	313,06	168,71	61,34	109,88	229,93	56,07	230,02	71,50
18	159,03	163,38	112,24	175,28	77,69	142,82	158,20	107,16	63,25	57,34
19	322,30	177,14	77,42	136,21	103,43	130,30	255,98	57,57	337,23	77,92
20	120,72	207,76	111,59	143,18	114,98	253,51	225,29	207,18	210,86	142,28
21	217,14	191,50	95,60	236,58	87,74	117,90	147,07	219,72	318,25	60,06
22	95,31	88,08	119,63	108,05	172,43	55,39	53,56	147,37	104,62	106,20
23	169,51	115,80	145,47	147,40	106,03	126,11	115,49	86,98	171,55	183,73
24	131,47	66,15	156,85	178,36	50,25	64,19	259,35	116,41	229,46	89,87

Para determinar as remunerações finais de uma unidade geradora pela regulação de frequência, através das equações (6.48) a (6.50), será considerada a unidade hidráulica utilizada no estudo de caso 01. As remunerações horárias unitárias das suas reservas operativas são vistas na Tabela 5.7, e serão adotadas como a remuneração das reservas para regulação de frequência. Os valores encontrados são vistos na Tabela 6.8, referindo-se ao quarto dia do período em estudo (20/11/2003).

Tabela 6.8 - Remuneração Final da Regulação de Frequência - Unidade Hidráulica

HORA	REMUNERAÇÃO UNITÁRIA DA RESERVA (R\$/MWh)	RESERVA PARA REGULAÇÃO (média horária) (MW)	REGULAÇÃO PARA CIMA (%)	REMUNERAÇÃO HORÁRIA BÁSICA DO SERVIÇO (R\$)	REMUNERAÇÃO FINAL DA REGULAÇÃO DE FREQUÊNCIA (R\$)
01	0,39	180	97,64	66,16	200,96
02	0,39	180	53,65	49,64	146,47
03	0,39	180	91,69	31,54	130,66
04	0,39	180	100,00	14,55	99,30
05	0,39	180	100,00	50,59	171,38
06	0,39	180	36,40	49,54	137,77
07	0,39	180	100,00	80,12	230,44
08	4,04	140	100,00	204,14	973,88
09	4,04	140	96,83	180,91	921,69
10	4,04	140	89,18	59,15	677,50
11	4,04	140	63,26	69,45	678,98
12	4,04	140	80,38	49,94	655,68
13	4,04	140	23,73	43,88	619,89
14	4,04	140	99,91	134,17	833,82
15	4,04	140	99,34	177,15	918,73
16	4,04	140	95,98	189,41	936,81
17	4,04	140	97,90	116,35	795,86
18	18,11	120	73,43	170,15	2468,29
19	18,11	120	80,23	132,23	2411,52
20	18,11	120	93,81	138,99	2442,58
21	18,11	120	65,60	229,66	2553,52
22	4,04	160	88,78	74,51	787,06
23	4,04	160	0,00	101,65	748,05
24	4,04	160	97,64	123,00	889,50
REMUNERAÇÃO TOTAL NO DIA					21430,33

6.4 Estudo de Caso 03: Remuneração Considerando os Custos

Este estudo tem como objetivo mostrar as implicações dos custos na remuneração das reservas operativas. Serão analisadas e comparadas as remunerações de uma unidade hidráulica com turbina tipo Francis, situada na região sudeste, e uma unidade térmica a carvão situada na região sul, ambas de 200 MW. Os dados necessários serão as remunerações unitárias pelo benefício dos serviços de reservas operativas para confiabilidade e pela regulação de frequência.

6.4.1 Usinas ou Unidades Geradoras Fornecendo Reservas para Confiabilidade (Reserva Girante)

As remunerações unitárias resultantes do estudo de caso 01 (Capítulo 5) referentes ao dia 20/11/2003, serão usados como remunerações unitárias pelo benefício do serviço de reserva para confiabilidade neste estudo de caso, feito para um único dia de operação das máquinas consideradas. Os seus valores foram obtidos da Tabela 5.7 e da Tabela 5.8, distribuídas pelas horas componentes de cada patamar de carga e são mostradas na Tabela 6.9 e na Tabela 6.10. O câmbio usado é de R\$3,00/US\$.

Tabela 6.9 – Remunerações Unitárias pelo Benefício da Reserva para Confiabilidade
Unidade Hidráulica

HORA	Be _RCf _{ij} (R\$/MWh)	HORA	Be _RCf _{ij} (R\$/MWh)
01	0,39	13	4,04
02	0,39	14	4,04
03	0,39	15	4,04
04	0,39	16	4,04
05	0,39	17	4,04
06	0,39	18	18,11
07	0,39	19	18,11
08	4,04	20	18,11
09	4,04	21	18,11
10	4,04	22	4,04
11	4,04	23	4,04
12	4,04	24	4,04

Tabela 6.10 – Remunerações Unitárias pelo Benefício da Reserva para Confiabilidade

Unidade Térmica

HORA	Be_RCf _{ij} (R\$/MWh)	HORA	Be_RCf _{ij} (R\$/MWh)
01	0,36	13	2,70
02	0,36	14	2,70
03	0,36	15	2,70
04	0,36	16	2,70
05	0,36	17	2,70
06	0,36	18	13,44
07	0,36	19	13,44
08	2,70	20	13,44
09	2,70	21	13,44
10	2,70	22	2,70
11	2,70	23	2,70
12	2,70	24	2,70

Os custos de oportunidade referentes às unidades analisadas, mostradas na Tabela 6.11, são obtidos diretamente da Tabela 3.5, da Tabela 3.6 e da Tabela 3.9, usando-se um câmbio de R\$3,00/US\$.

Tabela 6.11 - Custos de Oportunidade

TIPO	CUSTOS DE OPORTUNIDADE - Opt _{ij} (R\$/MWh)		
	EM RELAÇÃO AOS CONTRATOS. INICIAIS	USINAS 'VELHAS'	USINAS 'NOVAS'
CARVÃO	30,48	9,15	61,74
HIDRÁULICA	22,26	4,90	111,84

6.4.1.1 Unidade Hidráulica

a. Não despachada

- Caso 03.a - Operando em vazio, não sincronizada.

Nesta hipótese os custos incorridos referem-se apenas à água utilizada para se manter a unidade geradora em rotação conforme visto na seção 3.2.5.1-a, ou seja:

$$CI_Res_{ij} = ad_i \cdot Cag_{ij} \cdot ConAg_i$$

Como não se tem ainda um valor para o custo da água, em $\$/m^3$, será adotado o valor de R\$3,00 (US\$1.00)/MWh sugerido pelo Comitê de Revitalização do Modelo do Setor Elétrico, na Tabela 3.1. Para a abertura do distribuidor será adotado um valor de $ad_i = 0,13$. Assim:

$$Ci_Res_{ij} = 0,13 \cdot 3,00 = 0,39 \text{ R\$/MWh}$$

$$Opt_{ij} = 0$$

- Caso 03.b - Operando como compensador síncrono

Adotando como preço da energia o valor do contrato inicial (Tabela 3.8) e a média dos quatro primeiros valores de consumo da Tabela 3.10, através de (3.37) vem:

$$Ci_Res_{ij} = 49,39 \cdot 0,0176 = 0,8693 \text{ R\$/MWh}$$

$$Opt_{ij} = 0$$

Como o custo de oportunidade é nulo, em ambos os casos acima a unidade será remunerada por (4.6). Desta forma, as remunerações unitárias ficam:

$$Re_Res_{ij} = 0,3900 + Be_RCf_{ij} \text{ (R\$/MW)}, \text{ para o caso 03.a, e}$$

$$Re_Res_{ij} = 0,8693 + Be_RCf_{ij} \text{ (R\$/MW)}, \text{ para o caso 03.b.}$$

Assim, a partir da Tabela 6.9, são obtidos os valores finais das remunerações, mostrados na Tabela 6.12 e na Tabela 6.13.

Tabela 6.12 - Remunerações da Unidade Hidráulica - Caso 03.a

HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)	HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)
01	0,78	200	156,00	13	4,04	0	0
02	0,78	200	156,00	14	4,04	0	0
03	0,78	200	156,00	15	4,04	0	0
04	0,78	0	0	16	4,04	0	0
05	0,78	0	0	17	4,04	0	0
06	0,78	0	0	18	18,50	200	3700,00
07	0,78	0	0	19	18,50	200	3700,00
08	4,43	200	886,00	20	18,50	200	3700,00
09	4,43	200	886,00	21	18,50	200	3700,00
10	4,43	200	886,00	22	4,43	0	0
11	4,43	200	886,00	23	4,43	0	0
12	4,43	0	0	24	4,43	200	886,00

Tabela 6.13 - Remunerações da Unidade Hidráulica - Caso 03.b

HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)	HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)
01	1,26	200	251,86	13	4,91	0	0
02	1,26	200	251,86	14	4,91	0	0
03	1,26	200	251,86	15	4,91	0	0
04	1,26	0	0	16	4,91	0	0
05	1,26	0	0	17	4,91	0	0
06	1,26	0	0	18	18,98	200	3795,86
07	1,26	0	0	19	18,98	200	3795,86
08	4,91	200	981,86	20	18,98	200	3795,86
09	4,91	200	981,86	21	18,98	200	3795,86
10	4,91	200	981,86	22	4,91	0	0
11	4,91	200	981,86	23	4,91	0	0
12	4,91	0	0	24	4,91	200	981,86

b. Parcialmente despachada

Será adotada inicialmente a hipótese de que a unidade geradora tenha sido despachada em 80% da sua capacidade nominal.

- Caso 03.c - Sem redução da geração

Como não há nem custo específico e nem custo de oportunidade, vem:

$$Re_Res_{ij} = Be_Res_{ij} \quad (6.54)$$

e por isto a remuneração será feita pelos valores da Tabela 6.14.

Tabela 6.14 - Remunerações da Unidade Hidráulica - Caso 03.c

HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)	HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)
01	0,39	160	62,40	13	4,04	0	0
02	0,39	160	62,40	14	4,04	0	0
03	0,39	160	62,40	15	4,04	0	0
04	0,39	0	0	16	4,04	0	0
05	0,39	0	0	17	4,04	0	0
06	0,39	0	0	18	18,11	160	2897,60
07	0,39	0	0	19	18,11	160	2897,60
08	4,04	160	646,40	20	18,11	160	2897,60
09	4,04	160	646,40	21	18,11	160	2897,60
10	4,04	160	646,40	22	4,04	0	0
11	4,04	160	646,40	23	4,04	0	0
12	4,04	0	0	24	4,04	160	646,40

- Caso 03.d - Com redução da geração ("constrained down") - usina 'velha'

Será considerada uma redução de 100 MW na geração inicialmente despachada da unidade geradora, para fins de reserva.

Nesse caso, só estará presente o custo de oportunidade. Comparando-se o valor do custo de oportunidade (Tabela 6.11) com as remunerações do benefício (Tabela 6.9), vê-se que:

$$Be_Res_{ij} > Opt_{ij} ,$$

para o patamar de carga pesada, valendo assim, também para este caso, (4.6). Para os patamares de carga média e leve, tem-se:

$$Be_Res_{ij} < Opt_{ij}$$

sendo a unidade remunerada por (4.8). Assim, a remuneração será feita com os valores da Tabela 6.15.

Tabela 6.15 - Remunerações da Unidade Hidráulica – Caso 03.d

HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)	HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)
01	4,90	100	490,00	13	4,90	0	0
02	4,90	100	490,00	14	4,90	0	0
03	4,90	100	490,00	15	4,90	0	0
04	4,90	0	0	16	4,90	0	0
05	4,90	0	0	17	4,90	0	0
06	4,90	0	0	18	18,11	100	1811,00
07	4,90	0	0	19	18,11	100	1811,00
08	4,90	100	490,00	20	18,11	100	1811,00
09	4,90	100	490,00	21	18,11	100	1811,00
10	4,90	100	490,00	22	4,90	0	0
11	4,90	100	490,00	23	4,90	0	0
12	4,90	0	0	24	4,90	100	490,00

- Caso 03.e - Com redução da geração - usina 'nova'

Será considerada uma redução de 100 MW na geração inicialmente despachada da unidade geradora, para fins de reserva.

Agora tem-se:

$$Be_Res_{ij} < Opt_{ij}$$

e a unidade será remunerada por (4.8).

Como $Cl_Res_{ij} = 0$ tem-se:

$$RE_Res_{ij} = OPT_{ij} = Opt_{ij} \cdot RCf_{ij} \quad (6.55)$$

Usando a Tabela 6.11:

$$Re_Res_{ij} = 111,84$$

As remunerações finais são mostradas na Tabela 6.16.

Tabela 6.16 - Remunerações da Unidade Hidráulica - Caso 03.e

HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)	HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)
01	111,84	100	11184,00	13	111,84	0	0
02	111,84	100	11184,00	14	111,84	0	0
03	111,84	100	11184,00	15	111,84	0	0
04	111,84	0	0	16	111,84	0	0
05	111,84	0	0	17	111,84	0	0
06	111,84	0	0	18	111,84	100	11184,00
07	111,84	0	0	19	111,84	100	11184,00
08	111,84	100	11184,00	20	111,84	100	11184,00
09	111,84	100	11184,00	21	111,84	100	11184,00
10	111,84	100	11184,00	22	111,84	0	0
11	111,84	100	11184,00	23	111,84	0	0
12	111,84	0	0	24	111,84	100	11184,00

- Caso 03.f - Com redução da geração - considerando os preços da energia dos contratos iniciais

Será considerada uma redução de 100 MW na geração inicialmente despachada da unidade geradora, para fins de reserva.

Da mesma forma que no caso 03.e, a unidade será remunerada por (4.8), sendo válida (6.55). Daí, da Tabela 6.11:

$$Re_Res_{ij} = 22,26$$

As remunerações finais são mostradas na Tabela 6.17.

Tabela 6.17 - Remunerações da Unidade Hidráulica - Caso 03.f

HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RES. (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)	HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RES. (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)
01	22,26	100	2226,00	13	22,26	0	0
02	22,26	100	2226,00	14	22,26	0	0
03	22,26	100	2226,00	15	22,26	0	0
04	22,26	0	0	16	22,26	0	0
05	22,26	0	0	17	22,26	0	0
06	22,26	0	0	18	22,26	100	2226,00
07	22,26	0	0	19	22,26	100	2226,00
08	22,26	100	2226,00	20	22,26	100	2226,00
09	22,26	100	2226,00	21	22,26	100	2226,00
10	22,26	100	2226,00	22	22,26	0	0
11	22,26	100	2226,00	23	22,26	0	0
12	22,26	0	0	24	22,26	100	2226,00

c. Totalmente despachada

Supondo-se que houve uma redução de 100 MW na geração inicialmente despachada (200MW), as remunerações pelas reservas para confiabilidade, nesse caso, são idênticas às dos casos 03.d, 03.e e 03.f. Desta forma:

- Caso 03.g - unidade 'velha' - remunerações finais na Tabela 6.15;
- Caso 03.h - unidade 'nova' - remunerações finais na Tabela 6.16, e
- Caso 03.i - preço da energia dos contratos iniciais - remunerações finais na Tabela 6.17.

6.4.1.2 Unidade Térmica

a. Não despachada

- Caso 03.j - Operando em vazio, não sincronizada

Considerando os custos mostrados na tabela Tabela 3.11 para uma unidade geradora térmica a carvão de capacidade de 196 MW, que é a mais próxima da unidade em estudo, tem-se:

$$CP = \text{US\$}4,669.00$$

$$Cov = \text{US\$}340,00/\text{hora}$$

Supondo-se que o montante de reserva é igual à capacidade de geração da unidade, ou seja, a geração mínima é nula, obtém-se em valores unitários (\$/MWh) para cada hora, a partir de (3.40):

$$Ci_Res_{ij} = \frac{4669,00 \cdot 3,00}{200 \cdot 16} + \frac{340,00 \cdot 3,00}{200} = 9,48$$

Como não há custo de oportunidade, a remuneração será feita por (4.6). Assim:

$$Re_Res_{ij} = 9,48 + Be_Res_{ij}$$

As remunerações finais deste caso são mostradas na Tabela 6.18. Como se observa, a programação de reserva anterior foi alterada, adotando-se um período contínuo de 16 horas, o que seria mais indicado, para se evitarem diversas partidas e paradas da unidade, em um único dia.

Tabela 6.18 - Remunerações da Unidade Térmica - Caso 03.j

HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)	HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)
01	9,84	0	0	13	13,52	200	2436,00
02	9,84	0	0	14	13,52	200	2436,00
03	9,84	0	0	15	13,52	200	2436,00
04	9,84	0	0	16	13,52	200	2436,00
05	9,84	0	0	17	13,52	200	2436,00
06	9,84	200	1968,00	18	22,92	200	4584,00
07	9,84	200	1968,00	19	22,92	200	4584,00
08	12,18	200	2436,00	20	22,92	200	4584,00
09	13,52	200	2436,00	21	22,92	200	4584,00
10	13,52	200	2436,00	22	13,52	0	0
11	13,52	200	2436,00	23	13,52	0	0
12	13,52	200	2436,00	24	13,52	0	0

b. Parcialmente despachada

Para a unidade térmica será adotada também a hipótese de que a unidade geradora tenha sido despachada em 80% da sua capacidade nominal.

- Caso 03.k - sem redução de geração

Nesta hipótese, não existe custo de oportunidade e nem custos específicos, o que a torna análoga ao caso 03.c da Unidade Hidráulica. As remunerações serão apenas aquelas referentes ao benefício agregado pelo serviço, vistos na Tabela 6.10. As remunerações finais são dadas na tabela Tabela 6.19.

Tabela 6.19 - Remunerações da Unidade Térmica - Caso 03.k

HORA	Re_Res _{pj} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	BE_Res _{pj} (R\$)	HORA	Re_Res _{pj} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	BE_Res _{pj} (R\$)
01	0,36	0	0	13	2,70	160	432,00
02	0,36	0	0	14	2,70	160	432,00
03	0,36	0	0	15	2,70	160	432,00
04	0,36	0	0	16	2,70	160	432,00
05	0,36	0	0	17	2,70	160	432,00
06	0,36	0	0	18	13,44	160	2150,40
07	0,36	0	0	19	13,44	160	2150,40
08	2,70	0	0	20	13,44	160	2150,40
09	2,70	0	0	21	13,44	160	2150,40
10	2,70	0	0	22	2,70	0	0
11	2,70	0	0	23	2,70	0	0
12	2,70	160	432,00	24	2,70	0	0

- Caso 03.l - Com redução da geração (*constrained down*) - usina 'velha'

Será considerada uma redução de 100 MW na geração inicialmente despachada da unidade geradora, a título de reserva.

Nesse caso, só estará presente o custo de oportunidade. Comparando-se o valor do custo de oportunidade (Tabela 6.11) com as remunerações do benefício (Tabela 6.10), vê-se que:

$$Be_Res_{ij} > Opt_{ij} ,$$

para o patamar de carga pesada, valendo assim, também para este caso (4.6).

Para os patamares de carga média e leve, tem-se:

$$Be_Res_{ij} < Opt_{ij} ,$$

sendo a unidade remunerada por (4.8), sendo assim válida aqui também a equação (6.55). As remunerações finais estão na Tabela 6.20.

Tabela 6.20 - Remunerações da Unidade Térmica - Caso 03.I

HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)	HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)
01	9,15	0	0	13	9,15	100	915,00
02	9,15	0	0	14	9,15	100	915,00
03	9,15	0	0	15	9,15	100	915,00
04	9,15	0	0	16	9,15	100	915,00
05	9,15	0	0	17	9,15	100	915,00
06	9,15	0	0	18	13,44	100	1344,00
07	9,15	0	0	19	13,44	100	1344,00
08	9,15	0	0	20	13,44	100	1344,00
09	9,15	0	0	21	13,44	100	1344,00
10	9,15	0	0	22	9,15	0	0
11	9,15	0	0	23	9,15	0	0
12	9,15	100	915,00	24	9,15	0	0

- Caso 03.m - Com redução da geração - usina 'nova'

Será considerada também uma redução de 100 MW na geração inicialmente despachada da unidade geradora, a título de reserva.

Agora tem-se:

$$Be_Res_{pj} < Opt_{pj}$$

e a unidade será remunerada por (4.8).

Considerando-se $CI_Res_{pj} = 0$, é válida ainda (6.55), encontrando-se as remunerações relativas a este caso na Tabela 6.21.

Tabela 6.21 - Remunerações da Unidade Térmica - Caso 03.m

HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)	HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)
01	61,74	0	0	13	61,74	100	6174,00
02	61,74	0	0	14	61,74	100	6174,00
03	61,74	0	0	15	61,74	100	6174,00
04	61,74	0	0	16	61,74	100	6174,00
05	61,74	0	0	17	61,74	100	6174,00
06	61,74	0	0	18	61,74	100	6174,00
07	61,74	0	0	19	61,74	100	6851,00
08	61,74	0	0	20	61,74	100	6174,00
09	61,74	0	0	21	61,74	100	6174,00
10	61,74	0	0	22	61,74	0	0
11	61,74	0	0	23	61,74	0	0
12	61,74	100	6174,00	24	61,74	0	0

- Caso 03.n - Com redução da geração - considerando o preço da energia dos contratos iniciais

Será considerada uma redução de 100 MW n a geração inicialmente despachada da unidade geradora, a título de reserva.

Este caso é análogo ao caso 03.m, mudando apenas o valor do custo de oportunidade. As remunerações finais estão na Tabela 6.22.

Tabela 6.22 - Remunerações da Unidade Térmica - Caso 03.n

HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)	HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RCf (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)
01	30,48	0	0	13	30,48	100	3048,00
02	30,48	0	0	14	30,48	100	3048,00
03	30,48	0	0	15	30,48	100	3048,00
04	30,48	0	0	16	30,48	100	3048,00
05	30,48	0	0	17	30,48	100	3048,00
06	30,48	0	0	18	30,48	100	3048,00
07	30,48	0	0	19	30,48	100	3048,00
08	30,48	0	0	20	30,48	100	3048,00
09	30,48	0	0	21	30,48	100	3048,00
10	30,48	0	0	22	30,48	0	0
11	30,48	0	0	23	30,48	0	0
12	30,48	100	3048,00	24	30,48	0	0

c. Totalmente Despachada

Supondo-se que houve uma redução de 100 MW na geração inicialmente despachada (200MW), as remunerações pelas reservas para confiabilidade, nesse caso, são idênticas às dos casos 03.l, 03.m e 03.n. Desta forma:

- Caso 03.o - unidade 'velha' - remunerações finais na Tabela 6.20;
- Caso 03.p - unidade 'nova' - remunerações finais na Tabela 6.21, e
- Caso 03.q - preço da energia dos contratos iniciais - remunerações finais na Tabela 6.22.

6.4.2 Usinas ou Unidades Geradoras Participantes da Regulação de Frequência (Reservas e Serviço)

A regulação de frequência é feita por unidades despachadas, geralmente hidráulicas no caso do sistema elétrico brasileiro, que necessitam gerar abaixo da sua capacidade, para que este serviço possa ser efetuado. Assim é, geralmente, um caso típico de unidades que seriam plena ou parcialmente despachadas, mas que têm a sua geração reduzida, já analisado nas Seções 6.4.1.1-b, 6.4.1.1-c, 6.4.1.2-b e 6.4.1.2-c. A diferença básica é que

a regulação de frequência, além, da remuneração pela reserva utilizada, levando em consideração o tempo de regulação 'para cima' (frequência abaixo do normal) é remunerada ainda pelo serviço. Na Tabela 6.8, referente ao estudo de caso 02, é determinada a remuneração da regulação de frequência no sistema elétrico brasileiro, considerando-se dados reais de frequência do dia 20/11/2003. Estes valores serão utilizados no cálculo da remuneração da regulação de frequência, considerando-se os custos incorridos.

Os valores da remuneração unitária do benefício da regulação de frequência (reserva e serviço), mostradas na Tabela 6.23, são determinados por (6.48) a (6.50), o que equivale a dividir os valores da sexta coluna pelos valores da terceira coluna da Tabela 6.8.

Tabela 6.23 - Remuneração Unitária do Benefício da Regulação de Frequência

HORA	Be_Reg _{ij} (R\$/MWh)	HORA	Be_Reg _{ij} (R\$/MWh)
01	1,12	13	4,43
02	0,81	14	5,96
03	0,73	15	6,56
04	0,55	16	6,69
05	0,95	17	5,68
06	0,77	18	20,57
07	1,28	19	20,10
08	6,96	20	20,35
09	6,58	21	21,28
10	4,84	22	4,92
11	4,85	23	4,68
12	4,68	24	5,56

Adotando-se a hipótese de que os custos envolvidos na regulação de frequência são representados apenas pelo custo de oportunidade, serão analisados os três casos a seguir, supondo-se que as unidades sejam *constrained down*.

6.4.2.1 Unidade Hidráulica 'Velha'

Nesse caso, da Tabela 6.11:

$$Opt_{ij} = 4,90 \text{ R\$/MW}$$

Comparando este valor com os valores da Tabela 6.5. vê-se que $Opt_{ij} > Re_Reg_{ij}$, em algumas horas analisadas, sendo que nestas horas, a remuneração deve ser feita pelo custo de oportunidade e não pela remuneração unitária do benefício, ou seja, segundo (6.55). As remunerações são dadas na Tabela 6.24, sendo destacadas aquelas feitas pelo custo de oportunidade.

Tabela 6.24 - Remuneração da Regulação de Frequência - Unidade Hidráulica 'Velha'

HORA	Re_Reg _{ij} (R\$/MWh)	RRg (MWh)	RE_Reg _{ij} (R\$)	HORA	Re_Reg _{ij} (R\$/MWh)	RRg (MWh)	RE_Reg _{ij} (R\$)
01	4,90	180	838,80	13	4,90	140	754,60
02	4,90	180	838,80	14	5,96	140	1097,60
03	4,90	180	982,80	15	6,56	140	1024,80
04	4,90	180	1155,60	16	6,69	140	652,40
05	4,90	180	1157,40	17	5,68	140	652,40
06	4,90	180	1179,00	18	20,57	120	721,20
07	4,90	180	882,00	19	20,10	120	976,80
08	6,96	140	1135,40	20	20,35	120	1148,40
09	6,58	140	931,00	21	21,28	120	1063,20
10	4,90	140	967,40	22	4,92	160	745,60
11	4,90	140	961,80	23	4,90	160	745,60
12	4,90	140	611,80	24	5,56	160	745,60

6.4.2.2 Unidade Hidráulica 'Nova'

Nesse caso, da Tabela 6.11, vem:

$$Opt_{ij} = 111,84 \text{ R\$/MW}$$

Agora, vê-se que $Opt_{ij} > Re_Reg_{ij}$, em todos os casos, devendo a remuneração ser feita pelo custo de oportunidade, para todas as horas, como se vê na Tabela 6.25.

Tabela 6.25 - Remuneração da Regulação de Frequência - Unidade Hidráulica 'Nova'

HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RRg (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)	HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RRg (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)
01	111,84	180	20131,20	13	111,84	140	15657,60
02	111,84	180	20131,20	14	111,84	140	15657,60
03	111,84	180	20131,20	15	111,84	140	15657,60
04	111,84	180	20131,20	16	111,84	140	15657,60
05	111,84	180	20131,20	17	111,84	140	15657,60
06	111,84	180	20131,20	18	111,84	120	13384,80
07	111,84	180	20131,20	19	111,84	120	13384,80
08	111,84	140	15657,60	20	111,84	120	13384,80
09	111,84	140	15657,60	21	111,84	120	13384,80
10	111,84	140	15657,60	22	111,84	160	17894,40
11	111,84	140	15657,60	23	111,84	160	17894,40
12	111,84	140	15657,60	24	111,84	160	17894,40

6.4.2.3 Unidade hidráulica - Considerando os Preços dos Contratos Iniciais

O custo de oportunidade é nesse caso, da Tabela 6.11:

$$Opt_{ij} = 22,26 \text{ R\$/MW}$$

Neste caso, $Opt_{ij} > Re_Reg_{ij}$, também em todas as horas. As remunerações devem ser feitas pelo custo de oportunidade, para todas as horas, sendo apresentadas na Tabela 6.26.

Tabela 6.26 - Remuneração da Regulação de Frequência - Unidade Hidráulica
Considerando os Preços dos Contratos Iniciais.

HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RRg (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)	HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RRg (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)
01	22,26	180	4006,80	13	22,26	140	3116,40
02	22,26	180	4006,80	14	22,26	140	3116,40
03	22,26	180	4006,80	15	22,26	140	3116,40
04	22,26	180	4006,80	16	22,26	140	3116,40
05	22,26	180	4006,80	17	22,26	140	3116,40
06	22,26	180	4006,80	18	22,26	120	2671,20
07	22,26	180	4006,80	19	22,26	120	2671,20
08	22,26	140	3116,40	20	22,26	120	2671,20
09	22,26	140	3116,40	21	22,26	120	2671,20
10	22,26	140	3116,40	22	22,26	140	3116,40
11	22,26	140	3116,40	23	22,26	140	3116,40
12	22,26	140	3116,40	24	22,26	140	3116,40

6.4.2.4 Unidade hidráulica - Sem Restrição de Geração

Caso não haja restrição na geração da unidade prestadora do serviço, as remunerações passam a ser aquelas da Tabela 6.27, para os três casos anteriores.

Tabela 6.27 - Remuneração da Regulação de Frequência - Unidade Hidráulica
sem Restrição da Geração

HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RRg (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)	HORA	Re_Res _{ij} (R\$/MWh)	RRg (MWh)	RE_Res _{ij} (R\$)
01	1,12	180	201,60	13	4,43	140	620,20
02	0,81	180	145,80	14	5,96	140	834,40
03	0,73	180	131,40	15	6,56	140	918,40
04	0,55	180	99,00	16	6,69	140	936,60
05	0,95	180	171,00	17	5,68	140	795,20
06	0,77	180	138,60	18	20,57	120	2468,40
07	1,28	180	230,40	19	20,10	120	2412,00
08	6,96	140	974,40	20	20,35	120	2442,00
09	6,58	140	921,20	21	21,28	120	2553,60
10	4,84	140	677,60	22	4,92	160	787,20
11	4,85	140	679,00	23	4,68	160	748,80
12	4,68	140	655,20	24	5,56	160	889,60

6.5 Comentários e Conclusões

Os resultados obtidos no segundo estudo de caso desenvolvido neste capítulo mostram que o valor médio da remuneração horária do serviço de regulação de frequência foi de R\$197,56/h. Considerando que as médias horárias de reservas para regulação nos 10 dias em que foi feito o estudo, sejam aquelas dadas na Tabela 6.8, a remuneração unitária média do serviço de regulação é de R\$1,40/MWh, resultado que também se mostra coerente com a média dos valores praticados nos EUA, apresentados na Tabela 5.15. A remuneração final unitária média da regulação de frequência (incluindo as reservas de regulação), foi de R\$9,23/MWh.

Como o nível médio de reservas para regulação observado foi de 3,212% da demanda do sistema, conforme mostra a Tabela 6.3, o impacto financeiro médio sobre a carga, neste caso, seria de R\$0,00030/kWh (0,030 centavos de R\$ por kWh de energia consumida),. Sob a mesma hipótese considerada na Seção 5.7, ou seja, da reserva ser fornecida apenas por usinas hidráulicas novas, o impacto sobre a carga seria de R\$0,0040/kWh (0,40 centavos de R\$ por kWh de energia consumida).

Considerando-se concomitantemente as duas remunerações, das reservas de confiabilidade, calculada na Seção 5.7 (R\$0,0040/kWh) e da regulação de frequência, o impacto sobre os consumidores, de R\$0,00824/kWh (0,824 centavos de R\$ por kWh de energia consumida) continuaria ainda aceitável, não significando ônus excessivo e permanecendo menor que o encargo de capacidade emergencial. Além disto, a reserva de potência operativa total adotada seria de 6,712% da demanda, mais alta do que a que se exige atualmente no sistema elétrico brasileiro, por exemplo.

Reforça-se desta forma a consistência da política de remuneração das reserva operativas defendida, pois consegue-se com ela remunerar, além de todo o montante de reservas requerido pelo sistema elétrico, o serviço de regulação de frequência, mantendo-se um baixo impacto financeiro sobre o custo da energia elétrica para os consumidores.