



**Operador Nacional
do Sistema Elétrico**

Submódulo 23.5

Critérios para estudos hidrológicos

Rev. Nº.	Motivo da revisão	Data de aprovação pelo ONS	Data e instrumento de aprovação pela ANEEL
0.0	Este documento foi motivado pela criação do Operador Nacional do Sistema Elétrico.	23/07/2001	25/03/2002 Resolução nº 140/02
0.1	Atendimento à Resolução Normativa ANEEL nº 115, de 29 de novembro de 2004.	10/10/2005	25/09/2007 Resolução Autorizativa nº 1051/07
1.0	Versão decorrente da Audiência Pública nº 049/2008, submetida para aprovação em caráter definitivo pela ANEEL.	17/06/2009	05/08/2009 Resolução Normativa nº 372/09
2.0	Versão decorrente da Audiência Pública nº 002/2011.	01/12/2010	09/11/2011 Resolução Normativa nº 461/11

Assunto	Submódulo	Revisão	Data de Vigência
CRITÉRIOS PARA ESTUDOS HIDROLÓGICOS	23.5	2.0	11/11/2011

1 INTRODUÇÃO	3
2 OBJETIVO	3
3 ALTERAÇÕES DESTA REVISÃO	3
4 CRITÉRIOS	3
4.1 PARA O SUBMÓDULO 9.2 E O SUBMÓDULO 25.2	3
4.2 PARA O SUBMÓDULO 9.3	9
4.3 PARA O SUBMÓDULO 9.5	10

Assunto	Submódulo	Revisão	Data de Vigência
CRITÉRIOS PARA ESTUDOS HIDROLÓGICOS	23.5	2.0	11/11/2011

1 INTRODUÇÃO

1.1 Os estudos hidrológicos para o desenvolvimento das atividades relacionadas ao Módulo 9 *Recursos hídricos e meteorologia* e ao Submódulo 25.2 *Apuração de dados* devem ser elaborados de acordo com critérios preestabelecidos, a fim de garantir a transparência e a reprodutibilidade dos processos envolvidos. Esses critérios estão apresentados neste submódulo, organizados sob o título do submódulo no qual são mencionados.

1.2 Os agentes de geração considerados neste submódulo são aqueles detentores, por concessão ou autorização, de usinas classificadas nas modalidades de operação como Tipo I – Programação e despacho centralizados, conforme critérios e sistemática estabelecidos no Módulo 26 *Modalidade de operação de usinas*.

1.3 O módulo e submódulos aqui mencionados são:

- (a) Submódulo 9.2 *Acompanhamento, análise e tratamento dos dados hidroenergéticos do Sistema Interligado Nacional*;
- (b) Submódulo 9.3 *Planejamento Anual de Prevenção de Cheias*;
- (c) Submódulo 9.5 *Previsão de vazões e geração de cenários de aflúncias*;
- (d) Submódulo 25.2 *Apuração de dados*; e
- (e) Módulo 26 *Modalidade de operação de usinas*.

2 OBJETIVO

2.1 O objetivo deste submódulo é estabelecer os critérios a serem adotados no desenvolvimento dos estudos hidrológicos em conformidade com os procedimentos descritos no Módulo 9 e no Submódulo 25.2.

3 ALTERAÇÕES DESTA REVISÃO

3.1 Exclusão do item 4.2.1, renumeração dos itens subseqüentes e alteração dos itens 4.2.3.5 e 4.2.4.1 decorrente da criação do novo critério de classificação hidrológica a partir de padrões climáticos.

4 CRITÉRIOS

4.1 Para o Submódulo 9.2 e o Submódulo 25.2

4.1.1 Critérios para consistências diárias de primeiro e de segundo níveis (Submódulo 25.2) e para consolidação semanal (Submódulo 9.2) dos dados hidráulicos

4.1.1.1 Os dados hidráulicos informados pelos agentes de geração devem passar pelos seguintes critérios de análise de consistência em base diária:

- (a) o nível de água do reservatório deve estar entre os valores de nível de água mínimo e máximo operativo;

Assunto	Submódulo	Revisão	Data de Vigência
CRITÉRIOS PARA ESTUDOS HIDROLÓGICOS	23.5	2.0	11/11/2011

- (b) a taxa de variação diária do nível de água do reservatório deve estar dentro de uma faixa predefinida para cada reservatório;
- (c) o nível de água do canal de fuga, bem como as vazões defluentes, turbinadas, vertidas, transferidas e de outras estruturas, devem estar dentro de faixas normais predefinidas para cada aproveitamento;
- (d) a vazão turbinada deve ser compatível com a geração do aproveitamento; e
- (e) a vazão afluyente deve ser compatível com o valor calculado por meio do método de balanço hídrico do reservatório, com o uso da seguinte expressão:

$$Q_{afl} = Q_{def} + Q_{tra} + \Delta V / 86.400$$

onde:

Q_{afl} = vazão afluyente ao reservatório (m^3/s).

Q_{def} = vazão defluente total (soma das vazões turbinada, vertida e de outras estruturas) do reservatório (m^3/s). A vazão de outras estruturas é a vazão restituída ao rio a jusante do aproveitamento, através de estruturas hidráulicas diversas, como eclusas, escadas de peixe e descargas de fundo, quando utilizada com objetivo diferente de controle de níveis e cheias.

Q_{tra} = vazão transferida ou recebida de outro reservatório, por meio de canal, túnel, estação de bombeamento etc. (m^3/s).

ΔV = variação diária do volume acumulado, obtida a partir da tabela cota-volume do reservatório (m^3).

4.1.1.2 A consistência de segundo nível e a consolidação semanal dos dados hidráulicos diários devem abranger, ainda, os seguintes aspectos:

- (a) Cálculo da vazão da bacia incremental relativa a cada aproveitamento (vazão natural incremental), com o uso da seguinte expressão:

$$Q_{inc} = Q_{afl} - Q_{defmp} + Q_{uso} + Q_{evp}$$

onde:

Q_{inc} = vazão natural incremental, entre o aproveitamento e o(s) aproveitamento(s) de montante (m^3/s).

Q_{afl} = vazão afluyente ao reservatório, obtida de (1) (m^3/s).

Q_{defmp} = vazão defluente do(s) reservatório(s) de montante, devidamente propagada em condição de reservatório (m^3/s).

Q_{uso} = vazão relativa aos usos consuntivos da bacia incremental (m^3/s).

Q_{evp} = vazão relativa à evaporação do reservatório, obtida a partir do polinômio Cota x Área e do vetor mensal de evaporação líquida do reservatório (m^3/s).

- (b) Tratamento (consistência) das vazões naturais incrementais, com vistas à eliminação ou minimização da ocorrência e da magnitude de valores negativos e à suavização das grandes oscilações de vazões incompatíveis com a natureza da bacia. Esse tratamento deve ser feito a partir de uma ou mais das seguintes metodologias:

- (i) médias móveis;
- (ii) modulação a partir de hidrogramas de vazões observados em estações fluviométricas existentes na bacia incremental ou em regiões próximas; e

Assunto	Submódulo	Revisão	Data de Vigência
CRITÉRIOS PARA ESTUDOS HIDROLÓGICOS	23.5	2.0	11/11/2011

- (iii) cálculo a partir da vazão afluyente adotada com base em curvas referenciais de cota e afluência, estabelecidas conforme metodologia específica para cada reservatório.
- (c) Propagação das vazões defluentes dos aproveitamentos de montante, em condições de reservatório, e propagação das vazões naturais dos aproveitamentos de montante, em condições naturais, a partir de uma ou mais das seguintes metodologias:
 - (i) defasagem das vazões, considerando o tempo de viagem da água entre os aproveitamentos em horas;
 - (ii) propagação hidrológica, como a utilizada no método de Muskingum; e
 - (iii) propagação hidráulica, como a utilizada em modelos hidrodinâmicos.

4.1.1.3 As metodologias utilizadas para as consistências diárias de primeiro e segundo níveis e para a consolidação semanal dos dados hidráulicos são definidas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, em conjunto com os agentes de geração.

4.1.2 Critérios para a obtenção das vazões naturais (Submódulos 9.2 e 25.2)

4.1.2.1 A vazão natural de cada aproveitamento deve ser obtida a partir do uso da seguinte expressão:

$$Q_{nat} = Q_{natp} + Q_{inc\ con}$$

onde:

Q_{nat} = vazão natural no local do aproveitamento (m^3/s).

Q_{natp} = vazão natural do(s) reservatório(s) de montante, devidamente propagada em condição natural (m^3/s).

$Q_{inc\ con}$ = vazão natural incremental consistida, entre o aproveitamento e o(s) aproveitamento(s) de montante, após aplicação de um dos tratamentos mencionados no item 4.1.1.2 deste submódulo (m^3/s).

4.1.3 Critérios para o cálculo da energia natural afluyente e da energia armazenada (Submódulo 9.2)

4.1.3.1 A Energia Natural Afluyente – ENA é calculada a partir das vazões naturais e das produtibilidades equivalentes ao armazenamento de 65% do volume útil dos reservatórios dos aproveitamentos hidroelétricos. A ENA pode ser calculada em base diária, semanal, mensal ou anual e, também, por bacia e por subsistema, de acordo com os sistemas de aproveitamentos hidroelétricos existentes nas configurações de bacias hidrográficas e de subsistemas elétricos, com o uso das seguintes expressões:

$$ENA_{BACIA}(t) = \sum_{i=1}^n (Q_{nat}(i,t) \cdot p(i))$$

$$ENA_{SUBSISTEMA}(t) = \sum_{j=1}^m (Q_{nat}(j,t) \cdot p(j))$$

onde,

t = intervalo de tempo de cálculo da ENA;

Assunto	Submódulo	Revisão	Data de Vigência
CRITÉRIOS PARA ESTUDOS HIDROLÓGICOS	23.5	2.0	11/11/2011

i = aproveitamento pertencente ao sistema de aproveitamentos da bacia considerada;

n = número de aproveitamentos existentes no sistema de aproveitamentos da bacia considerada;

Q_{nat} = vazão natural do aproveitamento no intervalo de tempo considerado;

p = produtividade média do conjunto turbina-gerador do aproveitamento hidrelétrico, referente à queda obtida pela diferença entre o nível de montante, correspondente a um armazenamento de 65% do volume útil, e o nível médio do canal de fuga.

j = aproveitamento pertencente ao sistema de aproveitamentos do subsistema considerado;

m = número de aproveitamentos existentes no sistema de aproveitamentos do subsistema considerado

4.1.3.2 A Energia Armazenada – EAR é calculada a partir dos volumes armazenados nos reservatórios e das produtibilidades dos aproveitamentos hidroelétricos. O cálculo é realizado por bacia e por subsistema e leva em consideração os desvios de água para reservatórios e aproveitamentos da mesma bacia ou de outras, por meio de canais, túneis, estações de bombeamento etc.

4.1.3.3 Para a obtenção da EAR de cada bacia, são utilizadas as seguintes expressões:

$$EAR\%_{Bacia} = \frac{EAR_{Bacia}}{EAR\max_{Bacia}}$$

$$EAR_{Bacia} = \sum_{i=1}^n (EAR_i)$$

$$EAR\max_{Bacia} = \sum_{i=1}^n (EAR\max_i)$$

onde,

$EAR\%_{Bacia}$ = energia armazenada na bacia considerada (%).

EAR_{Bacia} = energia armazenada na bacia considerada (MWmed).

$EAR\max_{Bacia}$ = energia armazenada máxima na bacia considerada (MWmed).

EAR = energia associada ao volume armazenado no reservatório, em um período de um mês, considerando a produtividade na própria usina e em todas as usinas a jusante da bacia considerada, descontando-se o volume morto (MWmed).

$EAR\max$ = energia associada ao máximo de água armazenada no reservatório, em um período de um mês, considerando a produtividade na própria usina e em todas as usinas a jusante da bacia considerada, descontando-se o volume morto (MWmed).

i = aproveitamento pertencente à bacia considerada.

n = número de aproveitamentos existentes na bacia considerada.

Assunto	Submódulo	Revisão	Data de Vigência
CRITÉRIOS PARA ESTUDOS HIDROLÓGICOS	23.5	2.0	11/11/2011

Os valores de EAR e EAR_{max} são obtidos a partir das seguintes expressões:

$$EAR_i = \left(\frac{V_i - V_{min_i}}{2,6298} \right) \times \left(PRODeq_i + \sum_{j=1}^m (PRODeq_j) \right)$$

$$EAR_{max_i} = \left(\frac{V_{max_i} - V_{min_i}}{2,6298} \right) \times \left(PRODeq_{max_i} + \sum_{j=1}^m (PRODeq_{max_j}) \right)$$

onde,

V = volume acumulado no reservatório (hm^3).

V_{min} = volume mínimo normal do reservatório (hm^3).

V_{max} = volume máximo normal do reservatório (hm^3).

$PRODeq$ = produtividade equivalente do aproveitamento hidrelétrico ($MW/m^3/s$).

$PRODeq_{max}$ = produtividade equivalente máxima do aproveitamento hidrelétrico ($MW/m^3/s$).

i = aproveitamento considerado.

j = aproveitamento existente a jusante do aproveitamento considerado.

m = número de aproveitamentos existentes a jusante do aproveitamento considerado.

Os valores de $PRODeq$ e $PRODeq_{max}$ são obtidos a partir das seguintes expressões:

$$PRODeq_i = (PRODesp_i) \times (Heq_i)$$

$$PRODeq_{max_i} = (PRODesp_i) \times (Heq_{max_i})$$

onde,

$PRODesp$ = produtividade específica do aproveitamento hidrelétrico ($MW/m^3/s/m$).

Heq = queda líquida equivalente (m).

Heq_{max} = máxima queda líquida equivalente (m).

Os valores de Heq e Heq_{max} são obtidos a partir das seguintes expressões:

– Se a regularização proporcionada pelo reservatório for mensal:

$$Heq_i = (CotaGeo_i) - (CFugamed_i) - (Perdas_i)$$

$$Heq_{max_i} = (CotaGeo_{max_i}) - (CFugamed_i) - (Perdas_i)$$

– Se a regularização proporcionada pelo reservatório for semanal ou diária:

Assunto	Submódulo	Revisão	Data de Vigência
CRITÉRIOS PARA ESTUDOS HIDROLÓGICOS	23.5	2.0	11/11/2011

$$Heq_i = Heq_{\max_i} = (Cotaref_i) - (CFugamed_i) - (Perdas_i)$$

onde,

$CotaGeo$ = cota geométrica equivalente do aproveitamento (m).

$CFugamed$ = nível médio do canal de fuga do aproveitamento (m).

$Perdas$ = perda de carga hidráulica média do aproveitamento (m).

$CotaGeo_{\max}$ = máxima cota geométrica equivalente do aproveitamento (m).

$Cotaref$ = cota de referência do reservatório (m).

Os valores de $CotaGeo$, $CotaGeo_{\max}$ e $Cotaref$ são obtidos a partir das seguintes expressões:

$$CotaGeo_i = \left(\frac{1}{V_i - V_{\min_i}} \right) \times \left(\frac{a_i}{5} \cdot (V_i^5 - V_{\min_i}^5) + \frac{b_i}{4} \cdot (V_i^4 - V_{\min_i}^4) + \frac{c_i}{3} \cdot (V_i^3 - V_{\min_i}^3) + \frac{d_i}{2} \cdot (V_i^2 - V_{\min_i}^2) + e_i \cdot (V_i - V_{\min_i}) \right)$$

$$CotaGeo_{\max_i} = \left(\frac{a_i}{5} \cdot (V_{\max_i}^5 - V_{\min_i}^5) + \frac{b_i}{4} \cdot (V_{\max_i}^4 - V_{\min_i}^4) + \frac{c_i}{3} \cdot (V_{\max_i}^3 - V_{\min_i}^3) + \frac{d_i}{2} \cdot (V_{\max_i}^2 - V_{\min_i}^2) + e_i \cdot (V_{\max_i} - V_{\min_i}) \right) \times \left(\frac{1}{V_{\max_i} - V_{\min_i}} \right)$$

$$Cotaref_i = (a_i \cdot Vref_i^4 + b_i \cdot Vref_i^3 + c_i \cdot Vref_i^2 + d_i \cdot Vref_i + e_i)$$

As seguintes variáveis são obtidas conforme Submódulo 9.7 *Atualização de Dados Técnicos dos Aproveitamentos Hidrelétricos*:

V_{\min_i} = volume mínimo normal do reservatório (hm³).

V_{\max_i} = volume máximo normal do reservatório (hm³).

$PRODesp_i$ = produtividade específica do aproveitamento hidrelétrico (MW/m³/s/m).

$CFugamed_i$ = nível médio do canal de fuga do aproveitamento (m).

$Perdas_i$ = perda de carga hidráulica média do aproveitamento (m).

a_i, b_i, c_i, d_i, e_i = coeficientes do polinômio cota-volume do reservatório.

$Vref_i$ = volume de referência do reservatório (hm³).

4.1.3.4 Os cálculos para obtenção da EAR de cada subsistema são análogos aos efetuados para as bacias, levando em consideração que a energia produzida pela água armazenada em alguns reservatórios, como Três Marias e Serra da Mesa, é distribuída em dois subsistemas.

Assunto	Submódulo	Revisão	Data de Vigência
CRITÉRIOS PARA ESTUDOS HIDROLÓGICOS	23.5	2.0	11/11/2011

4.2 Para o Submódulo 9.3

4.2.1 Critérios para análise de consistência das séries sintéticas de vazões diárias

4.2.1.1 As séries sintéticas de vazões incrementais diárias geradas, correspondentes aos cenários hidrológicos, são analisadas a fim de se buscar a sua consistência em relação às séries históricas, de acordo com critérios apresentados a seguir. Entre parênteses, estão os valores de referência para um ajuste ótimo.

- (a) Probabilidade de a média da vazão diária da série sintética ser superior à da série histórica (0,5);
- (b) probabilidade de o desvio padrão da vazão diária da série sintética ser superior ao da série histórica (0,5);
- (c) probabilidade de a média do volume de espera anual da série sintética ser superior à da série histórica (0,5);
- (d) probabilidade de o desvio padrão do volume de espera anual da série sintética ser superior ao da série histórica (0,5);
- (e) probabilidade de a distância multivariada da média e de o desvio padrão do volume de espera anual da série sintética serem superiores aos das séries históricas (1,0); e
- (f) teste de Smirnov para os volumes de espera anuais das séries sintética e histórica (aceitação com nível de significância de 10%).

4.2.2 Critérios para o cálculo dos volumes de espera em sistemas de reservatórios

4.2.2.1 Os volumes de espera são calculados, para cada cenário hidrológico, pela utilização de séries sintéticas de vazões naturais incrementais médias diárias, quando estas se apresentam consistentes. Em caso contrário, utilizam-se séries históricas de vazões naturais incrementais médias diárias.

4.2.2.2 Quando se utilizam as séries sintéticas de vazões, os volumes de espera resultantes representam valores mínimos a serem adotados no conjunto de reservatórios integrantes do sistema. Quando esse sistema é constituído por um único reservatório, o volume de espera resultante representa exatamente o volume a ser adotado nesse reservatório.

4.2.2.3 Quando se utilizam séries históricas de vazões, os volumes de espera resultantes representam exatamente os volumes a serem adotados nos reservatórios do sistema.

4.2.2.4 Em ambos os casos, quando não existir um reservatório imediatamente a montante do local da restrição de vazão máxima, define-se um reservatório fictício e os volumes de espera resultantes são distribuídos entre os reservatórios do sistema, localizados a montante desse local, levando-se em conta:

- (a) distribuição proporcional ao fator de contribuição das vazões em cada local de reservatório, em relação ao local para o qual foi calculado o volume de espera;
- (b) capacidade para a alocação de volume de espera;
- (c) efetividade para o controle de cheias nos locais de restrição de vazão máxima; e
- (d) impactos energéticos decorrentes.

4.2.2.5 Os volumes de espera resultantes estão relacionados aos cenários hidrológicos, conforme o item 6.3.4 do submódulo 9.3, uma vez que foram utilizadas séries de vazões associadas a estes cenários. O cenário hidrológico de tendência climática a ser adotado em cada

Assunto	Submódulo	Revisão	Data de Vigência
CRITÉRIOS PARA ESTUDOS HIDROLÓGICOS	23.5	2.0	11/11/2011

sistema de reservatórios durante o período de controle de cheias é definido por ocasião da elaboração das regras para operação de controle de cheias, em conformidade com o estabelecido no Submódulo 9.4.

4.2.3 Critérios para a avaliação dos impactos energéticos das alternativas de volumes de espera

4.2.3.1 A partir das alternativas de volumes de espera para todos os reservatórios dos sistemas de reservatórios para controle de cheias, definidas conforme os critérios estabelecidos no item 6.3.4 do submódulo 9.3, e da alternativa de não alocação de volumes de espera, os impactos na operação eletroenergética são avaliados utilizando-se os modelos de avaliação energética, em conformidade com aqueles estabelecidos no Módulo 18. Nessa avaliação, para todas as alternativas estudadas, são obtidos das simulações resultados, tais como:

- (a) risco de déficit;
- (b) custo marginal de operação;
- (c) probabilidade de reenchimento dos subsistemas ou reservatórios ao final do período de controle de cheias;
- (d) vertimentos realizados.

4.3 Para o Submódulo 9.5

4.3.1 Critérios para análise de consistência e consolidação das vazões naturais médias diárias previstas

4.3.1.1 As vazões naturais médias diárias previstas pelos agentes de geração e pelo ONS são analisadas com base nos seguintes critérios de consistência:

- (a) inexistência de valores negativos de vazões naturais incrementais médias diárias;
- (b) inexistência de incompatibilidade entre, por um lado, as previsões de vazões naturais médias diárias e, por outro, os valores de vazões observadas e os valores de previsões de precipitação na área incremental da bacia hidrográfica; e
- (c) inexistência de incompatibilidade nas parcelas relativas às vazões de uso consuntivo e de evaporação líquida que foram adicionadas às vazões previstas.

4.3.1.2 Caso as vazões naturais médias diárias previstas pelos agentes de geração apresentem inconsistência, o ONS interagirá com esses agentes a fim de consolidar essas informações.

4.3.1.3 Com base na análise de consistência das vazões naturais médias diárias previstas, o ONS consolida os valores a serem adotados.

4.3.2 Critério para a estimação das vazões naturais médias de semana ou de mês incompletos

4.3.2.1 As vazões naturais afluentes médias de semana ou de mês incompletos são estimadas, para aproveitamentos hidroelétricos, pelo critério da média proporcional entre os valores de vazões naturais médias diárias verificadas no período já decorrido e os valores de vazões naturais médias diárias previstas para os dias restantes da semana ou do mês. A proporção representativa de cada período é definida pelo número de dias de cada período tanto para período com valores verificados quanto para período com valores previstos. A seguir, é apresentada a expressão do cálculo da estimação das vazões naturais médias:

Assunto	Submódulo	Revisão	Data de Vigência
CRITÉRIOS PARA ESTUDOS HIDROLÓGICOS	23.5	2.0	11/11/2011

$$QN(i, t) = \frac{\{[\sum_{d=1}^n (QN_{VERIF}(i, d))] + [\sum_{d=n+1}^m (QN_{PREV}(i, d))]\}}{m}$$

onde:

i = identificação do aproveitamento hidroelétrico para o qual está sendo estimada a vazão natural média de semana ou mês incompleto;

t = identificação da semana ou mês para o qual está sendo estimada a vazão natural média;

d = identificação do dia pertencente à semana ou ao mês considerado;

n = número de dias com valores de vazões naturais já verificadas;

m = número de dias do período considerado (semana – 7; mês – 28 ou 29 ou 30 ou 31);

QN_{VERIF} = vazão natural média diária verificada em aproveitamento hidroelétrico; e

QN_{PREV} = vazão natural média diária prevista em aproveitamento hidroelétrico.