

ANÁLISE DE CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DO FATOR DE CAPACIDADE EM ESTUDOS DE INVENTÁRIO HIDRELÉTRICO

Afonso Henriques Moreira Santos¹, Benedito Claudio da Silva², Adriana Santos Peixoto³ & Thiago Roberto Batista⁴

RESUMO - O Estudo de Inventário Hidrelétrico de um rio ou bacia hidrográfica é um instrumento de planejamento do Setor Elétrico, que atualmente é baseado no manual de Inventários. Porém os critérios de dimensionamento energético apresentados no manual são restritos a condições particulares das bacias hidrográficas da região Sudeste, objeto dos grandes estudos de inventário na década de 60. Neste contexto, este artigo vem apresentar uma metodologia de dimensionamento do fator de capacidade que permite dimensionar corretamente aproveitamentos hidroelétricos de acordo com as características hidrológicas da região em estudo.

ABSTRACT – The Watershed Hydropower Inventory Study is a planning tool of the Electric Sector for defining the energy potential of a particular river or river basin. This article arose from the need to evaluate the capacity factors based on the hydrology of sites with energetic potential. In more regulated hydrology this potential is lower than in those with typical hydrology, while less regulated hydrology presents higher values. This way such atypical hydrology require corrections. It should be noted that the proposed analysis has orientative character in the initial evaluation of the energy dimensioning criterion in the planning phase of inventory studies based on the specific characteristics of the watershed under study. Other criteria such as the need to serve the local market, among others, may influence the criterion definition for dimensioning the Potential Hydroelectric object of hydroelectric inventory studies, and should be considered.

Palavras-Chave: Fator de Capacidade, Hidrologia, Regularização

¹ Professor da UNIFEI. Av. BPS, 1303 – Itajubá / MG. 37500-000. afonsohms@gmail.com

² Professor da UNIFEI. Av. BPS, 1303 – Itajubá / MG. 37500-000. benedito.silva@ixconsult.com.br

³ Msc. Energia. Rua Cel. Joaquim Francisco, 341 – Itajubá/MG. 37500-000. adriana.peixoto@ixconsult.com.br

⁴ Engenheiro Hídrico. Rua Cel. Joaquim Francisco, 341 – Itajubá/MG. 37500-000. thiago.batista@ixconsult.com.br

1 – INTRODUÇÃO

O Estudo de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas é um instrumento de planejamento do Setor Elétrico para definição do potencial energético de um determinado rio ou bacia hidrográfica cuja metodologia foi sendo atualizada desde os estudos da CANAMBRA na década de 60 até a elaboração do Manual de Inventários elaborado pela ELETROBRÁS/ANEEL de novembro de 1997. Na última atualização deste manual foi contemplada a introdução das variáveis ambientais e de usos múltiplos da água como critério para definição da melhor alternativa de partição de quedas CEPEL/ANEEL (2007).

Porém, a partir de sua publicação não houve nenhuma atualização dos critérios de dimensionamento energético para definição da potência estimada a ser instalada nos aproveitamentos hidrelétricos, principalmente no tocante a aproveitamentos de pequeno porte (PCH's). Estes critérios foram instituídos considerando-se a realidade das bacias hidrográficas da região Sudeste, objeto dos grandes estudos de inventário na década de 60. Com a necessidade da ampliação do parque de geração hidráulica, a partir da década de 80 os estudos alcançaram as regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste, que possuem bacias hidrográficas diferenciadas quanto aos aspectos geológicos e, conseqüentemente, hidrológicos, devendo portanto ser objeto de critérios de dimensionamento energético que considerem tais especificidades.

O fator de capacidade (FC) das UHE's, nas décadas passadas, girava por volta de 55%. A razão deste valor é que o sistema era pequeno e quase que só hidrelétrico, e, por isto, as UHE's deveriam acompanhar as curvas diárias de carga.

A evolução do sistema interligado, com diversificação dos tipos de geração, combinada com a evolução das cargas, tirou das UHE's a referida incumbência. Do ponto de vista regulatório e de mercado, as centrais não têm sinal econômico apropriado, no post de carga máxima, para promover uma motorização adequada, visando atender a ponta.

Ao contrário, isto levaria a maiores custos de conexão e transporte, trazendo pouco benefício pela energia liquidada na CCEE neste posto de carga pesada. Assim, notadamente nas AHE's, os FC's que viabilizam as centrais tem se mostrado maiores que os históricos.

Além do mais, as centrais de mais baixa queda têm seus custos fortemente influenciados pela potência instalada, posto o custo dos equipamentos representar a maior parte do investimento. Nesses casos, é comum encontrar FC's superiores a 70%.

Nos itens seguintes são apresentados alguns métodos usados para definição do FC de aproveitamentos, em estudos de inventário hidrelétrico. São descritos os métodos usualmente empregados no setor, além de outros critérios que têm sido testados com sucesso em estudos recentes.

2 - DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

Partindo da necessidade de se avaliar o dimensionamento energético de inventários hidrelétricos de bacias hidrográficas de forma que sejam consideradas as características hidrológicas particulares dos aproveitamentos e das bacias hidrográficas, analisam-se neste artigo algumas metodologias para determinação do fator de capacidade e por fim propõe-se uma evolução metodológica.

2.1 – MÉTODO DO FATOR DE CAPACIDADE DE REFERÊNCIA (MANUAL DE INVENTÁRIO)

2.1.1 – Fator de Capacidade de Referência (FCR)

Conforme comentado anteriormente, para garantir que a comparação dos benefícios energéticos dos projetos seja feita de forma homogênea sob o ponto de vista dos benefícios de ponta, o dimensionamento de cada projeto é feito considerando um mesmo FC. O fator de capacidade de referência representa a relação entre a soma da energia firme dos aproveitamentos do sistema de referência e a sua respectiva potência de referência. Na ausência de melhores informações usar o valor de 55%.

2.1.2 – Potência Instalada

Aplicando-se o fator de capacidade de referência à energia firme do aproveitamento (E_{fi}) quando integrado na alternativa de divisão de quedas tomada como base de dimensionamento energético, obtém-se a sua potência de referência:

$$Pr_i = \frac{E_{fi}}{FCr} \quad (1)$$

2.2 – MÉTODO DA ANÁLISE INCREMENTAL

Um dos critérios utilizados para a determinação da potência a ser instalada em uma usina hidrelétrica é a análise incremental, onde é comparado o custo incremental da energia gerada (ΔCEG) para vários incrementos de potência, com o valor estabelecido para o custo marginal de dimensionamento (CMD) (Tabela 1). Esta análise é utilizada para a determinação da potência instalada de aproveitamentos hidrelétricos em nível de projeto básico.

O custo marginal de dimensionamento é publicado no Plano Decenal de Expansão, divulgado periodicamente pelo Ministério das Minas e Energia.

Tabela 1 – Análise incremental.

Potência Instalada (MW)	Custo Total de Instalação - CT(R\$)	Energia Gerada (MWmed)	Custo Incremental da Energia Gerada - ΔCEG (R\$/MWh)
P0	CT0	E0	-
P1	CT1	E1	$\Delta CEG1$
P2	CT2	E2	$\Delta CEG2$
⋮	⋮	⋮	⋮
Pk	CTk	Ek	$\Delta CEGk$

A Tabela 1 é montada de acordo com a formulação a seguir:

$$\Delta CEG_k = \frac{\Delta CT_k \cdot FRC(i, n)}{\Delta E_k} + CO \& M \quad (2)$$

Onde:

CTk = custo total de instalação da usina para a potência instalada Pk ;

ΔCT_k = custo incremental de instalação;

ΔE_k = energia incremental

FRC (i,n) = fator de recuperação de capital para uma taxa de juros i e uma vida útil econômica do empreendimento n;

CO & M = custo de operação e manutenção, normalmente considerado como sendo um custo constante em R\$/MWh, dependendo do porte da central e do tipo de operação;

Portanto, a potência mínima a ser instalada será aquela para a qual o custo incremental da energia gerada (ΔCEG_k) for igual ou superior ao custo marginal de dimensionamento (CMD).

2.3 – MÉTODO DO ÍNDICE DE REGULARIZAÇÃO

Estudos comparativos entre características hidrológicas de empreendimentos em operação, ou em projeto básico, realizados pela LARROSA & SANTOS, demonstram a existência de uma relação direta entre a regularidade hidrológica de uma bacia e o fator de capacidade a ser aplicado no cálculo da potência de referência.

Para caracterização hidrogeológica de uma determinada bacia ou sub-bacia pode-se instituir um índice denominado índice de regularização (IR) calculado como a vazão com frequência de 95% (Q95) dividida pela vazão média de longo termo (Qmlt) em um determinado ponto em análise.

$$IR = \frac{Q_{95}}{Q_{mlt}} \quad (3)$$

A relação Q95%/QMLT demonstra a regularidade das vazões da bacia que, quanto mais próximo de 1 (um) for este valor, ou quanto mais regular for um determinado rio, menor será a potência instalada necessária para a geração de uma determinada energia.

2.1.1 – Estudo de Caso 1 (Neto, 2004)

No trabalho desenvolvido por Neto (2004) procurou-se estabelecer a regionalização do fator de capacidade de (FC) de acordo com as características hidrogeológicas da bacia hidrográfica objeto de um Estudo de Inventário Hidrelétrico, conforme se descreve a seguir.

Nesse trabalho, inicialmente, para um conjunto de aproveitamentos selecionados, realizou-se o

dimensionamento de suas potências instaladas pelo critério da Análise Incremental, considerando os seguintes parâmetros:

Custo da Potência Instalada c/ JDC	2.621	R\$/kW
Custo de O&M	7,00	R\$/MWh
Custo Marginal de Dimensionamento	36	US\$/MWh
Taxa de Juros	12%	aa
Vida Útil Econômica	50	anos

O valor do custo índice da potência instalada e o custo de O&M adotados como referência foram obtidos da nota técnica sobre cálculo do valor econômico de fontes alternativas colocada em audiência pública pelo MME.

O valor da taxa de juros adotada para efeito de dimensionamento foi de 12% e para a vida útil econômica da usina de 50 anos.

O valor de 36 US\$/MWh do custo marginal de dimensionamento foi obtido do Plano Decenal de Expansão 2003 – 2012 publicado pelo Ministério das Minas e Energia – MME, a preços de abril de 2002, quando US\$1,00 = R\$2,32.

Nas simulações energéticas não foram descontadas as vazões ecológicas visando uma uniformidade dos resultados.

Os parâmetros apresentados acima foram mantidos constantes no estudo de casos para uniformização do critério de dimensionamento. Desta forma, em uma análise de sensibilidade, pode-se avaliar os resultados obtidos com a variação destes parâmetros.

Foram escolhidos 16 aproveitamentos hidrelétricos em bacias com índices de regularização entre 20% e 93%, cobrindo portanto condições hidrogeológicas das mais diversas. Na Tabela 2 são apresentadas algumas características dos aproveitamentos escolhidos para análise.

A partir dos dados da Tabela 2, obteve-se o gráfico da Figura 1, que mostra o fator de capacidade para energia média resultante do dimensionamento da potência instalada pelo critério da Análise Incremental, ou marginal, (Método 2) em função do índice de regularização da bacia hidrográfica (IR), na qual se insere o aproveitamento hidrelétrico. No mesmo gráfico é apresentado o fator de capacidade calculado para o dimensionamento pelo critério do Manual de Inventário (Método 1).

Da Figura 1 pode-se notar que a curva do fator de capacidade resultante do dimensionamento pelo Método 2 possui um bom ajuste, enquanto a curva ajustada para os pontos gerados pelo Método 1 possui uma aderência inferior. Isto pode ser explicado pela utilização do período crítico único (junho/1949 a novembro/1956) do histórico de vazões para o dimensionamento energético de aproveitamentos hidrelétricos localizados em diferentes bacias hidrográficas.

Tabela 2 – Resultados do estudo de caso de Neto (2004).

PCH	IR	Q 95	Q MLT	Potência [MW] (1)	FC [%] (2)
1	93,0	30,0	32,2	18,1	54,9
2	73,8	23,7	32,1	30,2	55,0
3	59,9	130,0	217,1	42,7	56,1
4	53,1	23,5	44,4	3,5	61,0
5	51,9	4,2	8,1	24,8	57,9
6	50,3	4,1	8,2	9,3	58,2
7	43,9	7,3	16,6	33,5	54,3
8	41,9	1,9	4,5	9,5	65,7
9	39,0	6,8	17,3	16,2	67,6
10	37,5	1,6	4,2	3,9	57,5
11	35,7	5,6	15,7	28,0	55,1
12	33,4	8,0	24,1	36,5	47,9
13	33,2	11,3	33,9	19,0	61,2
14	28,5	0,8	2,7	14,3	49,1
15	27,1	3,1	11,4	22,5	54,6
16	19,5	5,6	28,7	27,8	52,8

(1) Calculada pela metodologia do Manual de inventário
 (2) FC - Fator de capacidade sobre energia média para potências calculada em (1)

O gráfico apresentado mostra ainda que as motorizações calculadas pelo critério do Manual de Inventário levam a um valor do fator de capacidade para energia média na ordem de 56%, enquanto o determinado pela análise marginal é crescente com o índice de regularização.

Outro resultado importante observado foi o comportamento da vazão nominal (Qnominal) resultante do dimensionamento pelo Método 2. Do gráfico da Figura 2 pode-se verificar que a vazão nominal é praticamente constante e igual à vazão média de longo termo (Qmlt) para qualquer índice de regularização. Enquanto isto a relação Qnominal/Q95 é uma função potência decrescente com o aumento do índice de regularização.

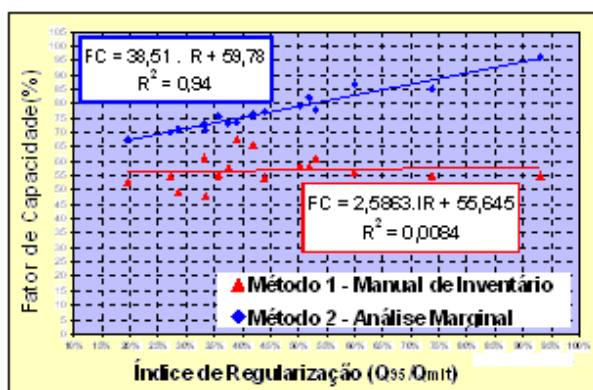


Figura 1 – Fator de capacidade em função do índice de regularização.

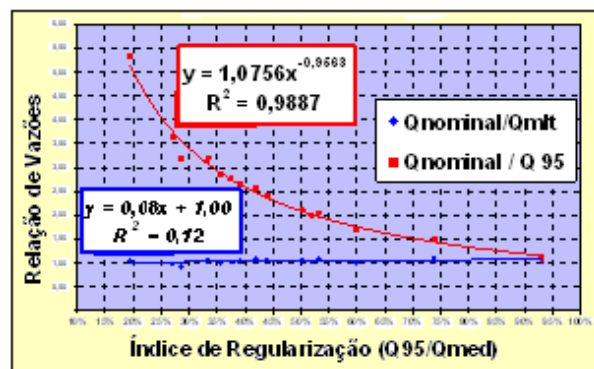


Figura 2 – Relação de vazões em função do índice de regularização.

O gráfico da Figura 3 apresenta outro parâmetro de verificação do dimensionamento energético de um aproveitamento hidrelétrico. A frequência da vazão nominal na curva de permanência de vazões afluentes decorrente da utilização do Método 2 resultou em valores em torno de 33%.

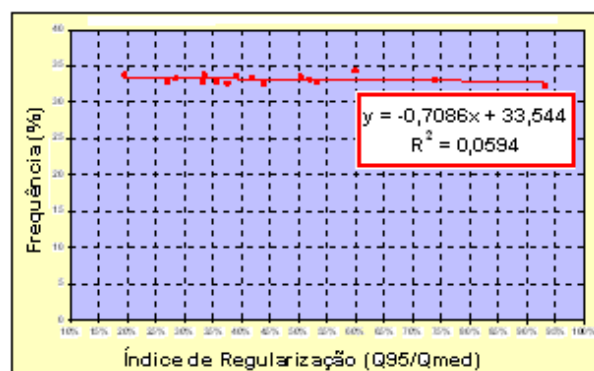


Figura 3 – Frequência da vazão nominal na curva de permanência de vazões afluentes x índice de regularização.

Uma deficiência importante detectada no ajuste realizado por Neto (2004) está no fato de que equação obtida no gráfico da Figura 1 conduz a valores muito elevado de fator de capacidade, ou seja, sempre maiores do 65% e chegando a 95%, que podem se irreais para muitos casos.

2.1.1 – Estudo de Caso 2 (LARROSA & SANTOS)

Nos estudos de Larrosa & Santos a metodologia aqui adotada o fator de capacidade é obtido a partir de uma curva onde, com o eixo das abscissas representado pelo coeficiente de regularização do rio (Q95%/QMLT) e no eixo das ordenadas, o fator de capacidade (FC), ou a razão entre o valor da energia firme do aproveitamento (Ef) e a sua potência instalada (Pi).

A curva apresentada na Figura 4 foi elaborada pela LARROSA & SANTOS a partir de informações referentes a usinas existentes, em operação, em construção e em estudo, cujos dados encontram-se disponíveis no SIPOT e na ANEEL. Considerando que a citada curva representa a situação real dos empreendimentos brasileiros, os fatores de capacidade (FC) obtidos revestem-se de inegável realidade.

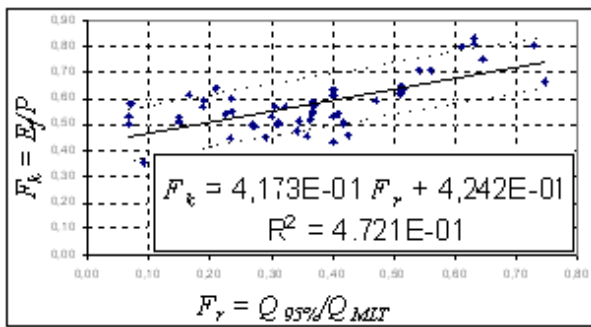


Figura 4 – Equação de determinação do fator de capacidade (FC) aplicada a estudos de inventário hidrelétrico.

A equação em questão, além de permitir a introdução da variável hidrológica na escolha do valor do fator de capacidade, proporciona um benefício econômico à determinação da potência instalada, valorizando o benefício energético inerente às bacias.

Certamente, os potenciais dos empreendimentos estudados poderiam vir a serem penalizados, caso fosse adotado um valor simplificado de fator de capacidade (0,55), o que poderia conduzir a uma super ou sub motorização dos mesmos.

A metodologia foi aplicada para diversos aproveitamentos do estudo de inventário de uma bacia hidrográfica. Nos rios ou trechos de rios onde o fator de capacidade calculado ficou menor que 0,55 foi adotado o recomendado pelo Manual de Inventário da Eletrobrás (0,55), nos que tiveram fator maior que 0,55 foi adotado o fator de capacidade calculado pela equação obtida na Figura 4.

2.4 – MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

O último método apresentado possui semelhança com os métodos baseados no índice de regularização, uma vez que se apóia no estabelecimento de equações de regressão de estudos e projetos anteriores. Porém, procura-se utilizar variáveis explicativas que levem em consideração o regime de vazões do rio e as características principais do aproveitamento. Dessa forma, avalia-se o dimensionamento do aproveitamento através da simulação energética com as vazões afluentes, variando-se a vazão de projeto, e através de uma equação empírica que considere sua queda bruta e sua potência instalada. Assim o ponto de coincidência entre os dois critérios é adotado como a condição ótima de dimensionamento.

2.4.1 – Simulação Energética

A energia gerada para cada potência instalada é determinada pela simulação energética da usina considerando-se os parâmetros básicos do aproveitamento hidrelétrico para o histórico de vazões médias mensais considerado.

No caso de PCH's a energia gerada utilizada como benefício energético é a energia média calculada para o histórico de vazões disponíveis por esta ser a energia considerada para determinação da energia

assegurada da usina, conforme Resolução ANEEL N° 169 de 03/05/2001.

Os parâmetros básicos dos aproveitamentos hidrelétricos são:

Hb = queda bruta, calculada como a diferença dos níveis operacionais de montante e jusante;

HI = queda bruta menos a perda de carga no circuito hidráulico de adução;

η_t = rendimento da turbina;

η_g = rendimento do gerador;

Assim, para cada vazão afluente disponível (Qd), limitada pela capacidade máxima e mínima de engolimento das turbinas, estará associada uma potência gerada (Pg). A vazão disponível é a vazão afluente descontada dos usos múltiplos consuntivos mais a vazão residual, sanitária ou ecológica, deixada a jusante da barragem no caso de arranjos do tipo desvio.

$$P_g = H_{liq} \cdot Q_d \cdot 9,81 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \quad (4)$$

Na simulação energética de PCH's pode-se admitir simplificações como a adoção de um valor constante para a queda líquida desde que não sejam significativas as variações, em função das vazões dos níveis operacionais de montante e jusante, bem como a perda de carga e o rendimento do conjunto turbina-gerador.

No caso de usinas de baixa queda as variações de níveis de montante e jusante podem influenciar sobremaneira nos resultados devendo ser consideradas nas simulações energéticas.

2.4.2 – A Equação Empírica

Adotou-se uma base de 21 AHE's, construídas ou em construção, não incluindo centrais apenas projetadas. Isto se justifica pelo viés econômico: se as centrais estão em obra ou prontas é porque são viáveis. A Tabela 3 apresenta os nomes e dados das AHE's utilizadas.

Adotou-se que o FC é uma função do produto da queda bruta (Hb), em metros, elevada a uma certa potência, pela potência instalada (P), em megawatts, elevada a outra potência. Empregando a técnica de regressão linear múltipla, encontra-se a Equação 6, com um R-quadrado de 64%.

$$FCap = 71,6 \times Hb^{-0,043} \times P^{0,039} \quad (5)$$

Tabela 3 – Disponibilidade energética dos aproveitamentos estudados.

Empreendimentos	QUEDA BRUTA (Hb)	POTÊNCIA (P)	FC
Cachoeira Grande	384,20	14,00	60,00
Cocais Grande	350,20	10,00	56,25
Ninho da Águia	263,00	13,00	66,00
São Joaquim	223,00	21,00	64,10
Carangola	161,00	15,00	69,00
São Pedro	140,90	27,00	57,00
Barra da Paciência	130,00	22,00	65,00
Fumaça	82,50	4,50	60,60
Cristina	75,50	3,50	61,65
Paraitinga	83,00	7,00	66,00
Airuoca	98,00	16,00	67,50
São Simão	96,55	27,00	60,00
Corrente Grande	78,00	14,00	62,00
Funil	73,00	22,50	65,24
Várzea Alegre	45,40	7,00	67,00
Calheiros	49,00	19,00	61,00
São Gonçalo	37,50	13,00	61,20
Montserrat	16,00	25,00	77,00
Lavrinhas	13,00	30,00	68,60
Queluz	13,00	30,00	70,30
Bonfante	11,00	19,00	74,60

2.4.3 – Procedimento de Aplicação

Com base na hidrologia e características de queda, para diferentes potências instaladas (P), calcula-se a energia gerada e o respectivo fator de capacidade, definindo-se uma função:

$$FC = f(P)$$

(6)

Tem-se, então, um sistema de duas equações: as equações 6 e 7. Os valores de P e FC, oriundos da solução desse sistema, serão os valores indicados para o inventário.

2.4.4 – Estudo de Caso

A metodologia foi aplicada a um estudo de inventário em andamento, em uma bacia na qual foram identificados 7 aproveitamentos com diferentes características. A Figura 5 apresenta a representação gráfica da identificação do fator de capacidade de referência através do método das características hidráulicas.

O gráfico da Figura 5 se refere a um aproveitamento com queda bruta de 15m, em uma seção na qual o rio possui vazão média de longo termo de aproximadamente 170m³/s. Portanto, pode ser classificada como usina de baixa queda. Conforme descrito anteriormente, o ponto de dimensionamento da usina é dados pelo encontro entre as curvas da

simulação energética e da equação empírica (Equação 6). Para esse caso, esse ponto corresponde a potência de 27,4MW e fator de capacidade de 72,5%.

O valor de fator de capacidade obtido para essa usina encontra-se de acordo com o esperado, em função da baixa queda e elevada vazão. Usinas de baixa queda são indicadas para serem dimensionadas com fator de capacidade elevado, uma vez que valores baixos implicam em turbinas hidráulicas de grandes diâmetros que, por sua vez, impacta diretamente nas dimensões da casa de força e volumes de escavação. Portanto, o valor de 72,5% pode ser considerado adequado, tendo em vista as características do aproveitamento.

Para os demais aproveitamentos a mesma metodologia foi aplicada, obtendo curvas individualizadas para cada um. Os fatores de capacidade de referência de cada um deles são apresentados na Tabela 4. A usina da Figura 5 se refere ao AHE 2, na Tabela 4. Nessa tabela se observa ainda que os demais aproveitamentos resultaram em fatores de capacidade menores, uma vez que possuem maiores quedas e menores vazões.

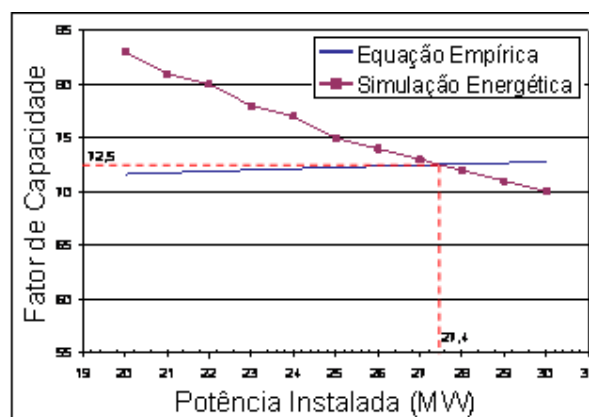


Figura 5 – Identificação do fator de capacidade de referência pelo método das características hidráulicas.

Tabela 4 – Fator de capacidade obtido a partir do método das características hidráulicas.

Aproveitamento	Queda Bruta (m)	Vazão Média (m ³ /s)	Fator de Capacidade	Potência Instalada (MW)
AHE 1	14	181,3	71,9	20,0
AHE 2	15	179,9	72,5	27,0
AHE 3	15	12,7	66,3	2,8
AHE 4	20	11,7	66,0	3,4
AHE 5	55	8,1	64,9	6,8
AHE 6	55	8,0	64,8	6,6
AHE 7	98	5,9	64,3	9,0

2.5 – CORREÇÃO DOS FATORES DE CAPACIDADE PARA HIDROLOGIAS REGULARIZADAS

O método de características hidráulicas determinou a equação empírica baseada em aproveitamentos viáveis, uma vez que os mesmos estão executados ou em fase de construção. Assume-se que tais aproveitamentos possuem um comportamento hidrológico típico por situarem na mesma região, ou seja, a relação desvio padrão por vazão média de longo termo para os mesmos resultam em valores próximos, porém em regiões com aspectos geológicos diferentes, e conseqüentemente comportamentos hidrológicos diferenciados necessita-se de ajustes nos resultados obtidos na equação empírica.

Considera-se aqui como hidrologia típica as relações com valores semelhantes as dos aproveitamentos utilizados para determinação da equação empírica, e como hidrologia atípica as que possuem regularização diferente dos mesmos.

Como forma de avaliar a regularização de um determinado curso d'água, elaborou-se outro índice de regularização (I) que relaciona o desvio padrão da série de vazões (σ) do mesmo e sua respectiva vazão média de longo termo (QMLT). Para os aproveitamentos considerados típicos o índice esta em torno de 0,50.

$$I = \frac{\sigma}{Q_{MLT}} \quad (7)$$

Em hidrologias mais regularizadas os índices possuem valores inferiores aos encontrados em hidrologias típicas, enquanto as hidrologias menos regularizadas valores superiores. Tais hidrologias atípicas necessitam portando de correções nos resultados obtidos na utilização da equação empírica.

Metodologia de correção

Conhecida uma série de vazões, estabelece-se a curva de duração das vazões da mesma (Figura 6).

A potência instalada pode ser obtida segundo a Equação 8, dada em quilowatts.

$$P_{Inst.} = \underbrace{9,81 * \eta * H_B}_{K_1} * Q_P \quad (8)$$

Considerando a parcela denominada k_1 como constante, tem-se que a potência está diretamente relacionada com a vazão de projeto.

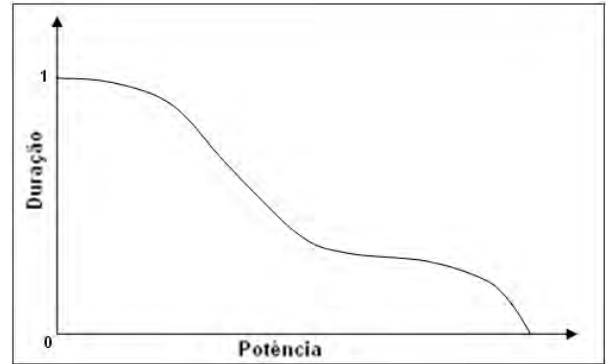


Figura 6 - Curva de duração em função da potência instalada.

Integra-se a área abaixo da curva de duração em função da potência instalada e obtêm-se a energia gerada média anual, em quilowatts-médios.

$$Eg(P_{Inst.}) = \int_0^{P_{Inst.}} K_1 * D(p) * dp \quad (9)$$

Ao derivar a energia gerada em um ponto relativo a uma potência instalada, têm-se então a duração da mesma.

$$\frac{\partial Eg}{\partial P_{Inst.}} = \frac{\partial \left[\int_0^{P_{Inst.}} D(p) * dp \right]}{\partial P_{Inst.}} = D(P_{Inst.}) \quad (10)$$

De outro lado, do ponto de vista econômico, o valor anual líquido (VAL) é igual ao benefício anual (BA) subtraído do custo anual (CA), que são funções da potência instalada,

$$VAL = BA(P_{Inst.}) - CA(P_{Inst.}) \quad (11)$$

O benefício anual (BA) é obtido pela multiplicação da energia anual gerada (Eg) pelo preço da energia (PE).

$$BA(P_{Inst.}) = Eg(P_{Inst.}) * PE \quad (12)$$

O custo anual (CA) é obtido pela multiplicação do custo índice unitário (CI), Este pode ser estimado em função do tipo de central, considerando fator de recuperação de capital (FRC), para um horizonte econômico (n) e uma taxa de desconto (i), e também pela potência instalada (Pinst.).

$$CA(P_{Inst.}) = CI * P_{Inst.} * FRC(i, n) \quad (13)$$

No ponto ótimo, tem-se que a derivada do VAL em relação à potência instalada é igual a zero.

$$\frac{\partial VAL}{\partial P} = \frac{\partial BA(P)}{\partial P} - \frac{\partial CA(P)}{\partial P} = 0 \quad (14)$$

Onde:

$$\frac{\partial BA(P)}{\partial P} = \text{Benefício Marginal} \quad (15)$$

$$\frac{\partial CA(P)}{\partial P} = \text{Custo Marginal} \quad (16)$$

Derivando os termos da equação, tem-se:

$$\frac{\partial BA(P)}{\partial P} = \frac{\partial Eg}{\partial P_{Inst.}} * PE \quad (17)$$

$$\frac{\partial CA(P)}{\partial P} = CI * FRC \quad (18)$$

Mas como :

$$\frac{\partial BA(P)}{\partial P} - \frac{\partial CA(P)}{\partial P} = 0 \quad (19)$$

Então:

$$\frac{\partial Eg}{\partial P_{Inst.}} * PE = CI * FRC \quad (20)$$

Reorganizando,

$$\frac{\partial Eg}{\partial P_{Inst.}} = \frac{CI * FRC}{PE} \quad (21)$$

Como demonstrado anteriormente tem-se também:

$$\frac{\partial Eg}{\partial P_{Inst.}} = D(P_{Inst.}) \quad (22)$$

Logo:

$$D(P_{Inst.}) = \frac{CI * FRC}{PE} \quad (23)$$

Sabendo então que as durações das vazões são diretamente influenciadas por fatores econômicos e considerando também que os fatores econômicos estão sendo analisados para um mesmo cenário, consideram-se então os mesmos constantes.

A correção baseia-se em aplicar a equação empírica de FC a uma hidrologia sintética, que será a série de vazões transposta para o sítio em estudo e que tenha um índice de regularização típico. Esta transposição se dará pela simples relação entre as vazões médias de longo termo (QMLT).

Com a série sintética, otimiza-se a potência instalada, e obtêm-se a vazão de projeto e sua respectiva duração através de um estudo energético. Esta duração encontrada define a relação econômica dada anteriormente, e pode ser aplicada a qualquer hidrologia (regularizada ou típica), indistintamente. Logo, emprega-se este valor na hidrologia real do sítio, obtendo-se a nova vazão de projeto corrigida, bem como a potência otimizada. A Figura 7 representa graficamente o processo de correção do fator de capacidade.

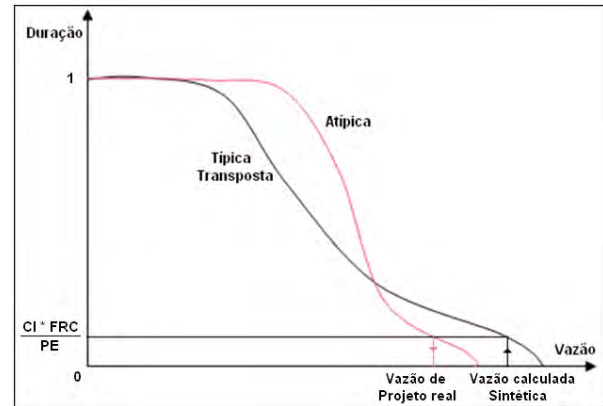


Figura 7 - Relação duração entre hidrologias de comportamento distinto.

Para esta correção do fator de capacidade consideram-se as seguintes etapas:

- Para uma série hidrológica semelhante as dos aproveitamentos utilizados para determinação da equação de FC (hidrologia típica), obtêm-se a vazão média de longo termo (QMLT);
- Determina-se em seguida a vazão média de longo termo (QMLT) do aproveitamento com hidrologia atípica;
- Através de uma transposição de vazões baseada na relação das vazões médias de longo termo, determina-se uma série sintética (Vazões transpostas), partindo-se da hidrologia típica e obtendo assim uma série que possui vazão média de longo termo igual a do aproveitamento com hidrologia atípica;
- Com esta série sintética é realizado o estudo energético para a determinação do fator de capacidade através da equação empírica, utilizando inicialmente a vazão média de longo termo e a potência característica;
- Em seguida utilizando-se uma planilha de simulação energética, recalcula-se a nova potência e a nova vazão de projeto;
- Com a nova potência, recalcula-se pela equação empírica um novo FC, retornando à etapa 4, até atingir a convergência numérica do FC;

- A partir da vazão de projeto obtida com base na série sintética, determina-se a duração da mesma;
- Para esta mesma duração, determina-se, agora na hidrologia real do sítio em estudo, a vazão de projeto correspondente (corrigida);
- Através da planilha energética, simula-se agora, com a vazão de projeto corrigida, e com a hidrologia real do sítio em estudo, determina-se o fator de capacidade final e a potência instalada final.

Cabe ainda um comentário: dentro do intervalo de confiança de 95%, pode-se adotar qualquer valor para o fator de capacidade, embora o estimador seja o dado pelo valor intermediário. Valores maiores ou menores para o FC podem ser adotados mediante posicionamento mais ou menos conservador ou arrojado, Este posicionamento deve ser tomado ao final.

2.6 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

Utilizando os mesmos aproveitamentos apresentados no estudo de caso, realizou-se uma comparação dos diferentes métodos apresentados nesse texto, a fim de se verificar as potências de dimensionamento. Foram testados o método do Manual de Inventário, que se utiliza de um fator de capacidade de referência (FCr=55%), o método do Índice de regularização, através da equação proposta por Larrosa&Barros, e o método das Características Hidráulicas, proposto por esse texto. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6, para os sete aproveitamentos identificados. O método da Análise Incremental não foi utilizado por ser usualmente empregado na elaboração de projeto básico e a correção dos fatores de capacidade não foi realizada devido os aproveitamentos possuírem hidrologia típica.

Os resultados mostram que o método do manual de inventário conduziu a uma maior potência total (soma dos 7 aproveitamentos), ou seja de 80,7 MW. No método do Índice de Regularização o total foi de 75,5 MW e para o método das características hidráulicas 75,6 MW.

A Figura 8 apresenta um resumo dos resultados. Nota-se que as maiores diferenças ocorreram para os aproveitamentos de baixa queda, AHE 1 e 2, para os quais o método das características indicou um valor menor do os demais. Nesse caso vale destacar que tais aproveitamentos são típicos de possuírem fator de capacidade mais elevado, ou seja, potência instalada menor, do que a maioria dos aproveitamentos, em razão dos custos elevados das turbinas.

Para os aproveitamentos de maior queda essa posição se inverte e o método das características indica potências maiores (Figura 8). Esse fato também pode ser considerado como esperado, uma vez que aproveitamento com maior queda tendem a requerer fatores de capacidade menores do que o valor único de referência. E quanto maior a queda, maior é a diferença

observada. Dessa forma, se verifica que o método de dimensionamento do Manual de Inventário tende a apresentar super-dimensionamento nas baixas quedas e sub-dimensionamento nas altas quedas. No exemplo estudado, a soma do total inventariado foi maior pelo método do Manual de Inventário, entretanto isso ocorreu nesse caso porque os aproveitamentos de baixa queda possuem potências significativamente maiores do que os demais.

Tabela 5 – Dimensionamento pelo manual de inventário.

Aproveitamento	Ef	Potência Instalada (MW)
AHE 1	12,9	23,5
AHE 2	16	29,1
AHE 3	1,5	2,7
AHE 4	1,9	3,5
AHE 5	3,7	6,7
AHE 6	3,6	6,5
AHE 7	4,8	8,7
Total		80,7

Tabela 6 – Dimensionamento pelo índice de regularização.

Aproveitamento	Qmlt (m³/s)	Q95 (m³/s)	IR	FCr (%)	Potência Instalada (MW)
AHE 1	181,3	63,3	0,35	0,57	22,6
AHE 2	179,9	63	0,35	0,57	28,1
AHE 3	12,7	6,05	0,48	0,62	2,4
AHE 4	11,7	5,57	0,48	0,62	3,1
AHE 5	8,1	3,88	0,48	0,62	5,9
AHE 6	8	3,79	0,47	0,62	5,8
AHE 7	5,9	2,84	0,48	0,63	7,7
Total					75,5

Tabela 7 – Dimensionamento pelo critério das características hidráulicas.

Aproveitamento	FC (%)	Potência Instalada (MW)
AHE 1	71,9	20,0
AHE 2	72,5	27,0
AHE 3	66,3	2,8
AHE 4	66,0	3,4
AHE 5	64,9	6,8
AHE 6	64,8	6,6
AHE 7	64,3	9,0
Total		75,6

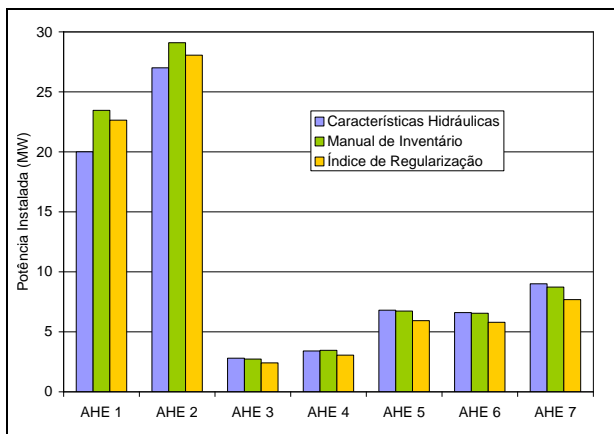


Figura 8 – Potências de dimensionamento determinadas pelos diferentes métodos.

3 – CONCLUSÕES

A análise apresentada neste artigo surgiu da necessidade de se avaliar o dimensionamento energético de inventários hidrelétricos de bacias hidrográficas de forma que sejam consideradas as características particulares dos aproveitamentos e das bacias hidrográficas, em particular os que apresentam aproveitamentos hidrelétricos com características de PCH, submetidos à análise na ANEEL.

Os resultados mostram que a metodologia apresentada no Manual de Inventários Hidrelétricos pode conduzir a resultados insatisfatórios no caso de aproveitamento com características particulares de queda muito baixa ou elevada. No caso de baixa queda ocorre uma tendência de superestimativa e no caso de alta queda tende-se a subestimar. Dessa forma, recomenda-se o emprego de métodos alternativos que levem em consideração as características particulares dos aproveitamentos, elaborados a partir das experiências de usinas construídas recentemente, em construção ou com projeto básico otimizado. Esse é o caso do método das Características Hidráulicas apresentado nesse artigo, que apresentou resultados bastante consistentes para o estudo de caso analisado.

Deve-se salientar que a análise proposta tem caráter orientativo na avaliação prévia do critério de dimensionamento energético na fase de planejamento dos estudos de inventário em função das especificidades da bacia hidrográfica em estudo. Outros critérios, tais como a necessidade de atendimento de mercado local, entre outros, podem influenciar na definição do critério de dimensionamento dos aproveitamentos hidrelétricos objeto dos estudos de inventário, e devem ser considerados.

4 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CEPEL/ANEEL – Manual de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas – Revisão 2007.

NETO, J.L.F. Avaliação do Critério de Dimensionamento Energético em Estudos de Inventários Hidrelétricos. IV Simpósio sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. Recife – PE, 12 a 22 de Setembro de 2004.

SOUZA, Z.; SANTOS, A.H.M.; BORTONI, E.C. Centrais Hidrelétricas: Estudos para Implantação. Centrais Elétricas Brasileiras S. A. – ELETROBRÁS, 1999.