

# A Análise de Viabilidade das Pequenas Centrais Hidrelétricas e o Conceito de Envolvimentos de Vazão: Uma Abordagem Estocástica dos Recursos Hídricos

Aloysio Portugal Maia Saliba, Carlos Barreira Martinez, Bruno Rabelo Versiani

Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) - Depto. de Hidráulica e Recursos Hídricos - UFMG - Av. Antônio Carlos 6627  
31270-901 Belo Horizonte, MG - Fone (31) 3499-4823 - martinez@cce.ufmg.br, versiani@ehr.ufmg.br

Recebido: 17/10/01 - revisão: 14/12/01 - aceito: 03/04/02

## RESUMO

*Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), no Brasil, são aquelas cuja potência instalada não ultrapassa 30 MW, e o seu lago tem uma área máxima de 3 km<sup>2</sup> para a cheia centenária. Devido aos custos envolvidos, o Governo Federal do Brasil incentivou a sua exploração por grupos empresariais privados.*

*Os estudos de viabilidade de PCHs tratam sobretudo da definição de uma série de vazões para determinar a vazão de 95% de permanência. O Manual de PCH (ELETROBRÁS, 2000) considera esse valor como aquele que deve ser usado a fim de avaliar a produção de energia. Assim, o mesmo tem um impacto profundo sobre o pagamento do investimento. Portanto, esta metodologia não leva em conta a variabilidade de vazões e o seu impacto sobre os estudos de viabilidade.*

*O autor sugere o uso de modelos estocásticos juntamente com estudos de viabilidade, considerando que é importante buscar simplicidade e baixos custos, e determinar as consequências da variabilidade de vazão nesses estudos. Os resultados mostram que o uso de vazões baixas a fim de reduzir a influência da sua variabilidade sobre a definição de potência, não significa estender este comportamento aos estudos de viabilidade. No estudo de caso desenvolvido, o ponto onde esse comportamento começa a exercer um efeito sobre os estudos é a vazão de 70%, muito diferente daquela sugerida pelo manual de PCH.*

**Palavras-chave:** PCH; modelos estocásticos.

## INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma nova ferramenta de análise de viabilidade econômica das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH). As PCH possuem características singulares, tanto do ponto de vista técnico quanto da legislação, que as distinguem significativamente das usinas hidrelétricas de médio e grande portes (UHE).

Considera-se como PCH a instalação cuja potência instalada não ultrapassa 30 MW, e seu lago não ultrapassa 3 km<sup>2</sup>, para a cheia centenária.

Face ao montante envolvido em sua construção, as PCH se configuram como alternativas tangíveis à auto-geração e à produção independente por parte dos grupos empresariais. Na realidade, no cenário atual de privatizações e liberalismo econômico, estas opções têm sido incentivadas pelo governo federal (Fabrizy et al., 1994).

Considera-se usualmente que as PCH sejam UHE simplificadas. Entretanto é importante

frisar que as condicionantes hidráulicas e energéticas são as mesmas para ambos os casos, obviamente respeitando-se as ordens de grandeza. Assim as simplificações admitidas são relativas as etapas de estudos hidrenergéticos, à aprovação e à forma de operação das PCH. Por motivos de ordem financeira, muitas das etapas necessárias aos estudos energéticos das UHE são efetuadas de maneira sucinta, o que não quer dizer que não haja perda de informação, mas apenas que se considera que a mesma é pouco significativa.

Este aspecto faz com que, quando do projeto de uma PCH, haja a simplificação também na etapa de estudos hidrológicos. Ora, como as PCH são em sua maioria aproveitamentos a "fio d'água", possuem reservatório com função estrita de regularização de fluxo. Assim a geração das mesmas é feita em função do regime do curso d'água onde se encontram instaladas.

No entanto, a metodologia tradicional de análise hidrológica das PCH em bacias isoladas,

principalmente no que se refere a usinas de potência reduzida, entre 1 e 5 MW, concentra-se apenas na definição de um histórico de vazões consistente e representativo do sítio em estudo para determinar, via curva de permanência, a vazão de 95% de permanência ( $Q_{95}$ ). As diretrizes para estudos e projetos de PCH (ELETROBRÁS, 2000) consideram este valor como aquele valor que gera a energia firme, sendo todo e qualquer valor de energia produzida por vazão superior a esta denominada energia secundária.

Surge, então, um problema: a energia firme e a secundária possuem valoração distinta devido às incertezas inerentes a cada uma delas. Desta forma, a definição do que é firme ou secundário influi diretamente na viabilidade econômica da central.

Outro aspecto importante é que a definição do quantil 95% para energia firme fixa o risco do empreendimento. Quando se lida com o investidor privado, o risco do empreendimento deve ser aquele que ele está disposto a correr conforme suas necessidades e estratégias de mercado. De acordo com o risco envolvido, o investidor privado pode optar por um de seguro que garanta o suprimento quando a PCH falhar.

Mas como definir este risco? Será a metodologia atual suficiente, ou é necessário utilizar ferramentas mais poderosas? Assim procurou-se desenvolver uma ferramenta em que se utilizam os métodos estocásticos e modelos de viabilidade econômica, pela simplicidade de aplicação e baixo custo envolvidos.

Desta forma surgiu a idéia de se inferir estatisticamente o risco de falha da PCH através do estudo do histórico disponível por modelos estocásticos. Em seguida, procede-se à simulação estatística do modelo ajustado, obtendo-se históricos sintéticos.

O tipo genérico de modelo estocástico aqui adotado segue a linha proposta por Box et al. (1994). Na verdade, optou-se por esta abordagem não apenas por estar consagrada pelo uso, mas também pela capacidade de englobar uma variada gama de situações. Esta abordagem é capaz, por exemplo, de englobar a análise estrutural de séries temporais, conforme proposta por Yevjevich (1982).

A geração das PCH a “fio d’água” está intimamente relacionada às vazões disponíveis. Do ponto de vista energético, a definição do intervalo de tempo entre observações a ser utilizado na análise é fundamental, uma vez que quanto menor o intervalo, mais próximo do real será o resultado da simulação e, portanto, maior a confiabilidade na contabilização da energia produzida.

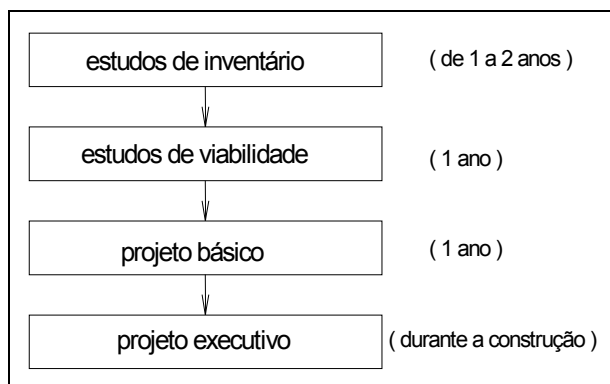


Figura 1. Etapas do projeto de uma usina hidrelétrica.

Por outro lado, a escolha de um intervalo de tempo muito pequeno, como por exemplo o diário, pode incorrer em elevado consumo computacional, bem como na super-parametrização do modelo utilizado. Estas situações limitam a aplicabilidade de qualquer metodologia ao estudo de viabilidade das PCH, seja pelo encarecimento, seja pela utilização de parâmetros estatisticamente pobres. Assim, neste trabalho procurou-se utilizar o intervalo mensal, como ponto de equilíbrio entre a confiabilidade e aplicabilidade da metodologia. Além disso, a grande maioria das PCH existentes no Brasil possuem reservatórios de regularização mensal e no mínimo semanal. Aqui as PCH que possuem reservatórios com capacidade diária e semanal normalmente são usinas de alta queda e que são utilizadas para suprimento de ponta de carga do sistema.

## OS ESTUDOS DE VIABILIDADE

As etapas do projeto de uma PCH são estudos sequenciais de planejamento e dimensionamento da central, progressivamente mais detalhados. Nos primeiros estudos, denominados estudos de viabilidade, predominam os aspectos de planejamento, enquanto nos últimos predominam os detalhes da engenharia de projetos.

As etapas do projeto de uma usina hidrelétrica são apresentadas na Figura 1.

Durante o estudo e projeto de PCH é necessário o desenvolvimento de um estudo de divisão de quedas para a definição da localização dos aproveitamentos. Tais estudos são divididos em duas fases:

- na primeira, o objetivo básico é a definição da localização do eixo de aproveitamento que possibilite a melhor solução em termos

de retorno de capital, tomando-se como condição de contorno a manutenção de uma vazão mínima;

- na segunda etapa é determinada qual a melhor alternativa do ponto de vista econômico, indicando-se para isto as respectivas taxas internas de retorno e os benefícios líquidos para cada alternativa.

Nas etapas seguintes, procede-se ao detalhamento progressivo da PCH. Estudos mais detalhados e, conseqüentemente mais caros, vão se justificar conforme aumentam-se as chances de execução da obra.

No tocante aos estudos de viabilidade, para possibilitar a definição dos parâmetros de dimensionamento de uma PCH é necessário arbitrar critérios de análise para a avaliação do empreendimento. Sant'ana (1983) apresenta uma série de critérios para nortear os estudos de viabilidade de PCH:

- mínimo índice custo/benefício;
- máximo benefício líquido;
- máximo aproveitamento energético;
- máxima taxa interna de retorno.

De forma complementar a estes critérios, devem-se considerar ainda as restrições financeiras do investidor, quer seja ele estatal ou privado.

Um aspecto importante para a contabilização energética da usina é a capacidade de regularização de seu reservatório, função das características da região, tais como o volume útil do reservatório e a curva de permanência de vazões. Com base nestas informações, a contabilização dos benefícios da geração é feita adotando-se uma curva de carga de dois patamares (Figura 2) que, apesar de não corresponder à curva de carga real, fornece uma boa aproximação para estudos preliminares. Esta análise se faz necessária, uma vez que a energia produzida em cada horário recebe valoração distinta, tendo a energia de ponta melhor valor de mercado.

Desta forma, é possível estabelecer um critério de operação da usina com um patamar na base e outro na ponta do sistema, o que evidencia a capacidade da mesma em supri-lo. A partir da carga máxima a ser atendida e da altura de queda média disponível, pode-se calcular qual a vazão necessária para se atender a ponta do sistema.

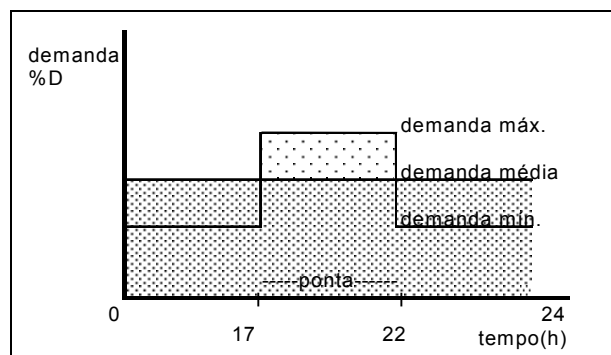


Figura 2. Simplificação do diagrama da demanda (Martinez, 1994).

## MODELOS DE ANÁLISE DE VIABILIDADE

Os estudos de viabilidade das PCH, por sua própria natureza, são processos iterativos onde procede-se à simulação do aproveitamento buscando determinar sua competitividade face às condições de mercado. Este tipo de estudo é comum para qualquer atividade econômica que se desenvolva, e normalmente é exigido pela agência financiadora no intuito de determinar qual o risco envolvido no empréstimo.

Devido as peculiaridades envolvidas no caso das PCH, desenvolveram-se modelos de análise de viabilidade automáticos. A maioria destes modelos diferem basicamente por suas premissas. A seguir discutir-se-ão alguns destes modelos evidenciando-se aquele que será adotado para efeito de estudo.

### O modelo FLASH

Na concepção e desenvolvimento do programa "FLASH" (Sant'ana, 1983), visou-se principalmente a criação de uma metodologia mais apropriada para estudos preliminares de reconhecimento e hierarquização de projetos alternativos, afim de verificar a conveniência do início ou não de um estudo formal de viabilidade de determinado projeto.

Baseando-se em dados hidrológicos, físicos e econômicos, o modelo proposto otimiza a potência instalada da usina, o tipo e o número de turbinas, e fornece elementos para a análise econômica do empreendimento. O critério de otimização pode ser escolhido dentre os seguintes:

1. geração anual de energia;

2. benefício total anual;
3. benefício líquido anual;
4. índice custo/benefício.

Desta forma, para determinado sítio, diferentes critérios podem caracterizar soluções muito diferentes. O modelo necessita dos seguintes dados de entrada:

1. curva de permanência de vazões;
2. altura de queda;
3. características e disposição das estruturas componentes do aproveitamento.

Para a avaliação dos custos do aproveitamento, desenvolveram-se funções matemáticas a partir de informações existentes em manuais, como os da ELETROBRÁS, consulta a fabricantes de equipamentos para pequenas centrais e através da definição de critérios básicos de projeto.

O programa é executado para cada aproveitamento, variando-se a potência instalada. Ao final, a solução que maximiza o critério de otimização escolhido é indicada como a melhor. A definição da maximização da função objetivo é feita através do ajuste de uma função "spline" aos pontos de cada aproveitamento, para que se proceda a escolha. Para essa alternativa são apresentados, conforme opções de saída de dados, os demonstrativos econômicos do aproveitamento escolhido.

Dentre as limitações deste modelo, citam-se (Sant'ana, 1983):

1. as curvas de custos forma desenvolvidas a partir de custos médios de concorrências e informações de fabricantes, tomados nos EUA e adaptados à realidade brasileira;
2. na escolha da potência instalada, o programa pode utilizar valores de potência nos limites da faixa de trabalho das turbinas, o que sugere a existência de pontos mais convenientes fora da faixa de aplicação;
3. pelo mesmo motivo, a melhor potência instalada pode não resultar em um valor usual em turbinas padronizadas;
4. o programa limita os tipos de turbina a cinco;
5. a geração anual de energia é avaliada através da curva de permanência, usando valores constantes de eficiência e queda. Além disso, não se considera a possibilidade de regularizar vazões, ainda que para intervalos muito curtos de tempo como o diário. Assim, cada usina deve usar a cada instante toda a vazão afluente;

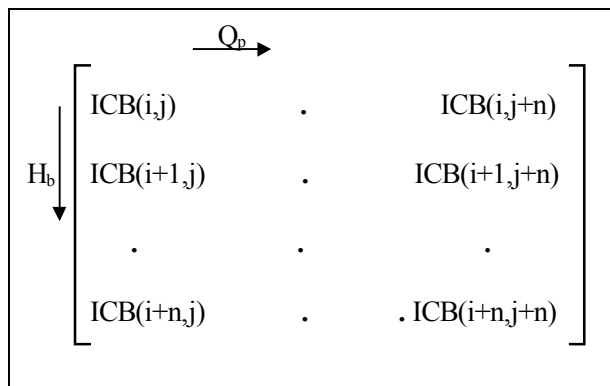


Figura 3. Exemplo da matriz gerada a partir das hipóteses descritas a seguir.

6. no caso de unidades múltiplas, o número máximo de unidades é três.

## O modelo PCH

O modelo PCH é um modelo de análise de viabilidade econômica de pequenas centrais que, através de um processo iterativo de variação das taxas de juros anuais, período de amortização e altura de queda, calcula os resultados da operação da PCH de acordo com as tarifas de energia de base e ponta fornecidas.

A avaliação da viabilidade do empreendimento está ligada ao custo da instalação. Desta forma, a estimativa inicial de custos pode ser feita mediante a metodologia proposta na literatura (Sant'ana, 1983; Martinez, 1994) e tem como objetivo permitir que se selecione um razoável número de alternativas a serem estudadas com maiores detalhes em etapas posteriores.

Esta metodologia permite a determinação dos custos e da energia gerada na usina indicando a vazão ótima de projeto, altura da barragem e o custo da energia gerada. Estes dados são fortes subsídios para estabelecer o nível de motorização da usina, além de estabelecer um cronograma de implantação das máquinas ao longo de um certo período.

Para alcançar este objetivo, executa-se a simulação das diversas usinas em estudo, variando-se a vazão de projeto ( $Q_p$ ) e a altura da barragem ( $H_b$ ) para a obtenção da matriz de índices custo-benefício (Figura 3). O benefício corresponde à energia firme de cada aproveitamento valorada pelo custo marginal de expansão do sistema local, no nível de tensão imediatamente superior ao da interligação da central com o sistema, caso toda a energia gerada pela usina for consumida em um nível de tensão não superior ao de interligação.

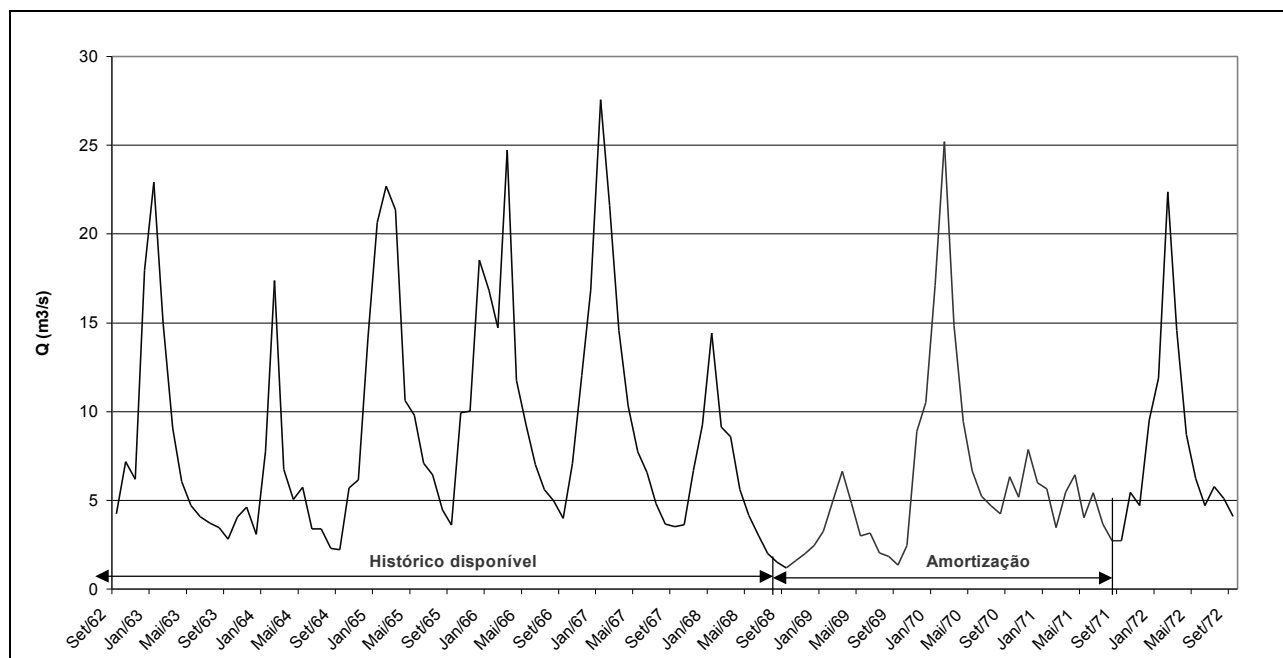


Figura 4. O problema da amortização de PCH em períodos curtos (histórico de vazões).

Uma vez gerada a matriz por aproveitamento hidrelétrico, seleciona-se a combinação vazão de projeto/altura da barragem que apresentar o melhor índice custo/benefício.

O modelo possui uma grande agilidade, o que permite a simulação do tempo de retorno máximo admissível para uma determinada tarifa de energia, e facilita a análise da competitividade das PCH, com um grau de acerto de aproximadamente 7% do custo do empreendimento, considerado elevado para este tipo de análise.

A estimativa inicial de custos é efetuada a partir do modelo proposto de simulação de custos de usinas, parametrizado a partir de um conjunto de PCH representativas do nível de tecnologia adequado a cada caso. Pode-se usar, por exemplo, o modelo proposto por Martinez (1994). A tarifa adotada como ponto de corte deste modelo é aquela regularmente utilizada pelas concessionárias locais como sendo a tarifa média equalizada. Entretanto, torna-se necessário o estudo do benefício oriundo da geração em horário de ponta.

O modelo dispõe ainda de campos para entrada de custos adicionais em US\$, conforme as necessidades de cada caso, uma vez que cada aproveitamento pode possuir características singulares como escavações de túneis, etc., cujos custos devem ser levantados pelo usuário.

Este é o modelo a ser adotado no presente trabalho por ser mais recente e por refletir as condições tecnológicas nacionais, visto que as curvas de

custos de componentes das PCH deste modelo foram obtidas a partir de um banco de dados nacional (Martinez, 1994). A única modificação ocorreu na simulação da PCH, que é feita percorrendo toda a curva de permanência, e não 100 pontos igualmente espaçados da curva de permanência.

## ENVOLTÓRIAS DE VAZÃO

No estudo de viabilidade econômica de uma PCH, e das usinas hidrelétricas em geral, é usual a utilização de um período de amortização de 30 anos, sendo que algumas concessionárias adotam um período de 50 anos, como é o caso do Departamento Municipal de Energia Elétrica de Poços de Caldas - DME (Golder, 1999).

Entretanto, devido às mudanças institucionais ocorridas na última década, alguns investidores privados tendem a reduzir este período, aproximando-os do período de análise praticado pela indústria. Ocorre que os períodos de análise praticados no Brasil variam entre 24 e 48 meses, com taxas de interesse variando de 10 a 14% ao ano. Este fato torna o empreendimento uma aposta de elevado risco, visto que a geração é dependente do regime hidrológico regional. Um ano de balanço hídrico desfavorável pode comprometer a geração e, portanto, a amortização do empreendimento.

Tomando-se como exemplo um histórico de vazões qualquer (Figura 4) e contabilizando-se a energia a ser gerada neste sítio, pode-se obter um

valor de energia médio que permitirá remunerar o capital aplicado ao longo dos anos. De acordo com a metodologia atual, a contabilização da energia gerada deve ser feita a partir da energia firme disponível. Desta maneira obtém-se o custo de energia gerada que, em última análise, irá remunerar o empreendimento.

Entretanto, se durante o início da operação da PCH houver um período de baixa afluência de vazões (Figura 4), menor que o do período crítico analisado, o bloco de energia gerada será menor e a arrecadação correspondente pode não fazer frente aos compromissos econômicos e financeiros assumidos. Desta forma, é necessário determinar qual a variabilidade, em um sentido estatístico, da curva de permanência de vazões, buscando quantificar qual o risco envolvido na motorização da PCH a partir de cada quantil de vazões.

Sugere-se que para este intuito utilizem-se modelos estocásticos. Em geral, os modelos estocásticos procuram tratar esta dependência através de suposições sobre sua natureza matemática, para ajustar um modelo cuja aplicação resulte em processos independentes. Assim o modelo utilizado supõe que os dados são embaralhados conforme um polinômio, cujo grau é a chamada ordem do modelo. Desta forma, quando a dependência se reflete em até dois intervalos posteriores, ou anteriores, independentemente do dado em si, o modelo necessário é de segunda ordem. A classe genérica deste tipo de modelo estocástico é denominada ARIMA (p, d, q), ou seja, auto-regressivo integrado de médias móveis (Box et al., 1994). Um tipo de modelo estocástico usual para o tratamento de séries mensais é o modelo ARIMA (1,0,0) x (0,1,1)<sub>12</sub>.

O modelo trata a sazonalidade do ciclo intra-anual através de uma diferenciação de ordem 12. Ao resultado da diferenciação, é ajustado um modelo de médias móveis sazonal de ordem 1, e sobre este resultado um modelo auto-regressivo de ordem 1, ou seja:

$$(1 - \phi B) \nabla^{12} \tilde{z}_t = (1 - \theta B^{12}) a_t \quad (1)$$

onde  $\phi(B)$  é o filtro auto-regressivo, ou seja, é um polinômio em B de grau p;  $\nabla^d$  um operador diferencial de grau d, ou seja, sazonalidade ( $\nabla^d$ );  $\tilde{z}_t$  o vetor que representa os dados, diminuídos de sua média e;  $a_t$  um vetor de números aleatórios independentes e normalmente distribuídos  $N(0, \sigma_a)$ .

Observe-se que a retirada da sazonalidade dos dados através da diferenciação da série é facultativa. Há inúmeros métodos e uma ampla discus-

são sobre a adequação de cada um deles a cada situação. No entanto, optou-se pelo uso da diferenciação devido à incorporação no modelo. A escolha do método de tratamento de sazonalidade deve ser feita de acordo com o processo estocástico estudado. Após o ajuste do ARIMA (1,0,0) x (0,1,1)<sub>12</sub>, obtém-se o ruído do processo, ou seja, uma variável aleatória independente. A estacionariedade do processo implica em que cada observação seja resultado da mesma VA, com parâmetros constantes no tempo.

No entanto, o modelo estocástico por si só possui variabilidade estatística em seus parâmetros. Assim, para um certo nível de confiança, cada parâmetro possui um intervalo de confiança. A variação de cada um deles neste intervalo, do ponto de vista estatístico, não terá significância no nível de confiança preestabelecido. Do ponto de vista energético, a variação destes parâmetros pode conduzir a trajetórias bastante distintas. É exatamente este ponto que, a nosso ver, fragiliza a adoção de um quantil da curva de permanência para o cálculo da energia firme, sem considerar que por maior que seja a série este quantil possui uma certa variabilidade.

Buscando quantificar esta variabilidade, propõe-se que o modelo seja invertido. Assim, a partir do ruído obtém-se a trajetória do modelo, para cada combinação de valores de parâmetros. Tal inversão pode ser obtida utilizando-se a Equação (2) a seguir:

$$\tilde{z}_t = \psi(B) a_t = \sum_{j=0}^{\infty} \psi_j a_{t-j}, \dots, \psi_0 = 1, \psi_j = 0 \dots \forall j < 0 \quad (2)$$

na qual  $\psi(B)$  é a função matemática que permite obter, partindo apenas do ruído, a variável tratada. Para cada tipo de modelo ARIMA, obtém-se uma função distinta. Pode-se mostrar que, no caso do modelo ARIMA (1,0,0) x (0,1,1)<sub>12</sub>, os coeficientes desta função são dados por:

$$\begin{cases} \psi_0 = 1 \\ \psi_j = \phi^j, \forall j = 1, \dots, 11 \\ \psi_{12} = \phi^{12} - \theta_{12} \\ \psi_j = \phi \psi_{j-1}, \forall j = 13, \dots, \infty \end{cases} \quad (3)$$

na qual  $\psi_j$  é o coeficiente de ordem j da função, ou seja, aquele que se aplica ao ruído de ordem t - j no cálculo da variável no instante t;  $\psi$  o parâmetro auto-regressivo de ordem 1, ajustado a partir dos dados. É o parâmetro que trata a dependência serial e;  $\psi_{12}$  o parâmetro de médias móveis de ordem 12, ajustado a partir dos dados. É o parâmetro que

trata a sazonalidade que restou no ruído caso a diferenciação não o faça.

Utilizando-se os pontos mínimo, médio e máximo do intervalo de confiança de cada parâmetro, obtêm-se nove combinações possíveis para a inversão do modelo. A inversão é obtida pela multiplicação dos vetores  $a_t$  e  $\psi_t$ , por:

$$\tilde{z}'_t = a_t \times \psi_t \quad (4)$$

No entanto, há um problema nas dimensões vetoriais envolvidas. Enquanto  $\psi_t$  é um vetor infinito,  $a_t$  é limitado ao tamanho da série diferenciada. Porém, o decaimento exponencial do filtro, a partir do intervalo 13, faz com que seus termos praticamente se anulem após 10 intervalos. Na inversão aqui aplicada, optou-se em utilizar o filtro de mesmo tamanho que a série, considerando 12 condições iniciais anteriores ao primeiro ponto gerado, sendo que após este intervalo os valores de  $a_t$  foram considerados nulos. A Tabela 1 mostra os passos envolvidos na inversão do modelo.

Em seguida, os valores são integrados, ou seja:

$$z_t = \tilde{z}'_t + \tilde{z}'_{t-12} \quad (5)$$

Obtém-se ao final as nove trajetórias, com cada um dos nove conjuntos possíveis de valores dos parâmetros. A partir de cada uma das trajetórias, confeccionam-se as curvas de permanência, que são denominadas envoltórias de vazão, pois assim como o intervalo de confiança, envolvem a trajetória original. A Figura 5 apresenta um exemplo destas envoltórias.

Na Tabela 1, cada conjunto marcado em negrito representa os vetores ou valores calculados. As setas representam os fatores e operações envolvidas no processo de inversão. Observe-se que, devido à diferenciação sazonal imposta aos dados, são necessárias 12 condições iniciais de vazão e 12 de ruído para a geração das novas séries. Foram adotados os mesmos valores iniciais do histórico, buscando-se utilizar a mesma disponibilidade hídrica anterior à trajetória.

Dentre estas nove trajetórias sintéticas selecionam-se a máxima e a mínima, do ponto de vista energético, para a construção das curvas de permanência a serem utilizadas no estudo energético da PCH. O que se espera é obter, ao final de todo o processo, uma espécie de intervalo de confiança para o critério de otimização da PCH, a um dado nível de confiança (Figura 5).

Tabela 1. Exemplo da inversão do modelo.

t	Q <sub>t</sub>	a <sub>t</sub>	INV_FILTRO	Q <sub>t</sub> _TRF	Q <sub>t</sub> '
1	4,83				4,83
2	3,68				3,68
3	8,95				8,95
4	13,34				13,34
5	26,58				26,58
6	29,41				29,41
7	26,76				26,76
8	23,75				23,75
9	13,92				13,92
10	11,49				11,49
11	7,96				7,96
12	5,97				5,97
13	5,24	0,2399	-0,0008	0,2399	5,24
14	6,24	1,6818	-0,0016	1,6818	6,24
15	14,42	2,8734	-0,0030	2,8734	14,42
16	13,50	-2,2465	-0,0056	-2,2465	13,50
17	19,23	-5,4127	-0,0106	-5,4127	19,23
18	26,58	1,1234	-0,0201	1,1234	26,58
19	25,67	0,4292	-0,0378	0,4292	25,67
20	16,82	-4,5581	-0,0714	-4,5581	16,82
21	15,92	4,4586	-0,1345	4,4586	15,92
22	12,20	-0,3256	-0,2537	-0,3256	12,20
23	8,66	0,2475	-0,4784	0,2475	8,66
24	6,67	0,2967	-0,9021	0,2967	6,67
25	5,12	-0,2626	0,0009	-0,1511	5,09
26	4,54	-0,3895	0,0018	-1,9875	4,25
27	3,70	-6,4907	0,0033	-10,1382	4,28
28	6,31	-1,9805	0,0063	-5,3294	8,17
29	20,36	1,4153	0,0118	3,4742	22,70
30	22,62	-3,2379	0,0222	-2,4094	24,17
31	38,54	13,0183	0,0419	11,3531	37,02
32	28,27	0,5697	0,0791	10,7045	27,53
33	16,95	-2,2791	0,1492	-0,6263	15,30
34	10,22	-2,3602	0,2812	-2,3985	9,80
35	7,39	0,0536	0,5303	-1,4418	7,22
36	5,40	-0,2901	1,0000	-1,3225	5,35

Na Figura 5 observa-se que, apesar da necessidade da adoção de um parâmetro sazonal no modelo, indicada pelos testes estatísticos, a sensibilidade das envoltórias a variação deste parâmetro foi pequena. Obtiveram-se três curvas bastante próximas tanto no caso da envoltória máxima quanto no caso da mínima.

Assim pode-se delimitar uma faixa entre as curvas superior e inferior onde se terá uma possível variação de vazões (envoltórias de vazão). Estas vazões são estatisticamente semelhantes e, se utilizadas para o cálculo de motorização da PCH, implicarão em motorizações iguais. Entretanto para uma análise de curto prazo (períodos menores que dez anos) verifica-se que se utilizarmos as envoltórias inferiores estaremos trabalhando com vazões afluentes menores, para fatores de capacidade elevados, isto significa que o risco de perda de geração

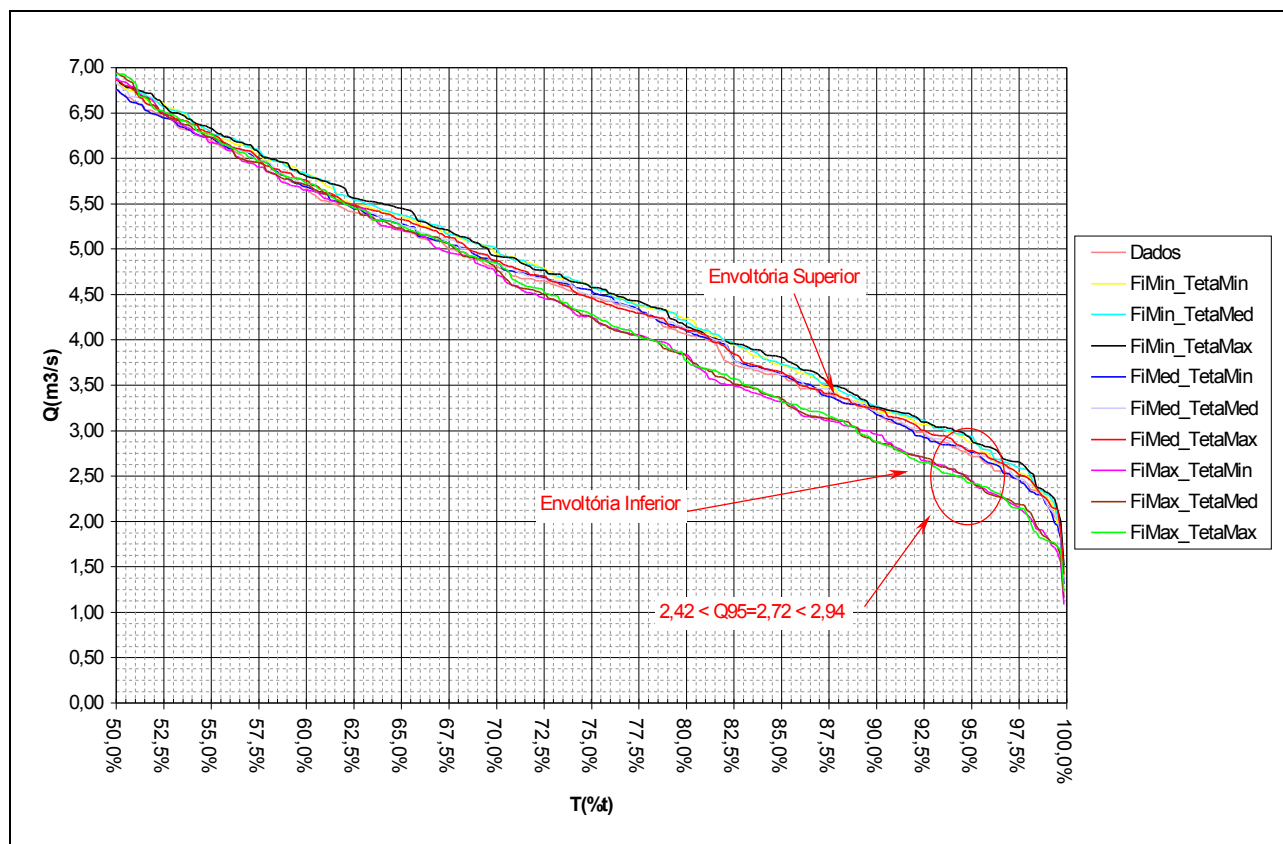


Figura 5. Envolvórias de vazão.

é maior e a possibilidade de se ter um fluxo de caixa desfavorável é alta. Este efeito não aparece quando o período de retorno é elevado e quando se tem garantia de entrega de toda energia gerada para a rede.

## ESTUDO DE CASO

Procurou-se desenvolver um estudo de caso para comparar os resultados obtidos pela aplicação da metodologia atual e aquela aqui proposta. O estudo será realizado através de um paralelo entre o estudo de viabilidade da PCH Lua de Mel, do DME – Poços de Caldas, realizado pela Golder (1999), e o mesmo estudo realizado segundo a metodologia sugerida.

Os estudos realizados pela Golder (1999) visaram selecionar o melhor arranjo técnico-econômico de aproveitamento hidrelétrico no sítio de Lua de Mel, no Rio das Antas (Rio Lambari), e foram desenvolvidos em três etapas que consistiram, primeiramente, da coleta e análise de dados de estudos anteriores, seguida do levantamento de dados em campo.

A segunda etapa consistiu de um estudo energético preliminar da cascata para a definição

dos níveis de motorizações dos aproveitamentos existentes ao longo da mesma, e também dos níveis de possíveis remotorizações das usinas já existentes, considerando as regularizações provenientes das barragem de Cipó e de Antas, a montante das demais. Foram também considerados os custos de relocação do aterro sanitário e de um trecho da rodovia Poços de Caldas – Andradas, de jurisdição do DER/MG, em função da possível implantação do reservatório da Barragem de Antas. É esta a etapa cujos resultados procuram-se comparar, conforme a utilização das metodologias supracitadas. Assim, procurou-se determinar o melhor arranjo e motorização para a PCH Lua de Mel, utilizando-se o modelo PCH e os dados físicos e hidrológicos do local onde a usina deverá ser implantada.

Por fim, caracterizando-se a terceira e última etapa, realizou-se um estudo para a definição final do arranjo básico de Lua de Mel.

## A PCH Lua de Mel

O município de Poços de Caldas, localizado na região sul do Estado de Minas Gerais, tem suas áreas urbana e rural cortadas por cursos d'água que



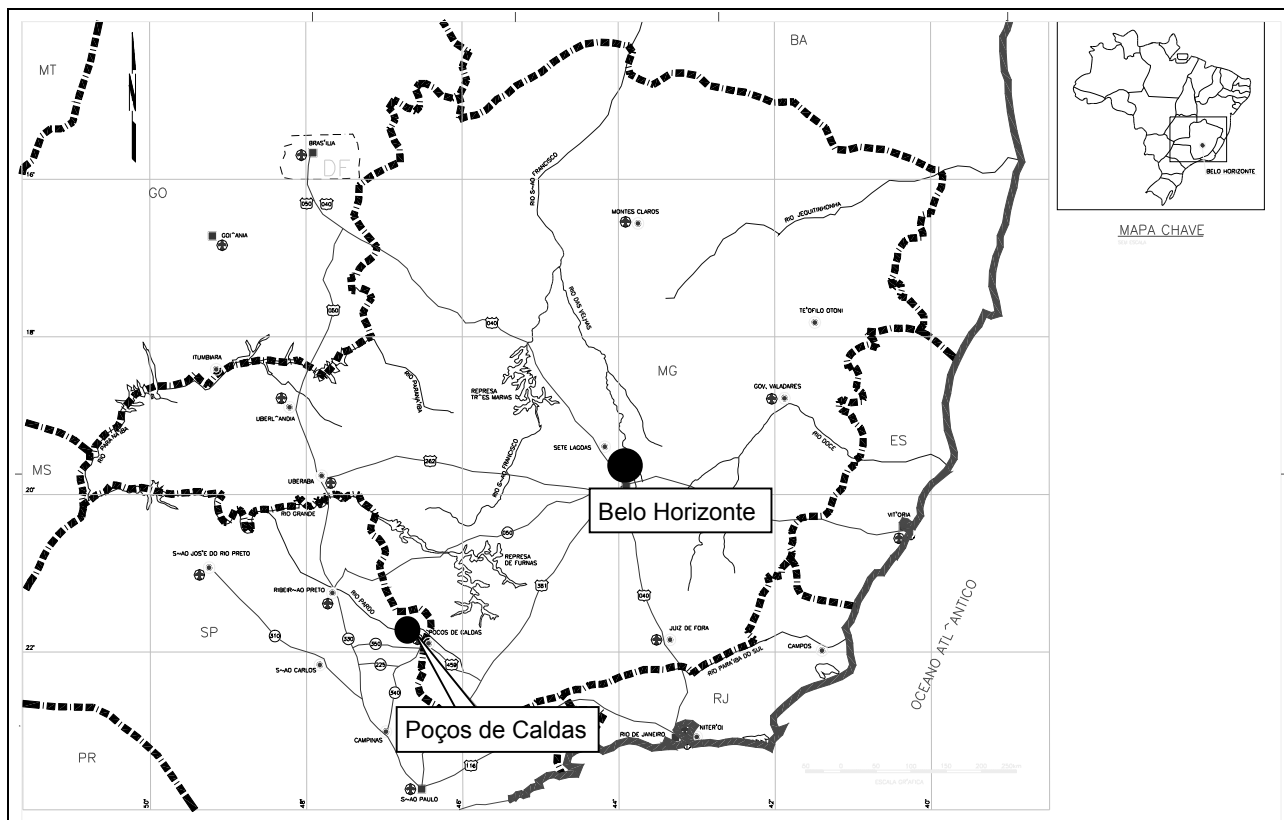


Figura 6. Mapa e localização do município de Poços de Caldas.

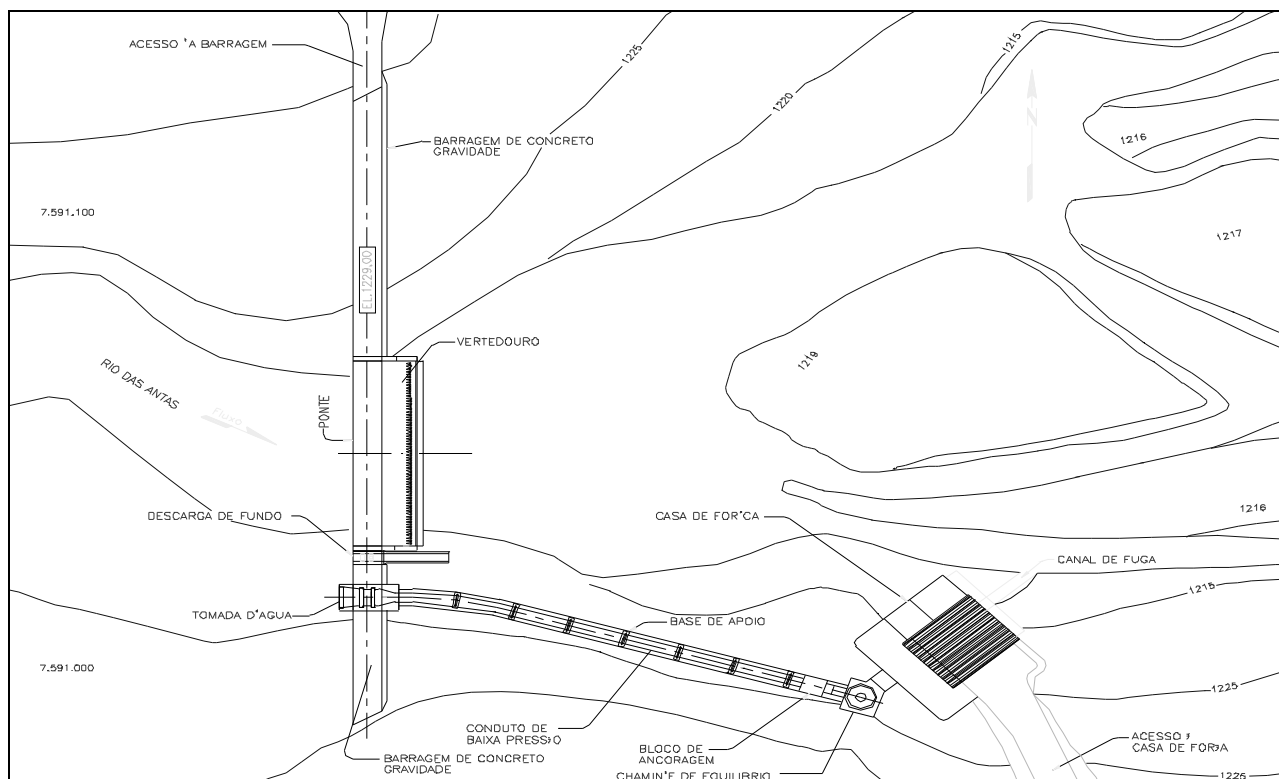


Figura 7. Arranjo básico da PCH Lua de Mel. Fonte: Golder, 1999.

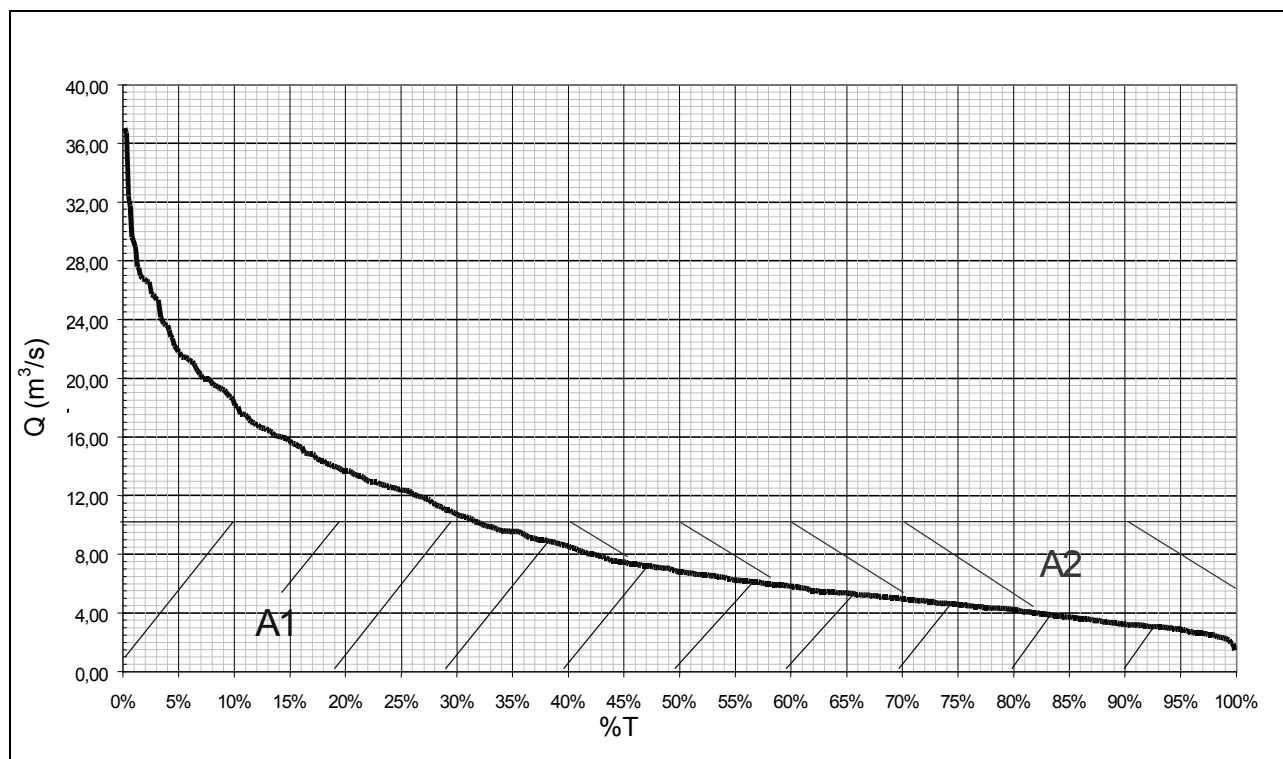


Figura 8. Curva de permanência dos dados da PCH Lua de Mel.

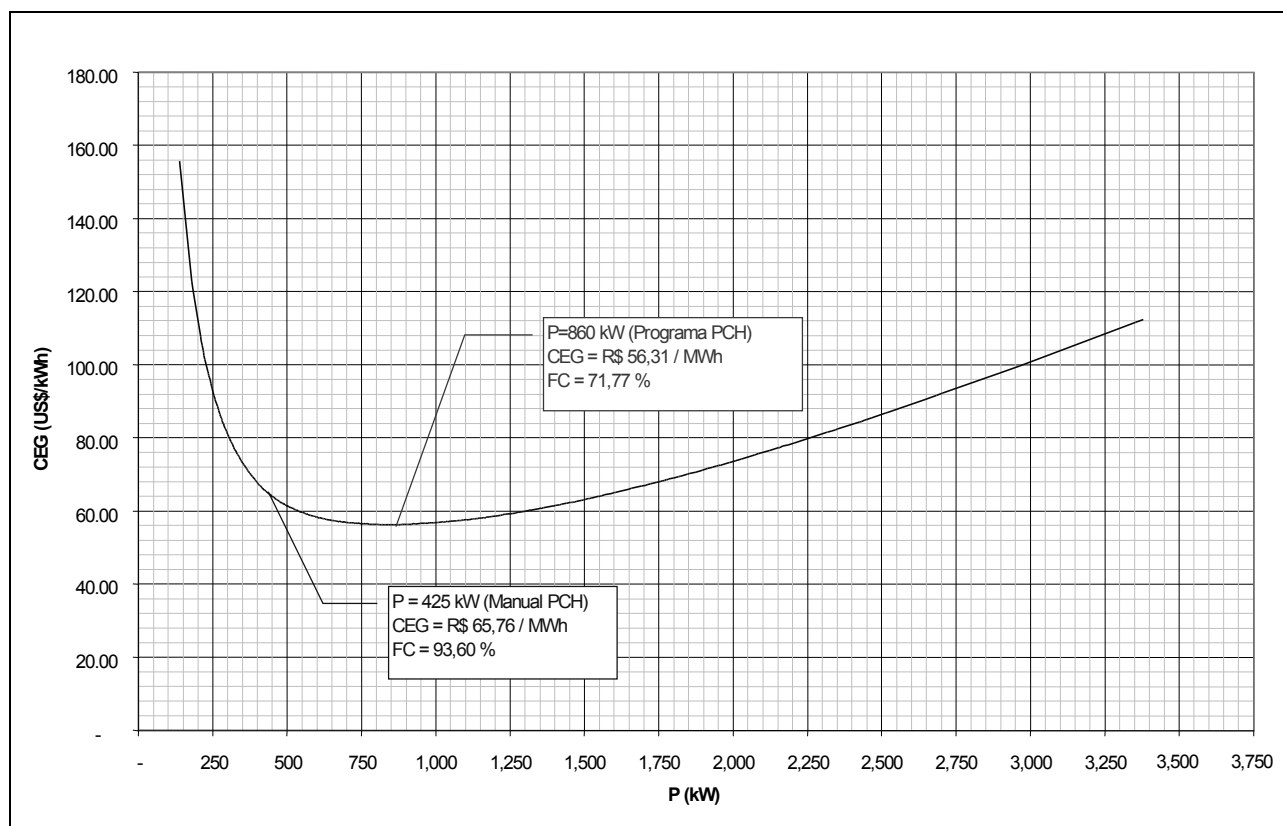


Figura 9. Resultados da simulação pela metodologia tradicional.

fazem parte da bacia hidrográfica do Rio Pardo. A PCH Lua de Mel situa-se neste município, no rio das Antas (rio Lambari), afluente do rio Pardo, localizando-se próximo à zona urbana do município, às margens da rodovia Perimetral (Golder, 1999).

Os principais cursos d'água da região do município de Poços de Caldas são rio Pardo, rio das Antas e Ribeirão do Cipó. O último é afluente do rio das Antas que por sua vez é afluente do rio Pardo. A Figura 6 apresenta o mapa e localização do município de Poços de Caldas.

O curso d'água de maior importância para o município é o rio das Antas, onde estão localizadas as usinas do DME e aproveitamentos em estudo dos quais destaca-se a PCH Lua de Mel (Golder, 1999). O arranjo geral da PCH Lua de Mel é apresentado na Figura 7.

### Revisão dos estudos hidrológicos

O histórico de vazões na PCH Lua de Mel foi obtido a partir da série de vazões médias mensais da estação fluviométrica do rio Pardo em Beira Santa Rita, no período de agosto de 1937 a setembro de 1989, através de (Golder, 1999):

$$Q = Q_{BSR} \times \frac{MLT}{MLT_{BSR}} \quad (6)$$

sendo que MLT é a média de longo termo, determinada através do produto da vazão específica média ( $q_{MLT}$ ) e da área de drenagem (A):  $MLT = q_{MLT} \times A$ ;  $MLT_{BSR}$  a média de longo termo na referida estação e;  $Q_{BSR}$  os deflúvios médios mensais na estação fluviométrica do rio Pardo em Beira Santa Rita, no período de agosto de 1937 a setembro de 1989.

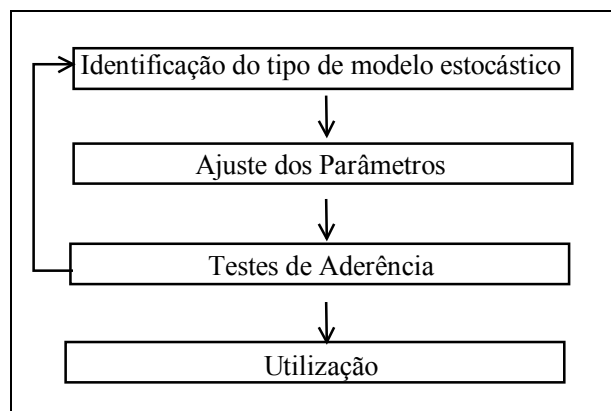
Neste estudo, obteve-se  $q_{MLT} = 23 \text{ l/s.km}^2$  e  $MLT = 8,34 \text{ m}^3/\text{s}$  (Golder, 1999). A Figura 8 apresenta a curva de permanência de vazões construída a partir dos dados mensais da PCH Lua de Mel. Para a definição da vazão de desvio utilizou-se o tempo de retorno de 25 anos e os dados do posto pluviométrico de Águas de Prata - DAE, município de Águas de Prata, obtendo-se  $46 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### Estudos energéticos

No estudo de caso, utiliza-se o modelo PCH (Martinez, 1994) para a simulação dos custos da PCH. Desta forma, a partir da curva de permanência do histórico e das envoltórias mínima e má-

**Tabela 2. Dados de entrada do modelo PCH para a PCH Lua de Mel.**

Item	Valor
Vida útil (anos)	50
Taxa de juros (% <sup>aa</sup> )	10
Altura de queda (m)	10,66
Perda de carga (%)	3
Comprimento da barragem (m)	96
Área inundada (ha)	27,6
Custo do terreno (US\$/ha)	3000
Canal de fuga (m)	25
Tubulação forçada (m)	17
Tubulação de baixa pressão (m)	90
Rodovias de acesso (m)	200
Linhas de transmissão (m)	1000
Perímetro cercado (m)	50
Altura de barragem (m)	10
Vazão de desvio do rio ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	46
Forma do vale	Trapezoidal
Topografia	Ondulada
Rodovia de acesso	Local, pavimentada



**Figura 10. Etapas do ajuste de um modelo estocástico.**

xima obtidas da inversão do modelo estocástico, obtêm-se e constroem-se curvas de fator de capacidade por vazão como apresentado na Figura 9, pois:

$$FC_i = \frac{A_1}{A_1 + A_2} = \left( \%t_i \times Q_i + \sum_{j=n+1}^{i-1} \frac{Q_j}{n+1} \right) / (100\% \times Q_i) \quad (7)$$

sendo que  $A_1$  e  $A_2$  são as áreas representadas na Figura 8;  $n$  o número de pontos da curva de permanência e;  $\%t$  a permanência associada a cada vazão.

Através das curvas e dos dados físicos (Tabela 2) e hidrológicos, procede-se à simulação da

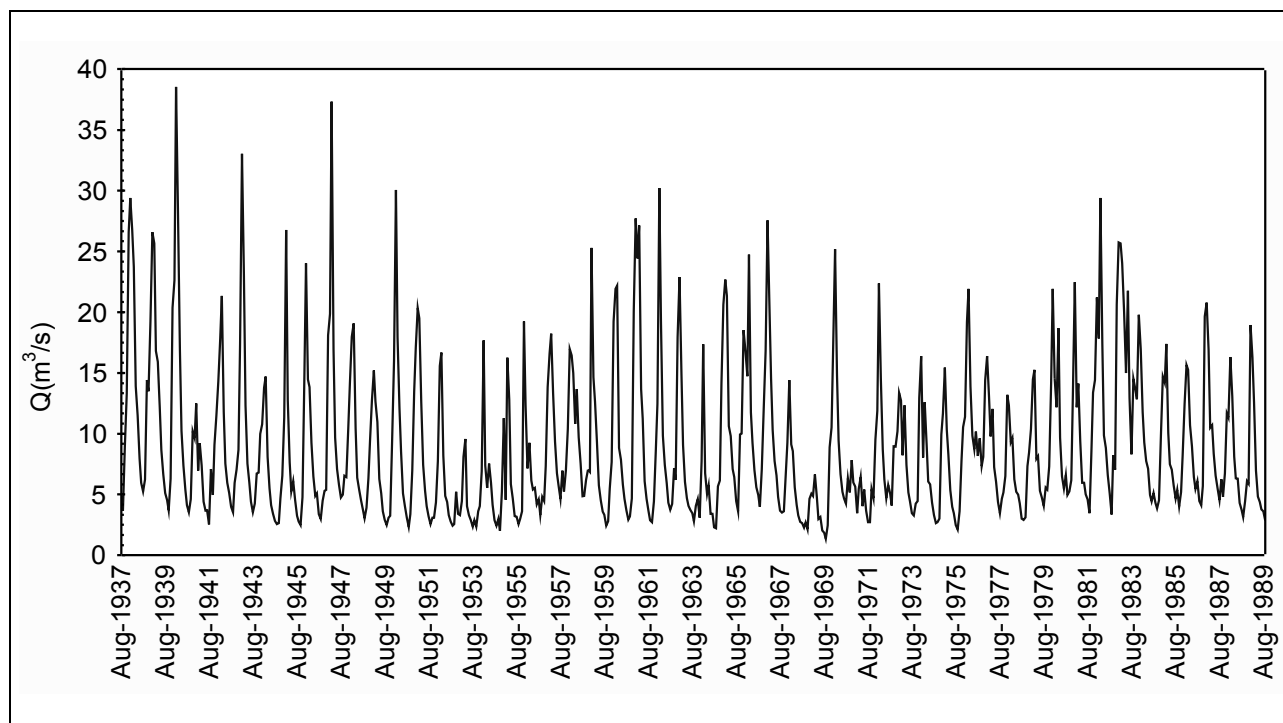


Figura 11. Histórico de vazões da PCH Lua de Mel. Fonte: Golder, 1999.

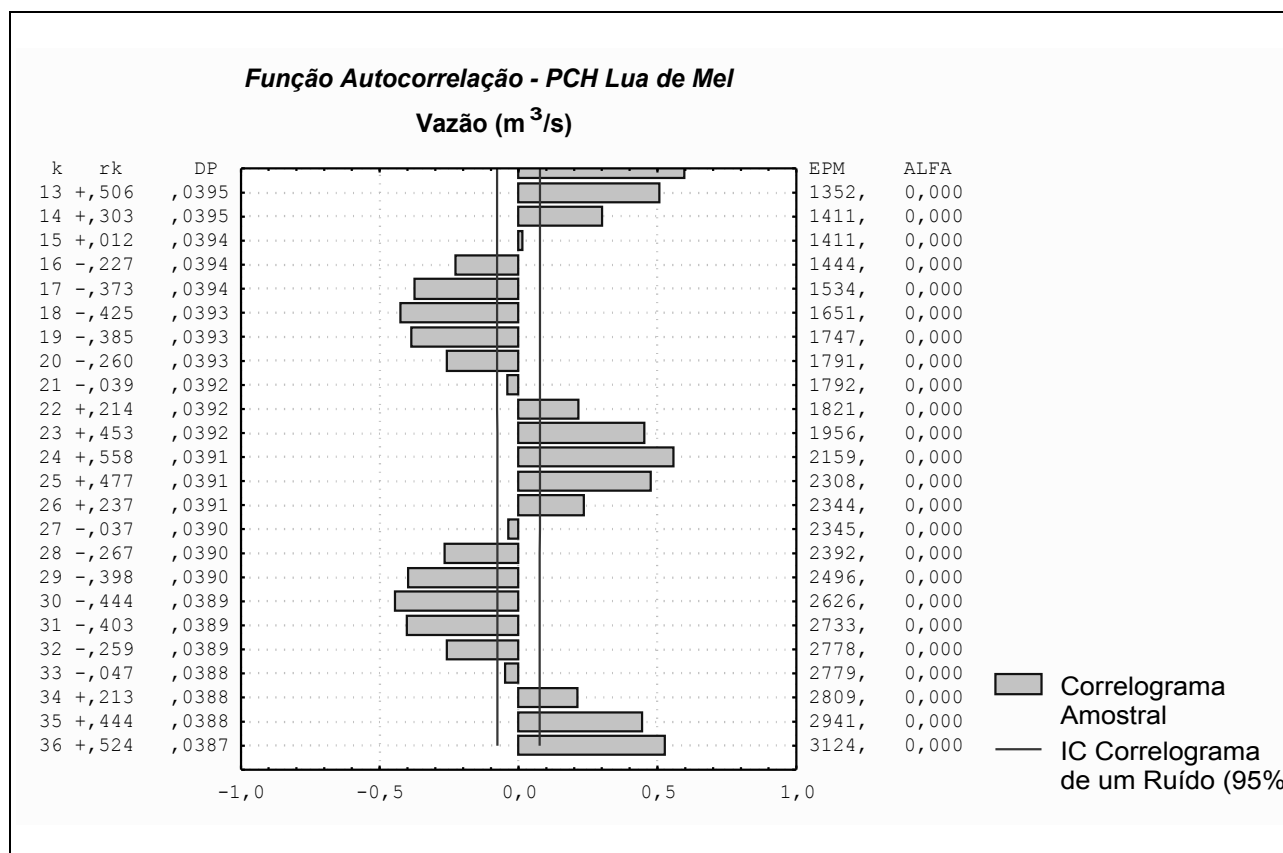


Figura 12. Correlograma dos dados brutos.

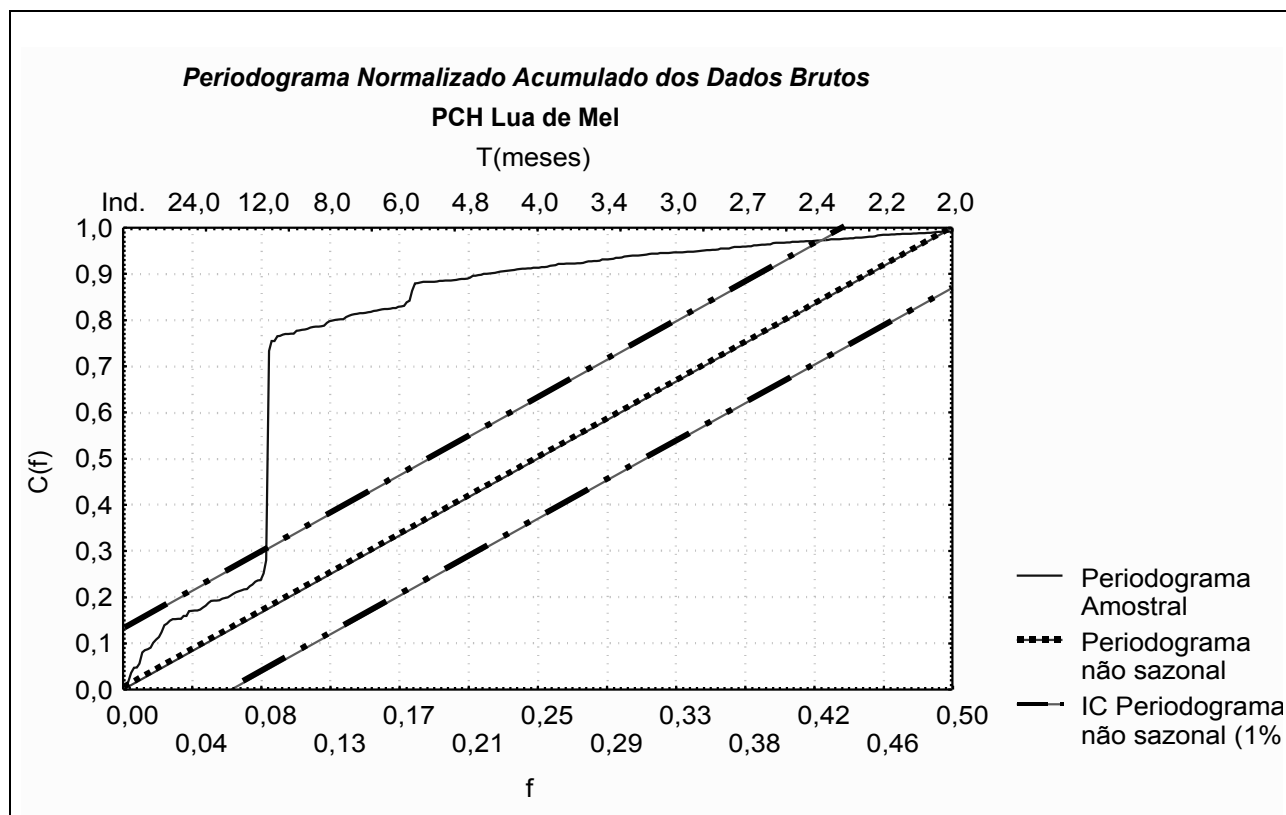


Figura 13. Periodograma acumulado para o histórico.

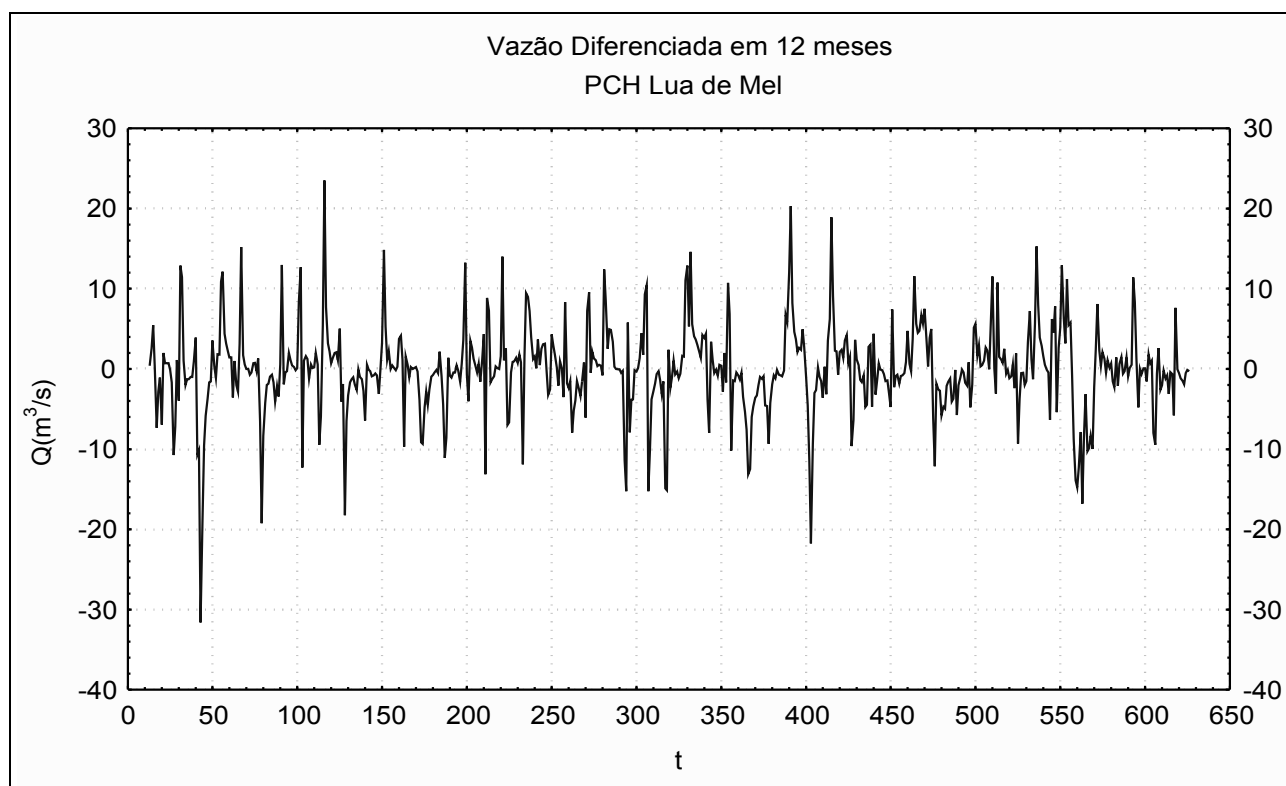


Figura 14. Histórico de dados após a diferenciação de ordem 12.

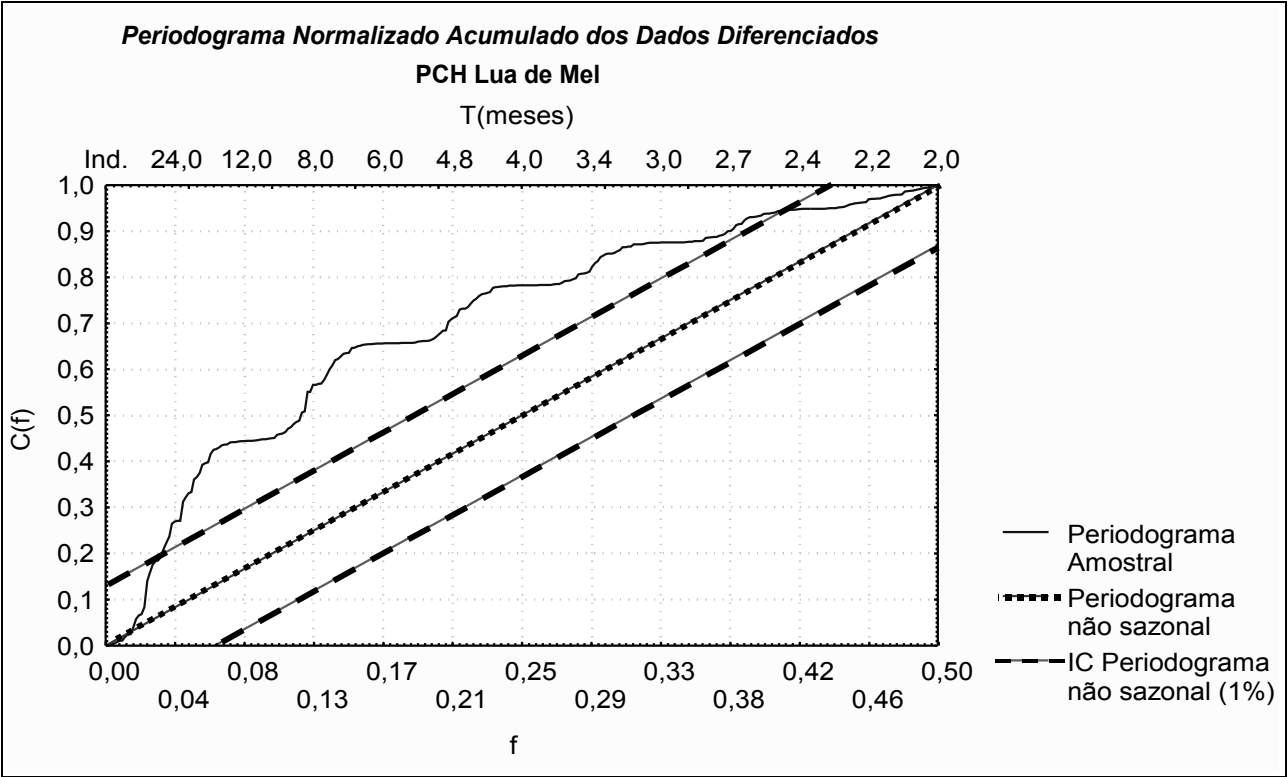


Figura 15. Periodograma do histórico após a diferenciação de ordem 12.

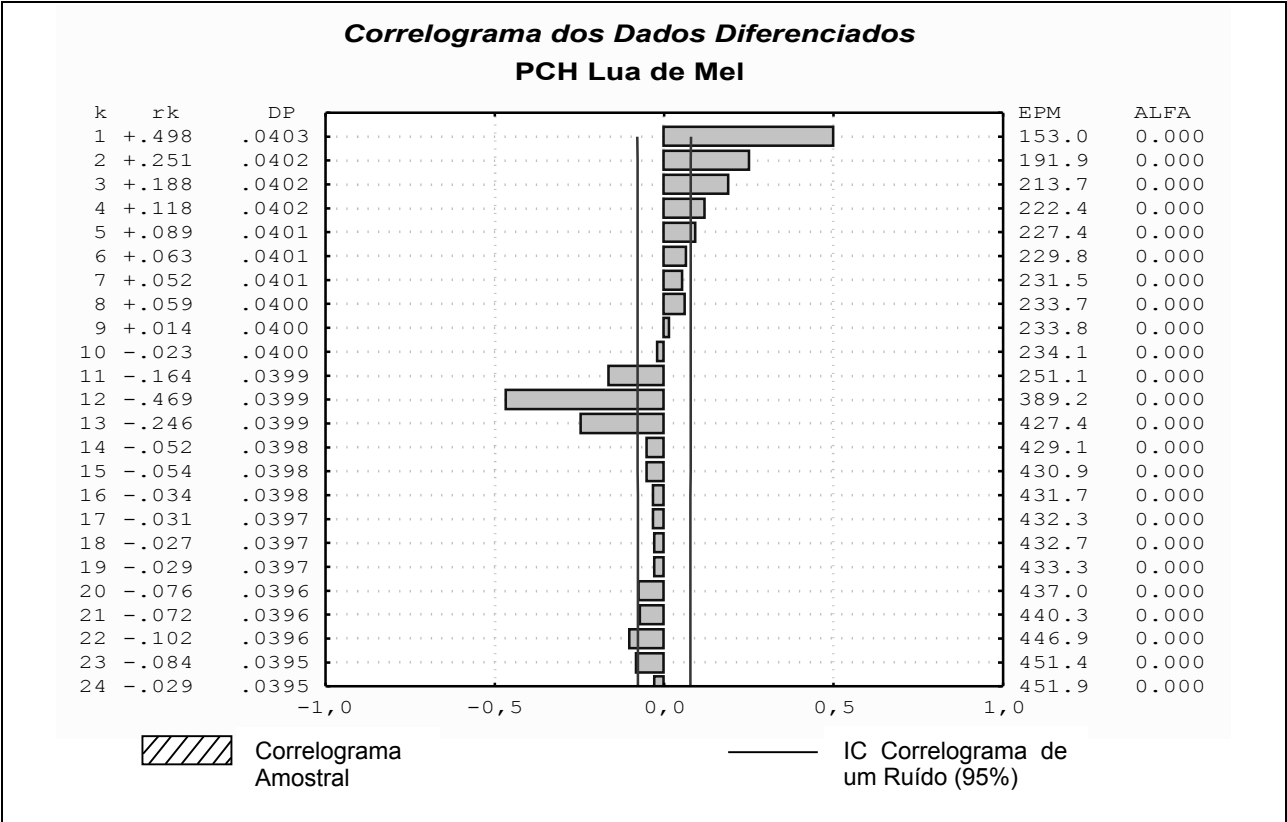


Figura 16. Correlograma amostral obtido à partir da série diferenciada.

viabilidade econômica da PCH Lua de Mel. Em ambos os casos, o critério de otimização utilizado foi minimizar o custo de energia gerada (CEG).

### A PCH Lua de Mel segundo a metodologia tradicional

No caso da metodologia tradicional, apenas a curva de permanência do histórico está disponível. A partir dos dados supracitados, procede-se a simulação da PCH Lua de Mel. Os resultados da simulação encontram-se resumidos na Figura 9.

Na Figura 9 pode-se observar que a potência instalada que minimiza o CEG da PCH Lua de Mel é 860 kW, com CEG associado de R\$ 56,31 por MWh, de acordo com o programa PCH. O valor sugerido pelo Manual, utilizando  $Q = Q_{95} = 2,72 \text{ m}^3/\text{s}$  foi de 425 kW, cujo CEG é aproximadamente R\$ 65,76 por MWh. Estes resultados já são por si só bastante discrepantes, apresentado uma diferença em torno de 16,8% em termos de CEG, mesmo quando ainda não se considera a variabilidade das vazões.

### A escolha do modelo estocástico utilizado

Nesta fase, podem-se obter as etapas de identificação do tipo de modelo estocástico, ajuste dos parâmetros, teste de aderência e utilização.

A identificação do modelo pode ser bastante subjetiva, principalmente quanto à determinação do grau de dependência entre as observações, posto que depende do comportamento do correlograma amostral. Adota-se o modelo *a priori* pela análise do correlograma. A partir daí, este modelo apresentará indícios de adequação progressivamente mais fortes à medida em que se avança na modelagem. Caso haja evidências da inadequabilidade do modelo, o processo é repetido (Figura 10).

Para o ajuste do modelo, optou-se pela utilização do pacote "Statistica for Windows", versão 5.1 (Statsoft, 1996), por apresentar um módulo de estudo de séries temporais conforme a metodologia proposta por Box et al. (1994).

Na escolha do modelo, parte-se do princípio de que o acréscimo de parâmetros deve ser justificado física ou estatisticamente. É recomendável traçar o histórico de vazões, para visualizar possíveis inconsistências, presença de descontinuidade, saltos, tendência e sazonalidade.

A Figura 11 mostra o histórico de vazões utilizado no estudo de viabilidade da PCH Lua de Mel (Golder, 1999), com valores de agosto de 1937 a setembro de 1989. Observa-se a presença de sazo-

**Tabela 3. Resultados do ajuste de um ARIMA (1,0,0) x (0,1,0)<sub>12</sub>.**

Método de estimação:	Método Max. Verossimilhança (Melard)
Soma de quadrados:	Inicial = 18489 Final = 13906 (75,22%)
Nº iterações:	Nº obs.: 10 614
Parâmetro $\phi$ : 0,49741	Desvio Padrão: 0,03500 t(612): 14,211
IC(95%):	Limite inferior: 0,42868 Limite superior: 0,56615

nalidade mensal. Não há, no entanto, sinal visível de tendência, saltos ou descontinuidades, o que possibilita o prosseguimento da análise.

Parte-se do modelo mais simples possível considerando-se que a série é independente e aleatória. Para determinar o tipo e grau de dependência presente, constrói-se o correlograma dos dados brutos (Figura 12). Neste gráfico são apresentados os coeficientes de autocorrelação ( $\rho_k$ ), o desvio padrão (DP), a estatística Porte-Manteau (EPM) e o nível de significância (ALFA) do teste de Porte-Manteau.

Este correlograma apresenta a forma de uma onda com período 12, o que já era esperado em virtude de se tratarem de dados mensais. A presença de sazonalidade é confirmada pelo traçado do histórico e do periodograma (Figura 13). Quando o periodograma dos dados possui um ponto de crescimento tão elevado, há indícios estatísticos da natureza sazonal do processo estocástico.

Para retirar o efeito sazonal, sugere-se que os dados sejam diferenciados no intervalo de 12 meses (Figura 14). Após a diferenciação, não se observa nenhum indício da presença de componente sazonal. Tal prerrogativa é confirmada pela construção do periodograma acumulado normalizado (Figura 15).

Após a diferenciação, ainda há um componente sazonal presente na série como um todo, o que indica que ao menos um dos parâmetros do modelo deve ser sazonal. No entanto, através da comparação com o a Figura 13, observa-se que boa parte da sazonalidade foi tratada. A próxima etapa da identificação do modelo é a construção do correlograma para os dados sazonalmente ajustados (Figura 16).

O correlograma mostra um decaimento amortecido e oscilante com período 12, à partir de  $\rho_1 > 0$ , fornecendo indícios da adequação de um ARIMA (1,0,0) x (0,1,0)<sub>12</sub>, ou seja, um modelo autorregressivo aplicado à série mensal diferenciada (Tabela 3). No entanto, é de se esperar que se trate

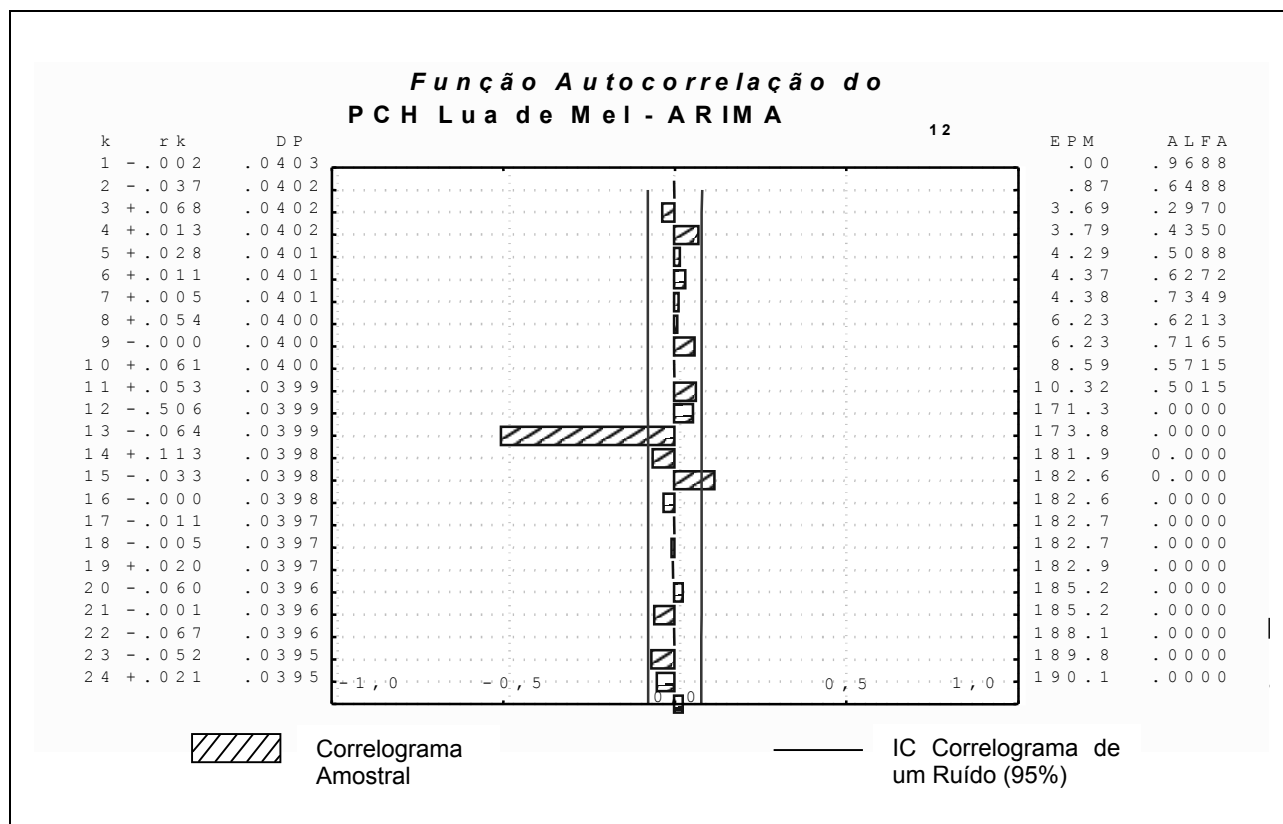


Figura 17. Função autocorrelação do ruído de um ARIMA (1,0,0) x (0,1,0) <sub>12</sub>.

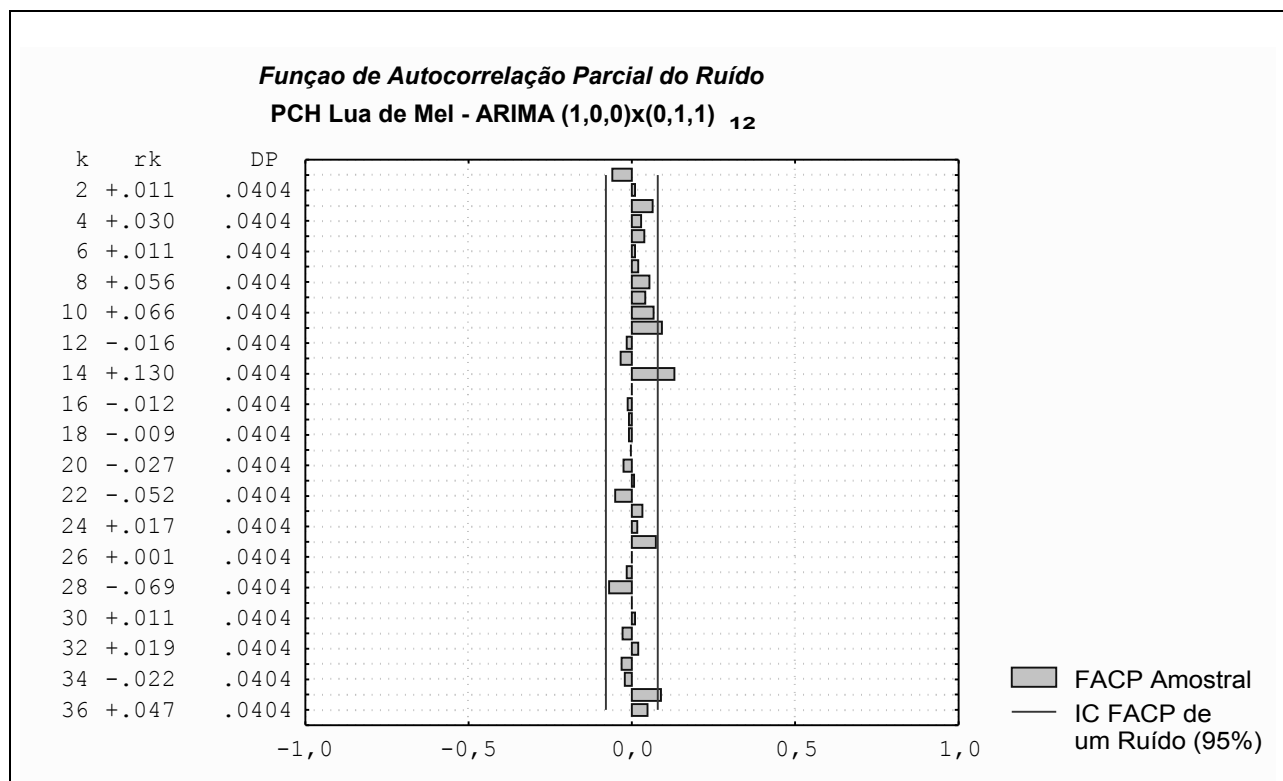


Figura 18. FACP do ruído de um ARIMA (1,0,0) x (0,1,1) <sub>12</sub>.



de um modelo a dois parâmetros, uma vez que um decaimento exponencial amortecido a partir de um parâmetro positivo produziria um correlograma que se situaria apenas à direita da Figura 16. Supõe-se inicialmente que apenas um parâmetro seria suficiente para tratar a dependência havendo, após ajustado o modelo, indícios de sua adequação que serão avaliados conforme a força destas evidências.

Através da Tabela 3, pode-se concluir que o modelo explicou apenas 25% da variância do processo, que é a diferença entre a soma de quadrados inicial e final.

A seguir, apresenta-se a função de autocorrelação do ruído obtida através do ajuste do modelo (Figura 17). No gráfico pode-se observar que o efeito sazonal ainda se encontra presente no correlograma do ruído através de um pico no “lag” 12, após ajustado o ARIMA (1,0,0) x (0,1,0)<sub>12</sub>, e assim constata-se que é necessário adicionar um termo sazonal no tratamento do ruído obtido a partir do modelo auto regressivo. Isto equivale a acoplar um modelo médias móveis sazonais ao modelo auto-regressivo, configurando um modelo multiplicativo ARIMA (1,0,0) x (0,1,1)<sub>12</sub> aplicado aos dados brutos. A Tabela 4 mostra os resultados do ajuste deste modelo aos dados brutos.

A Figura 18 apresenta a função autocorrelação do novo modelo. Como se pode observar, o ruído obtido é praticamente independente até o “lag” 13. No “lag” 14, o valor do coeficiente de autocorrelação situou-se fora do IC do teste para 95% de confiança. No entanto, por se tratar de uma estatística amostral é comum que haja flutuações deste tipo. Além disso, até o lag 12 do espectro sazonal o ruído é independente, a um nível de significância igual a 14%, suficiente para efeito de estudo.

Na Figura 18 pode-se observar que a função de autocorrelação parcial valida a hipótese de um modelo independente até o “lag” 14. Da mesma forma que no correlograma, são comuns flutuações nesta função, no caso amostral, e portanto a hipótese de um ruído independente é aceita.

Na Figura 19 (periodograma), observa-se que o restante da sazonalidade não eliminada pela diferenciação dos dados foi tratada pela adoção de um parâmetro de médias móveis sazonal. Assim, considera-se que o modelo ARIMA (1,0,0) x (0,1,1)<sub>12</sub> é eficaz no tratamento dos dados, pois conseguiu eliminar a sazonalidade e a dependência presentes, sendo adotado para análise da viabilidade da PCH Lua de Mel

**Tabela 4. Resultados do ajuste de um ARIMA (1,0,0) x (0,1,1)<sub>12</sub>.**

Método de estimação:	Método Max. Verossimilhança (Melard)
Soma de quadrados:	Inicial = 18489 Final = 7670 (41,48%)
Nº iterações:	Nº obs.:
28	614
Parâmetro $\phi$ :	Desvio Padrão: 0,03262 0,59438 (611): 18,224
Parâmetro $\Theta_{12}$ :	Desvio Padrão: 0,02130 0,94440 t(611):44,332
IC $\phi$ (95%):	Limite Inferior: 0,53033 Limite Superior: 0,90256
IC $\Theta_{12}$ (95%):	Limite Inferior: 0,65843 Limite Superior: 0,98623

### Inversão do modelo e geração das envoltórias

O modelo ajustado é então invertido e as envoltórias de vazão são geradas, para cada par de valores dos parâmetros deste modelo. Como se trata de um modelo a dois parâmetros, nove envoltórias são geradas. A Figura 20 mostra as envoltórias obtidas para a PCH Lua de Mel.

Como se pode observar, as envoltórias revelaram que o quantil  $Q_{95}$  está compreendido no intervalo (2,42;2,94). Considerando-se que o valor estimado a partir dos dados para este quantil era 2,72 m<sup>3</sup>/s, isto representa uma variação de 12,5% em relação ao limite inferior do intervalo.

### Estudo de viabilidade

O estudo de viabilidade da PCH Lua de Mel foi executado utilizando-se o modelo PCH, desta vez com auxílio das envoltórias inferior e superior, bem como da curva de permanência do histórico.

A Figura 21 mostra os resultados da simulação da PCH Lua de Mel para a metodologia tradicional. Como se pode observar, para obedecer o critério de otimização de minimizar o CEG, a usina deveria ser motorizada para quantis entre 30 e 40% de permanência, correspondente a uma faixa de potência instalada de 780 a 970 kW, o que vai de encontro ao estudo realizado pela Golder (1999), que sugeriu uma potência de 700 kW.

No gráfico observa-se um intervalo bastante distinto entre as curvas de CEG para as envoltórias e aquela obtida a partir do histórico no trecho de vazões baixas, ou seja, com alta permanência, fato este não observado para os quantis menores, abaixo

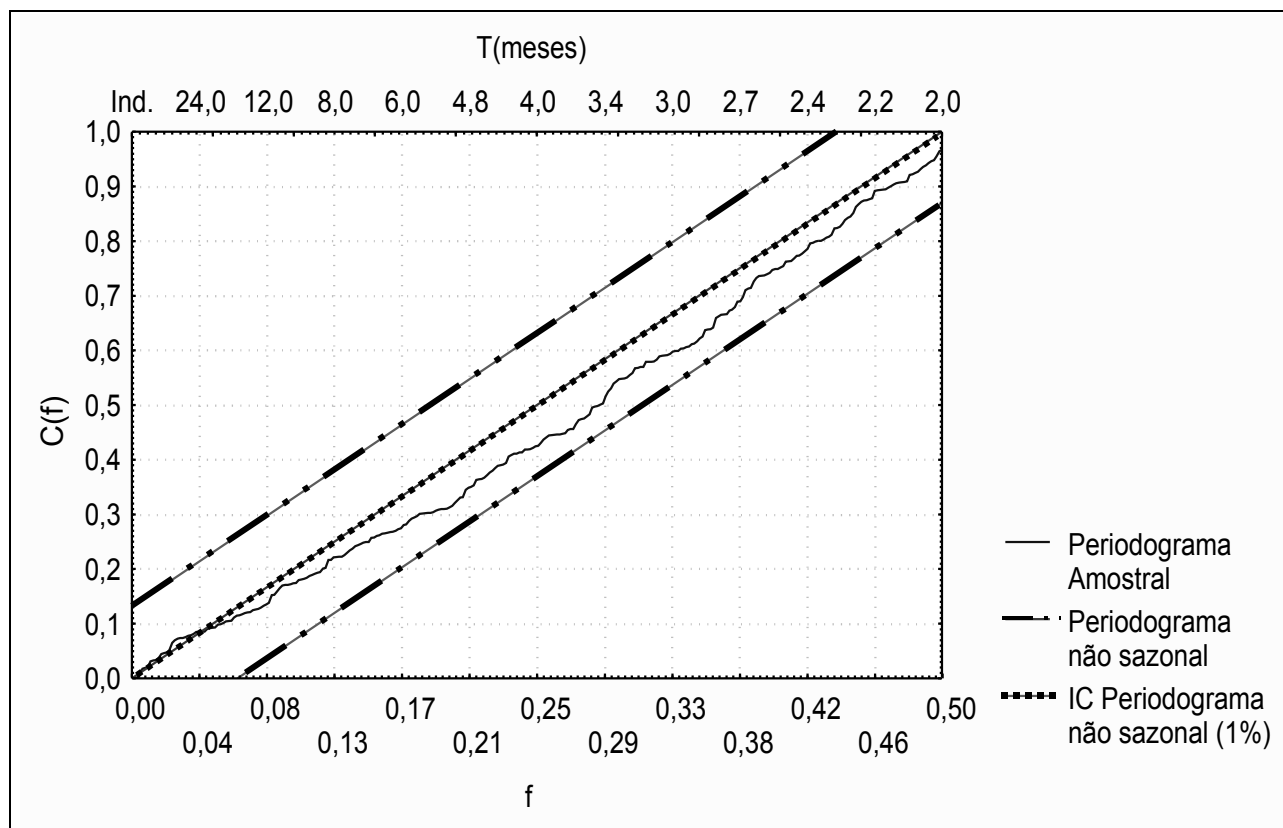


Figura 19. Periodograma do ruído de um ARIMA  $(1,0,0) \times (0,1,1)_{12}$ .

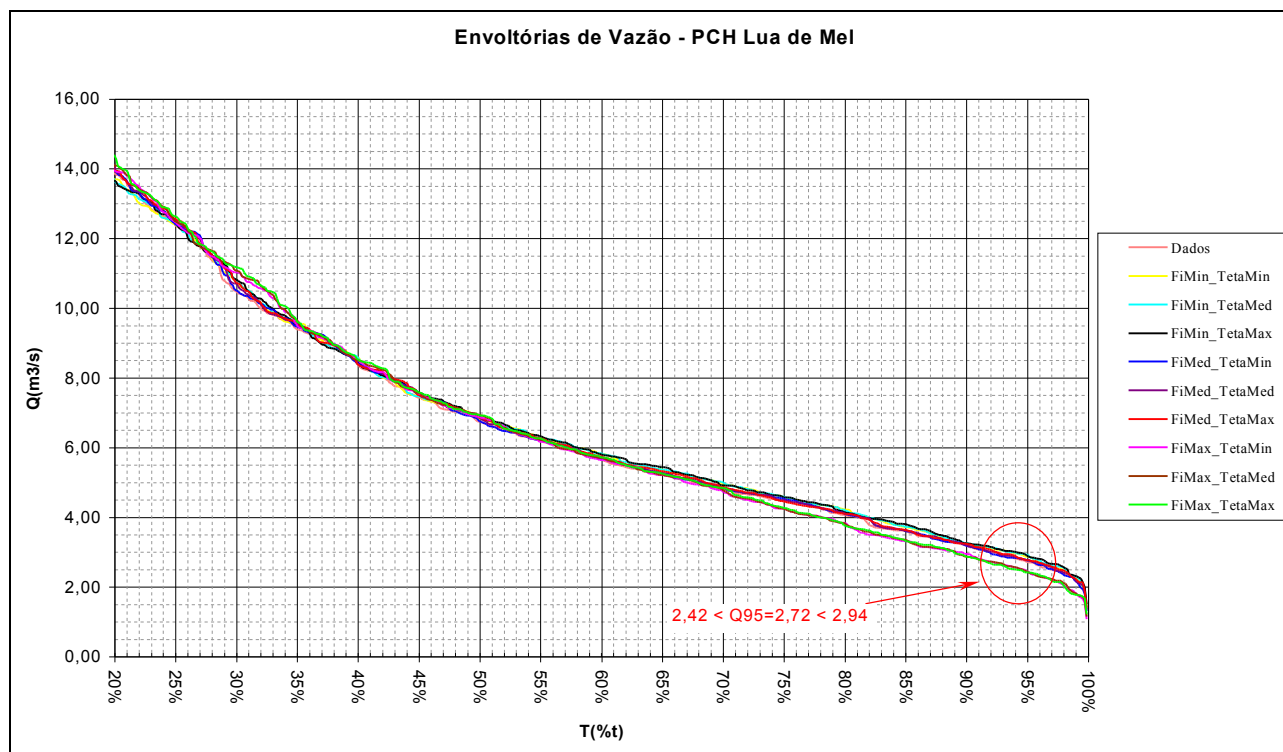


Figura 20. Envolvórias obtidas para a PCH Lua de Mel.

de 70%, onde a variação do CEG é inferior a 4,7%. No quantis maiores, a variação estatística dos parâmetros do modelo estocástico tem impacto profundo no CEG da PCH, justamente onde se pensa estar em condições mais seguras. Como exemplo tome-se a vazão  $Q_{95}$ , para a qual o CEG variou entre 88,3 e 100,5, o que representa uma variação de 13,9%.

A Figura 22 apresenta a variação relativa entre os valores de CEG obtidos das envoltórias e do histórico, para cada permanência. No gráfico se observa que os valores de CEG obtidos nos estudos energéticos, pela utilização das envoltórias e do histórico, apresentaram uma variação de 2 a 26% em relação ao valor mínimo obtido, crescente no sentido dos pontos de maior permanência.

## COMENTÁRIOS FINAIS

Os estudos apresentados visaram o desenvolvimento de uma metodologia para determinação expedita do nível de motorização de uma PCH. A análise se baseia na contabilização do bloco de energia gerada e parte de uma análise estática.

Devido à complexidade dos sistemas de geração com reservatórios de acumulação, optou-se pelo estudo de caso de PCH a fio d'água. O estudo de caso indicou que para vazões acima da vazão  $Q_{70}$  (as vazões acima de  $Q_{70}$  são vazões com valores maiores) as envoltórias são praticamente coincidentes (Figura 20). Uma possível causa do comportamento é que a curva de fator de capacidade, obtida através de uma relação entre áreas, é suavizante para os quantis menores. Assim, é esperado que a partir de algum quantil, já não haja diferenças significativas entre as curvas de CEG.

No entanto, este resultado tem outra face. Se a variação estatística dos parâmetros do modelo estocástico ajustado não produz alterações significativas nas curvas de CEG para quantis abaixo de  $Q_{70}$ , então a partir deste ponto o impacto na viabilidade da PCH será pequeno. Por outro lado, para quantis altos, o impacto é apreciável, chegando a 15% para  $Q_{95}$ .

Do exposto acima, obtém-se as seguintes conclusões:

- o manual de PCH recomenda motorização para vazões de  $Q_{95}$ , no caso de sistemas isolados, justamente em uma faixa onde a variação estatística dos parâmetros do modelo resulta em variações apreciáveis no estudo de viabilidade da usina;
- por outro lado, a motorização para vazões acima de  $Q_{70}$  mostrou-se, neste caso, mais

segura visto que o CEG assim determinado não sofrerá variações bruscas, *a menos que haja alterações na estacionariedade do processo estocástico.*

Desta forma, uma simplificação nos estudos hidrológicos e a sub-motorização não implica em caminhar na direção da segurança, muito pelo contrário, pode trazer situações de extrema dificuldade para o investidor.

Neste mesmo raciocínio, observa-se que a motorização elevada da PCH pode significar maior segurança do ponto de vista energético. Mesmo que, em alguns casos, a motorização superior implique em uma perda financeira também superior, percentualmente a perda é menor. Além disso, uma PCH motorizada para quantis menores possui maior flexibilidade operacional, devido ao maior número de máquinas instaladas.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Como sugestões para extensão deste trabalho, citam-se os seguintes itens:

1. a partir da geração das envoltórias inferiores, pode-se gerar um novo período crítico a ser utilizado para uma análise de geração de energia seguindo a curva de carga, contabilizando assim os ganhos e as variações de nível do reservatório;
2. buscar identificar qual seria a variação nas envoltórias conforme se varie o nível de confiança dos parâmetros do modelo estocástico, neste trabalho constante e igual a 5%;
3. identificar o risco de quebra de geração, através de uma relação entre o intervalo de confiança dos parâmetros e a probabilidade de obtenção de envoltórias mais desfavoráveis às envoltórias obtidas;
4. repetir o estudo para maior número de casos de forma a identificar limites de vazão, como o quantil  $Q_{70}$  ou outros, ideais para se minimizar o risco energético. Tal estudo pode ser realizado por regiões e bacias, numa tentativa de regionalizar o quantil. Este novo limite seria utilizado como ferramenta de planejamento energético regional, e aí sim, poderia ser *recomendado* pelos órgãos competentes;
5. ampliar a faixa de aplicação do modelo PCH (Martinez, 1994) para 30 MW, de acordo com a legislação atual do setor elétrico.

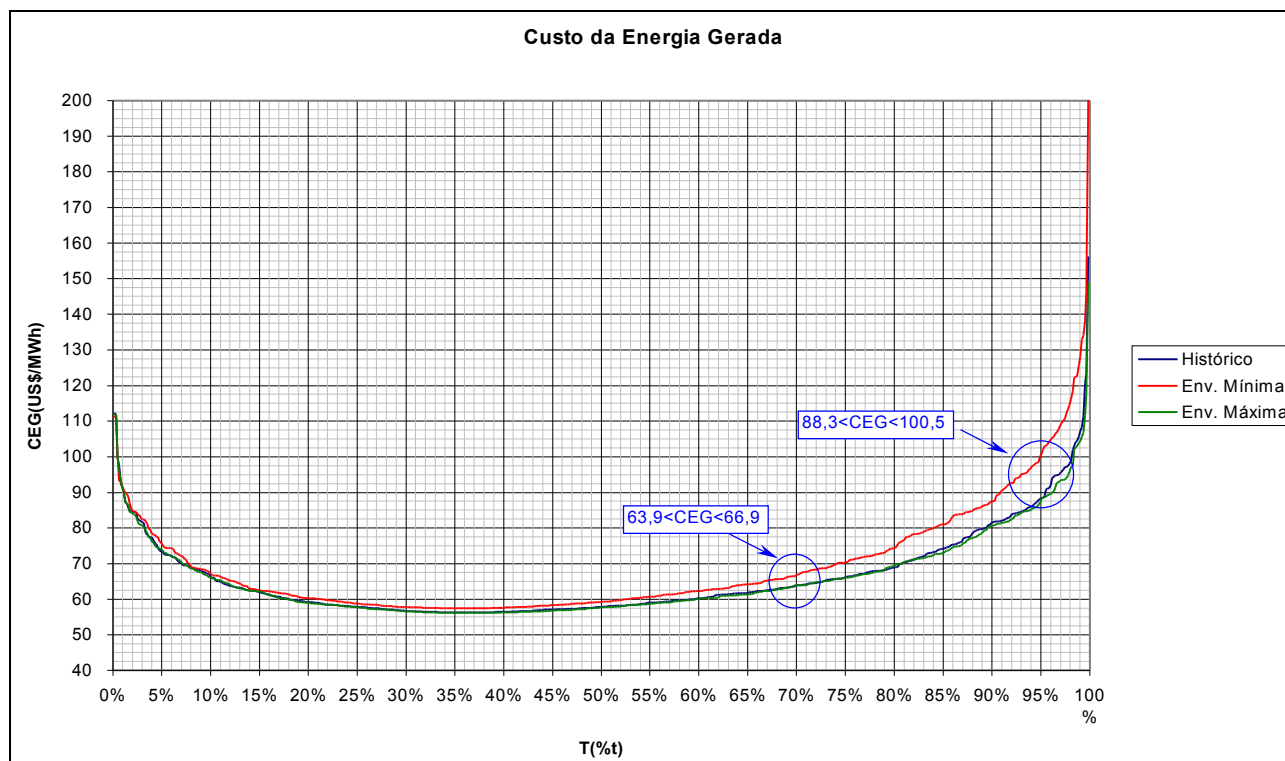


Figura 21. Resultado da simulação pela metodologia proposta.

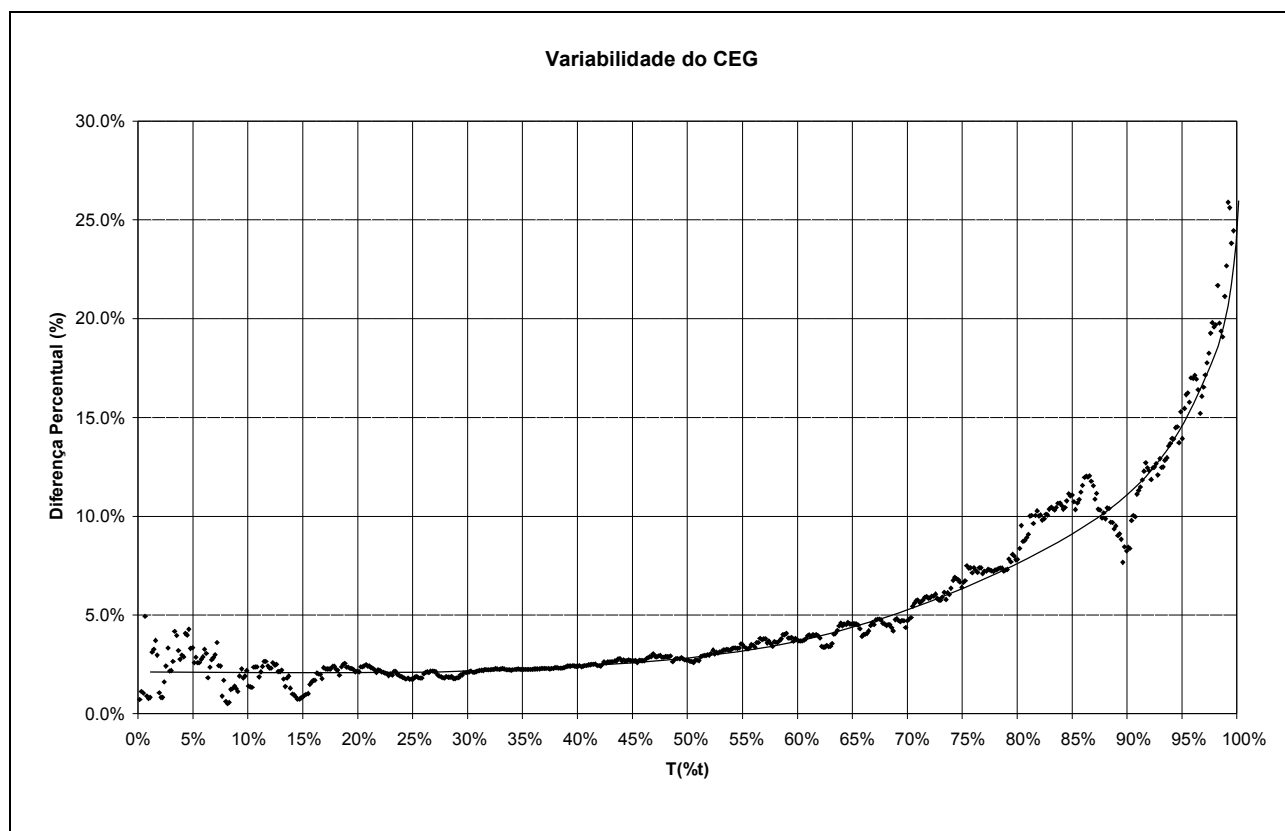


Figura 22. Variação relativa do CEG.

## REFERÊNCIAS

- BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. & REINSEL, G. C. (1994). *Time series analysis: forecasting and control*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 598p.
- ELETROBRÁS (2000). *Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas*. Rio de Janeiro.
- FABRIZY, M. P.; MACIEL, F. A. A. e LUCZYNSKI, E. (1994). *Problemática de desenvolvimento das PCH: o caso da Amazônia*. II Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. Campinas.
- GOLDER ASSOCIATES (1999). *Projetos de viabilidade técnica e econômica da represa Rio das Antas e das PCH's Lua de Mel e Osório - estudos hidrológicos e energéticos preliminares*, B. H. MG.
- MARTINEZ, C. B. (1994). *As interações entre o planejamento e o projeto de usinas hidrelétricas. O caso das PCH do Brasil*. Tese de doutorado, UNICAMP.
- SANT'ANA, R. F. (1983). *Assessing the feasibility of small hydroelectric power plants*. Tese de doutorado. Colorado State University. Fort Collins. Colorado.
- STATSOFT INC. STATISTICA FOR WINDOWS (1996). Tulsa, OK: StatSoft Inc.
- YEVJEVICH, V. (1982). *Stochastic processes in hydrology*. 2 ed. Littleton, Colorado: Water Resources Publications, 276p.

## *Feasibility Studies of Small Hydropower Plants and the Concept of Envelope Curves for Flow a Stochastic Approach to Water Resources*

### ABSTRACT

Small Hydropower Plants (SHP) in Brazil are those whose installed power is less than 30 MW, and a lake with a maximum area equal to or less than 3 km<sup>2</sup>, for the one hundred-year flood. Due to the costs involved, the Brazilian Federal Government has encouraged their exploration by private groups.

SHP feasibility studies concentrate on the definition of a series of flows to determine a flow of 95% permanence. The SHP Manual (ELETROBRÁS, 2000) considers this value as the one that must be used to evaluate energy production. Thus, it has a strong impact on the payment of investment. Therefore, this methodology does not consider the variability of flows and their impact on feasibility studies.

The author suggests the use of stochastic models together with feasibility studies, considering that it is important to look for simplicity and low costs and to determine the consequences of flow variability in these studies. The results show that using low flows in order to reduce the influence of their variability in the definition of power, does not mean to extend this behavior to feasibility studies. In the case study developed, the point where this behavior begins to have an effect on the studies is the 70% flow, very different from that suggested by the SHP Manual.

Key Words: SHP; stochastic models.