

REGULARIZAÇÃO DE VAZÕES INTRA-ANUAL: COMPARAÇÃO DE MÉTODOS

Michael Mannich¹; Eloy Kaviski²; Miriam Rita Moro Mine³

Resumo – O problema de regularização de vazões em reservatórios é recorrente na engenharia hidrológica e possui grande interesse prático. O resultado destes estudos produz a chamada curva de regularização, a qual relaciona o volume de um reservatório capaz de garantir uma determinada vazão com certo tempo de recorrência. A curva de regularização pode ser obtida a partir da série histórica de dados, pelo método de Monte Carlo e por uma abordagem teórica apresentada neste estudo. O foco deste trabalho é comparar os resultados destas três abordagens limitando-se ao horizonte de regularização intra-anual, que ocorre quando não há necessidade de transferência de água de um ano para outro.

Abstract – The problem of flow regulation in reservoirs is common in hydrologic engineering and has great practical interest. The result of these studies produces a flow regulation curve, which relates the volume of a reservoir necessary to supply a determined flow with a return time. The curve can be obtained from historical data, by Monte Carlo method and by a theoretical approach presented in this study. The aim of this study is to compare the results of these three approaches only in the intra-annual horizon, which occurs when there is no need to transfer water from one year to another.

Palavras-Chave – Regularização de vazões, Reservatório, Séries Sintéticas.

INTRODUÇÃO

Regularização plurianual é o caso quando há necessidade de transferência de água dentro do ano e de um ano para outro para atender uma determinada demanda. Quando se fala de regularização intra-anual, anual pura, ou simplesmente anual, está se desconsiderando a necessidade

¹ Doutorando PPGERHA-DHS-UFPR. Email: mannich@ufpr.br

² Professor PPGERHA-DHS-UFPR. Email: eloy.dhs@ufpr.br

³ Professora PPGERHA-DHS-UFPR. Email: mrmine.dhs@ufpr.br

de transferência de água de ano para ano ou a vazão de regularização é inferior à menor vazão anual.

Frequentemente os problemas de regularização de vazão são solucionados de forma bastante simplificada através da curva de permanência. Outra solução é obtida mediante a aplicação da técnica de Rippl (ou também máximo déficit acumulado) à série histórica. A determinação do volume mínimo do reservatório necessário para regularizar uma determinada vazão (vazão de regularização) é obtida pelo conceito de “máximo déficit acumulado”. A curva traçada entre a vazão de regularização, geralmente na ordenada, e o volume de armazenamento necessário para regularizar esta vazão, na abscissa, é denominado curva de regularização (Gomide, 1983).

A abordagem do problema de forma empírica, isto é, com os dados históricos, calculando o volume necessário para atender uma determinada demanda (vazão de regularização), possui a deficiência de não conseguir atrelar os resultados às incertezas das vazões, visto que se considera apenas a série histórica e os resultados seriam válidos apenas se a mesma sequência de vazões ocorresse no futuro (Gomide, 1983).

Uma alternativa é realizar um procedimento experimental (simulação), através da geração N de séries sintéticas. Em tal caso pode-se gerar então N curvas de regularização. Desta forma pode-se falar em estatísticas do tamanho do reservatório para cada nível de regularização em termos geralmente da probabilidade de falha ao longo de um horizonte de planejamento (ou em outras palavras, tempo de retorno) (Gomide, 1983). Esta abordagem é coerente com a natureza inerentemente estocástica dos fenômenos hidrológicos, tornando importante a aplicação da teoria de processos estocásticos nos projetos e operação de reservatórios.

O objetivo deste artigo é analisar três técnicas de determinação das curvas de regularização: (i) através da série histórica, (ii) via simulação com séries sintéticas e (iii) por meio de uma abordagem teórica desenvolvida por Gomide (1986).

MÉTODOS

Máximo Déficit Acumulado

O método do máximo déficit acumulado ou mais tradicionalmente denominado diagrama de Rippl devido à possibilidade da solução de forma gráfica. O método consiste em, para uma dada vazão de demanda constante (Q_F), determinar o máximo déficit de volume durante um determinado período para atender a demanda. Considerando um reservatório inicialmente vazio ($V=0$) e uma série de aflúncias $I(t)$ o algoritmo é simplesmente:

```

V = 0
X = 0
Repertir de t=1,n
|
|   X = MIN [0, X + (I(t) - QF)Δt]
|   Se X < V então V = X
|
Fim
V = -V

```

onde Δt é o intervalo de tempo. O volume resultante é o oposto do obtido pelo algoritmo uma vez que se considerou inicialmente um volume igual à zero. O valor obtido é o volume do reservatório necessário para atender a demanda constante da uma série de afluições. Nas condições de operação o reservatório deve começar cheio para satisfazer estes critérios (Raudikivi, 1979) (Kelman, 1987).

A Técnica de Gomide: Uma Abordagem Teórica

Gomide (1986) apresenta um método para determinação do volume do reservatório necessário para regularizar baixos níveis de vazão. A técnica consiste em maximizar a função:

$$V = (Q_F - \bar{Q}_{t,T})kt \quad (1)$$

na qual Q_F (m^3/s) é a vazão de regularização (ou vazão firme), $\bar{Q}_{t,T}$ (m^3/s) é a vazão média de períodos de estiagem de t meses de duração e T anos de recorrência, k é o número de segundos de um mês. Ou seja, a maximização da equação 1 representa fisicamente que o volume do reservatório para a regularização sazonal é o maior valor da diferença entre a vazão regularizada e a vazão média de t meses de duração (com certa probabilidade de ocorrência medida em termos do tempo de recorrência) multiplicado pela extensão deste período.

A vazão média de períodos de estiagem de t meses de duração pode ser representada por uma função com a forma:

$$\bar{Q}_{t,T} = (a + bt)q_T \quad (2)$$

na qual a e b são os coeficientes da equação de uma reta, a serem determinados, cuja equação representa as vazões médias de t meses de duração, e q_T é o fator de recorrência, função do tempo de recorrência, também a ser determinado. A variável q_T representa desta forma a razão entre a

vazão de estiagem de t meses de duração com T anos de retorno e a vazão média de t meses de duração. A forma da equação (2) é devida à observação de que as médias das vazões com t meses de duração obedecem a uma relação linear entre 1 e 6 meses. Esta equação não precisa ser obrigatoriamente linear e qualquer função adotada é válida para o método, no entanto, a sequência apresentada irá se alterar. A rigor, as amostras devem ser analisadas para 30, 60, 90, 120, 150 e 180 dias independentemente desses períodos ocuparem exatamente 1, 2, 3, 4, 5, ou 6 meses (Gomide, 1976). Todavia, considera-se satisfatório o processo de amostragem adotado, tendo em vista as finalidades do trabalho, a maior facilidade na comparação com séries sintéticas e a maior simplicidade no método para apresentação a um projetista ou tomador de decisões.

Inserindo a equação 2 na equação 1, derivando a expressão resultante e igualando a zero obtém-se o ponto de máximo para t [$t = (Q_F - aq_T)/2bq_T$]. Substituindo o resultado de t na equação 1 obtém-se o máximo da função. O resultado é uma expressão para o volume capaz de regularizar uma vazão Q_F com recorrência de T anos:

$$V = \frac{(Q_F - aq_T)^2}{4bq_T} k \quad (3)$$

Dividindo-se a equação 3 por \bar{Q} , que é a média de longo termo, e fazendo $\bar{V} = 12\bar{Q}k$ (volume afluente anual), obtém-se uma equação mais elegante, na forma adimensional:

$$\frac{V}{\bar{V}} = \frac{(q_F - \alpha q_T)^2}{48\beta q_T} \quad (4)$$

onde $q_F = Q_F/\bar{Q}$, $\alpha = a/\bar{Q}$ e $\beta = b/\bar{Q}$. Segundo Gomide (1986) esta formulação é função de q_T , que só possui sentido físico para $q_F \leq q_T$ pois não há necessidade de regularização para vazões firmes menores do que a vazão média anual com um determinado tempo de retorno. No entanto, o autor considerou a mesma distribuição de probabilidades para q_T e para a vazão média anual normalizada pela vazão de longo período. No caso mais geral, em que as distribuições de probabilidade são diferentes, a validade da equação (4) é para vazões de regularização (Q_F) menores ou iguais à vazão média anual com mesmo tempo de retorno que avaliado para q_T . Outra limitação é para períodos de estiagem (t) menores do que 12 meses, visto tratar-se de regularização intra-anual.

Abordagem Experimental: Método de Monte Carlo

Uma série histórica pode ser encarada como apenas uma das possíveis realizações de um processo estocástico. Pode-se imaginar que a natureza “sorteou” a série histórica de um conjunto de séries distintas e equiprováveis. Procura-se aproximar este comportamento estocástico gerando séries ditas sintéticas por algum modelo teórico.

Uma vez que se dispõe de várias séries e não apenas uma única (caso da série histórica) pode-se determinar para cada série o volume do reservatório necessário para regularizar uma determinada vazão. A cada série associa-se um volume de reservatório de modo que é possível determinar sua distribuição de probabilidades (Kelman, 1987).

Este procedimento de simulação é muito difundido entre várias áreas das ciências exatas, e é conhecido como Método de Monte Carlo que é aplicado a uma enorme gama de problemas, que geralmente são muito complexos. De um modo geral, o método de Monte Carlo tem por objetivo chegar à resposta mais aproximada possível para o problema em questão, através de um número grande de simulações ou experimentos teóricos.

Um modelo simples para geração de séries sintéticas em escala anual é o modelo autorregressivo de 1ª ordem, também chamado de Thomas-Fiering:

$$X_t = \rho X_{t-1} + V_t \sqrt{1 - \rho^2} \quad (5)$$

na qual V_t é uma variável aleatória normalmente distribuída com média zero e desvio padrão unitário, ρ é o coeficiente de correlação das vazões anuais e X_t é a vazão do ano t , a qual é uma variável reduzida, portanto, com média zero e variância unitária.

O modelo preserva por construção o coeficiente de correlação entre as vazões anuais, no entanto, impõe que a distribuição destas vazões seja normal. Em muitos casos as vazões anuais se ajustam melhor à distribuição log-normal de três parâmetros, de modo que as vazões anuais podem ser corrigidas para a distribuição em questão fazendo:

$$Q_t = x_0 + \exp[\sigma X_t + \mu] \quad (6)$$

ESTUDO DE CASO

O estudo de caso apresentado utilizou dados da estação fluviométrica Porto Amazonas (código ANA: 65035000), localizada no Rio Iguçu, Estado do Paraná, nas coordenadas latitude

-25°32'53'' e longitude -49°53'22'', com área de drenagem de 3662 km². A série histórica utilizada contempla os anos de 1935 a 2005, totalizando 70 anos de registros diários consistidos.

Neste artigo procura-se comparar os resultados da abordagem desenvolvida por Gomide (1986) com os resultados obtidos via simulação. Para isto foi necessário estacionarizar a série de vazões anuais, visto que a última técnica assim o exige. Para tanto se construiu uma curva das vazões acumuladas versus o tempo (Figura 1), na qual se identificou três trechos com declividades diferentes (ou seja, médias estatisticamente distintas para cada período). As vazões foram então corrigidas para a situação atual. A Figura 1 ilustra a curva das vazões acumuladas da série original e da nova série construída de modo a torná-la estacionária.

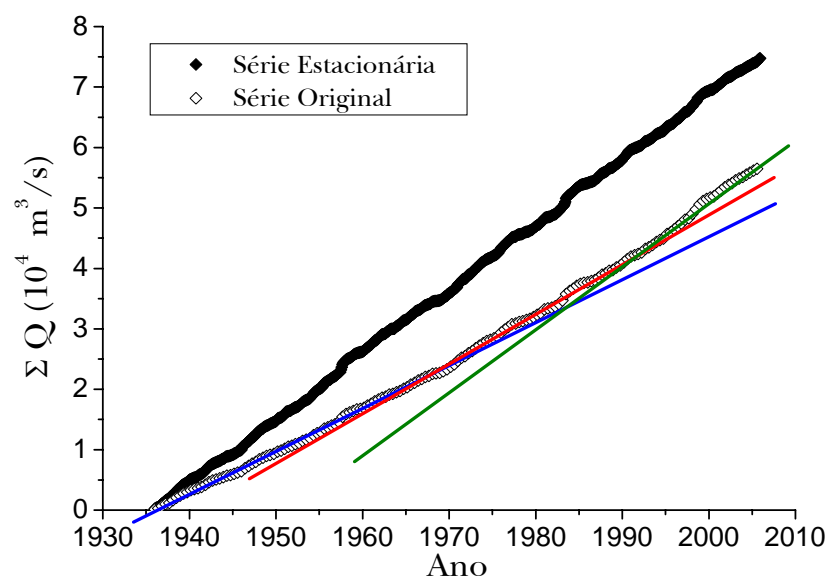


Figura 1 – Curva das vazões acumuladas

APLICAÇÃO E RESULTADOS

A Técnica de Gomide

Os coeficientes da reta da equação 2 são determinados por regressão linear das vazões médias mínimas de um a seis meses de duração. Ou seja, são construídas seis séries da seguinte forma:

- Série 1: formada pela vazão mínima mensal de cada ano;
- Série 2: formada pela média das duas menores vazões mensais consecutivas de cada ano;
- Série 3: formada pela média das três menores vazões mensais consecutivas de cada ano, e assim por diante, até 6 meses.

Para o presente estudo, utilizaram-se os dados de 1936 a 2005, de forma que se tem então 70 dados para cada série de vazões de estiagem. A média (\bar{Q}), o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (CV) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Estatísticas das séries de vazões de estiagem

Período (meses)	1	2	3	4	5	6
\bar{Q} (m ³ /s)	35,0	41,9	49,3	54,6	59,3	65,3
σ (m ³ /s)	15,4	18,1	21,0	23,3	26,0	28,8
CV	0,440	0,433	0,426	0,427	0,439	0,442

Ajustando-se uma reta (Figura 2) aos valores médios das seis séries construídas, obtêm-se os coeficientes $a = 30,039$ e $b = 5,959$ da equação 2 com coeficiente de determinação de 0,9937.

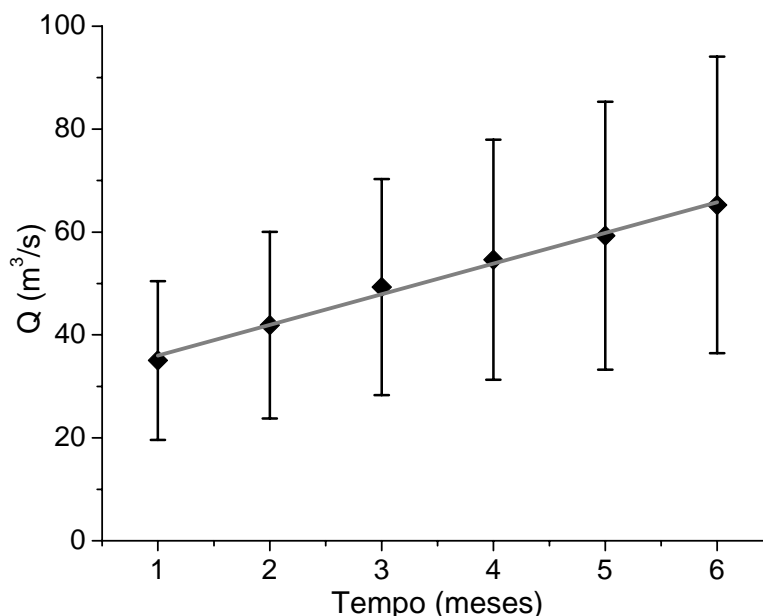


Figura 2 – Ajuste das vazões médias de t meses de estiagem

A determinação do fator de recorrência, q_T , foi obtido construindo seis novas séries formadas pela divisão de cada elemento das séries anteriores pela respectiva média. As novas séries apresentam média unitária e desvio padrão igual ao coeficiente de variação das séries geradoras. Devido à semelhança entre os coeficientes de variação ($CV \approx 0,43$) de cada amostra é possível ajustar uma única distribuição de probabilidade para a totalidade dos dados, considerando uma única série com 420 elementos (Gomide, 1970). Esta série por sua vez é ordenada de forma crescente e a cada elemento é atribuída uma probabilidade dada pela posição de plotagem de Weibull $p_i = i/(n+1)$, onde $n=70$. Consegue-se, assim, um número seis vezes maior de eventos

para uma melhor determinação dos momentos e consequentemente dos parâmetros de ajuste da distribuição de probabilidades.

Verificou-se a possibilidade de ajustar a esta nova série uma distribuição log-normal de três parâmetros, cuja função densidade de probabilidade é definida pela equação (7):

$$f(x) = \frac{1}{(x - x_0)\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x - x_0) - \mu_y}{\sigma_y}\right]^2\right\} \quad (7)$$

onde μ_y é a média da variável $y = \ln(x - x_0)$, σ_y^2 é a variância da variável y e, x_0 é o parâmetro de posição, de forma que $x \geq x_0$.

Lanna (1993) apresenta equações para a estimação dos parâmetros dessa distribuição, baseados na média μ , desvio padrão σ e coeficiente de assimetria γ da série original. Estão resumidos na Tabela 2 as equações e os resultados para a série em análise.

Tabela 2 – Estimação dos parâmetros da distribuição log-normal de três parâmetros

Parâmetro	Equação	Resultados
γ	$\frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3}{\sigma^3}$	0,8427
ϕ	$(-\gamma + \sqrt{\gamma^2 + 4})/2$	0,6638
η	$(1 - \phi^{2/3})/\phi^{1/3}$	0,2740
x_0	$\mu - \sigma/\eta$	-0,5760
σ_y	$\sqrt{\ln(\eta^2 + 1)}$	0,2691
μ_y	$\ln(\sigma/\eta) - \frac{1}{2}\ln(\eta^2 + 1)$	0,4187

A Figura 3 ilustra a comparação entre os valores de q_T amostrais e os valores obtidos pela distribuição de probabilidade ajustada. A correlação dos dados foi de 0,9971, o que para o teste PPCC (*Probability Plot Correlation Coefficient*) (Stedinger *et al.*, 1992) garante um bom ajuste ao nível de significância de 5%. A Figura 4 ilustra a comparação entre a distribuição de probabilidades acumuladas empírica de q_T e a distribuição log-normal ajustada, de tal forma que qualitativamente

se observa uma boa aderência. E a Figura 5 ilustra outra comparação entre os dados e a distribuição ajustada em termos da distribuição massa de probabilidades.

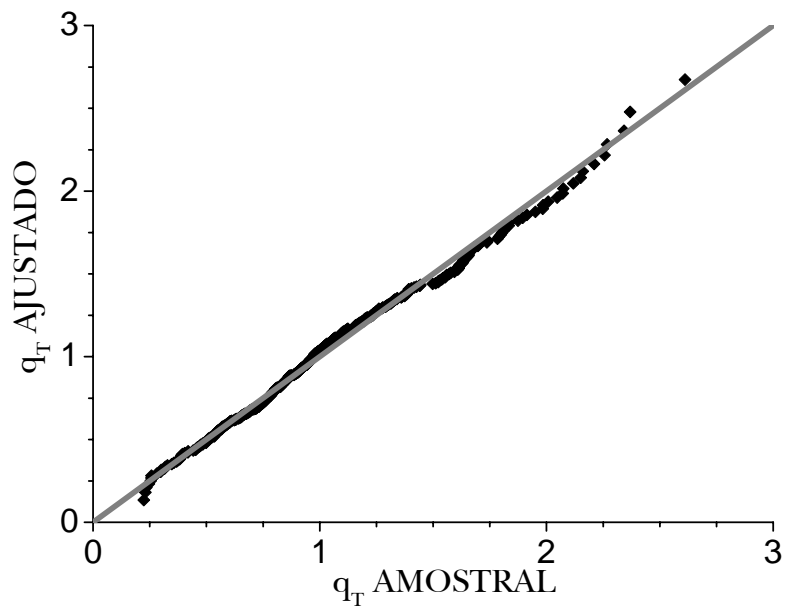


Figura 3 – Comparação do ajuste para q_T

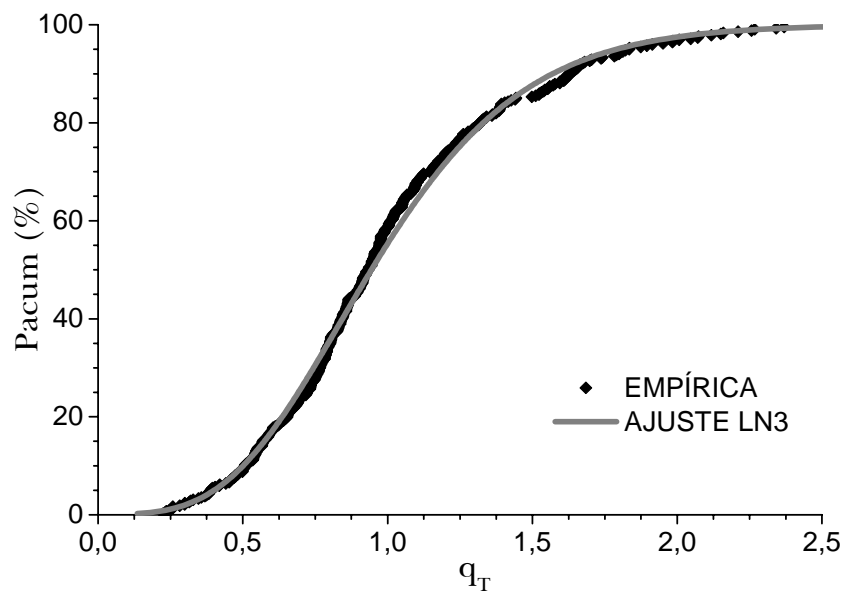


Figura 4 – Comparação da curva de probabilidade acumulada ajustada para q_T

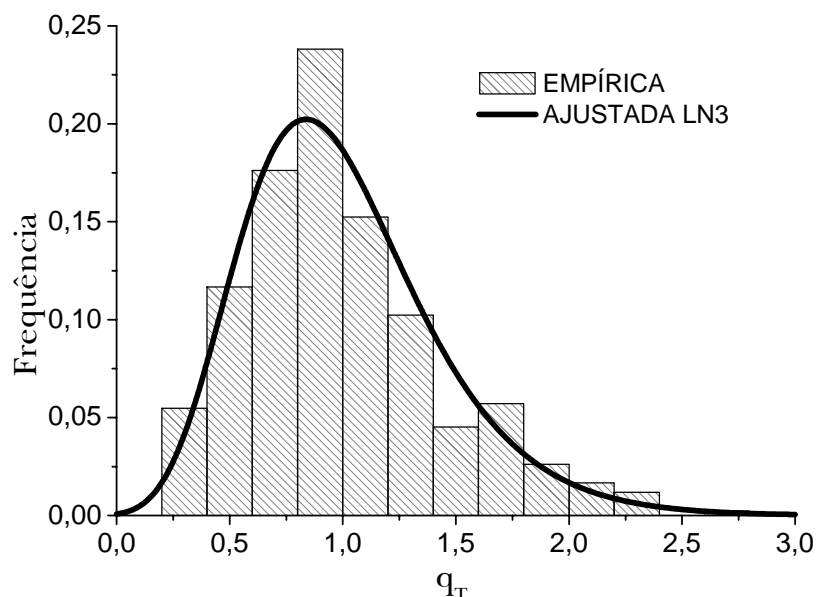


Figura 5 – Distribuição de probabilidade de q_T

Com intuito de comparar ainda o ajuste de todos os termos da equação (2) é construída a curva (Figura 6) de distribuição de probabilidade acumulada (empírica e LN3) para $Q_{t,T}$ adimensionalizada pela vazão média de longo período. Da mesma forma que a Figura 4 a aderência é muito boa.

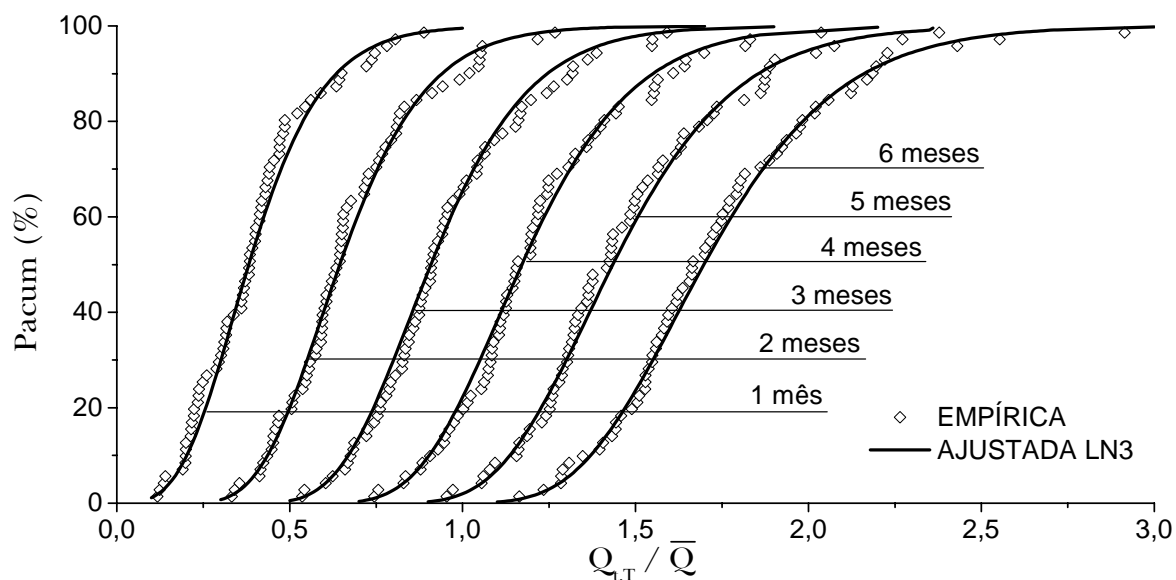


Figura 6 – Comparação da distribuição de probabilidade para $Q_{t,T}$

A construção das curvas de regularização, resultado da equação (4), é ilustrada na Figura 7 para vários tempos de retorno iguais ou superiores a 2 anos. Tanto a abscissa quanto a ordenada são apresentadas na forma adimensionalizada pela vazão média de longo termo. Através da curva de regularização conclui-se que quanto maior o tempo de retorno, ou seja, menor a probabilidade de

falha, maior o volume útil do reservatório necessário para regularizar uma determinada vazão. Observou-se que o final da curva para cada tempo de retorno de até 2 anos não acompanha a tendência para tempos de retorno superiores. Isto se deve ao fato de que a vazão média anual adimensional para tempos de retorno inferiores a 2 anos é superior ao valor de q_T para o mesmo TR. Desta forma, para os dados deste estudo, para TR menores do que 2 anos a curva de regularização pode ser definida até níveis de regularização q_F superiores a 1.

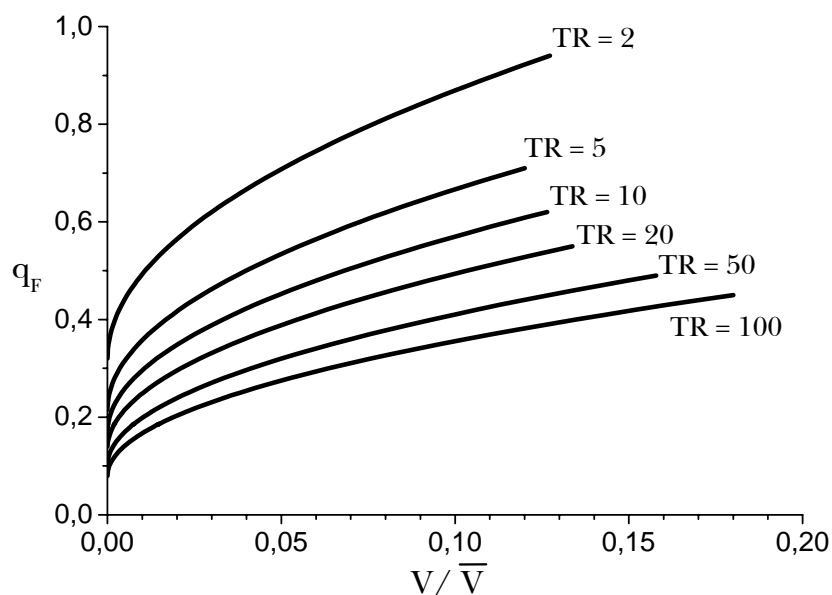


Figura 7 – Curva de regularização pelo método de Gomide

Uma observação interessante é que para os tempos de retorno avaliados (até 100 anos) o limite de validade da curva foi definido pela vazão média anual com mesmo TR. Em todos os casos a duração da estiagem foi menor do que 12 meses. Todavia, para TR superior a 6 anos o final da curva de regularização já é definido para durações de estiagem superiores a 6 meses. A validade da curva depende, portanto, da validade da extrapolação da equação (2) para durações de estiagem superiores a 6 meses. Tal fato não é evidenciado, visto que se constatou que as vazões médias de t meses de duração apresentam um comportamento aproximadamente parabólico se avaliados os 12 meses. A Figura A1 do Apêndice A ilustra este comportamento parabólico e a Figura A2 do mesmo Apêndice apresenta a curva de regularização considerando um ajuste parabólico às vazões médias de t meses de duração e realizando o mesmo procedimento adotado na construção das curvas da Figura 7. Em termos do valor máximo de q_F para o qual a curva de regularização é definida não houve diferença, visto que o valor limitante da curva continua sendo a vazão média anual com mesmo TR. No entanto, de modo geral, o volume necessário para um mesmo nível de regularização (q_F) diminuiu, em vista da mudança da curva das vazões médias de estiagem. A extrapolação da

equação (2) para durações de estiagem muito maiores do que 6 meses superestima as vazões de estiagem, de forma que o volume de regularização resultante deva ser maior. Isto pode ser observado pela Figura A1 (Apêndice A). O erro na análise com o ajuste parabólico das vazões médias de t meses de duração até 12 meses se deve ao fato de que o coeficiente de variação não é tão uniforme quanto na análise de apenas 6 meses (ver Tabela A1, Apêndice A), variando bastante a partir do mês dez. Desta forma, cometem-se erros maiores no ajustes.

Comparação com a Série Histórica

A partir da série histórica, pode-se para cada ano determinar o volume necessário para regularizar uma determinada vazão pelo método do máximo déficit acumulado. A partir de uma amostra de 70 dados (70 anos) é possível relacionar o volume a uma probabilidade de falha ou tempo de retorno. A Figura 8 ilustra a comparação dos resultados do método de Gomide (apresentados na seção anterior) com os dados obtidos a partir da série histórica. Observa-se uma aderência razoável para baixos níveis de regularização (q_F) e de maneira geral uma aderência melhor para tempos de retorno maiores do que 5 anos. A curva do método de Gomide apresenta diferenças maiores em relação aos dados históricos quanto maior o nível de regularização (q_F).

A Figura 9 ilustra a comparação dos métodos de forma alternativa, através de uma curva para cada nível de regularização e avaliando a probabilidade de sucesso (P_S) na ordenada e o volume adimensional de regularização na abscissa. Assim como observado na Figura 8 a aderência do método de Gomide aos dados históricos é melhor para baixos níveis de regularização.

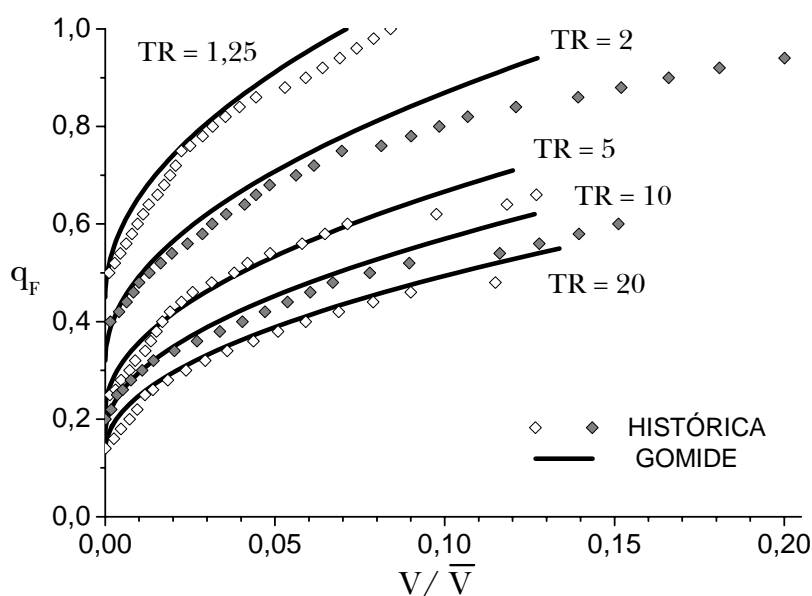


Figura 8 – Comparação da curva de regularização do método de Gomide e histórica

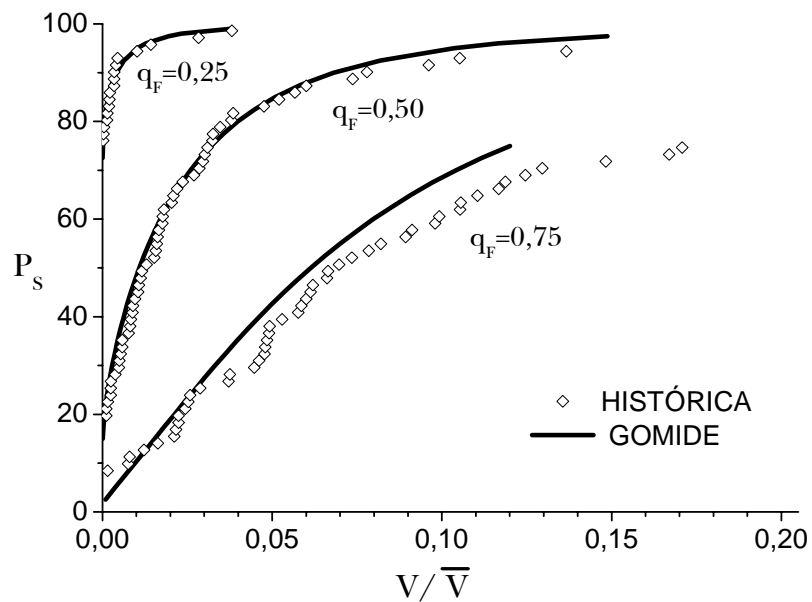


Figura 9 – Comparação alternativa do método de Gomide e histórico

Comparação com as Séries Sintéticas

A distribuição de probabilidade das vazões médias anuais se ajustou melhor à distribuição log-normal de três parâmetros. Os parâmetros obtidos pelas mesmas equações da Tabela 2 foram: $x_0 = 0,0656$, $\mu = -0,1304$ e $\sigma = 0,3538$. A Figura 10 ilustra a comparação das vazões anuais históricas e as obtidas mediante a distribuição de probabilidade ajustada aos dados. O coeficiente de correlação foi de 0,9879, o que garante um bom ajuste ao nível de significância de 5% pelo teste PPCC (Stedinger *et al.*, 1992).

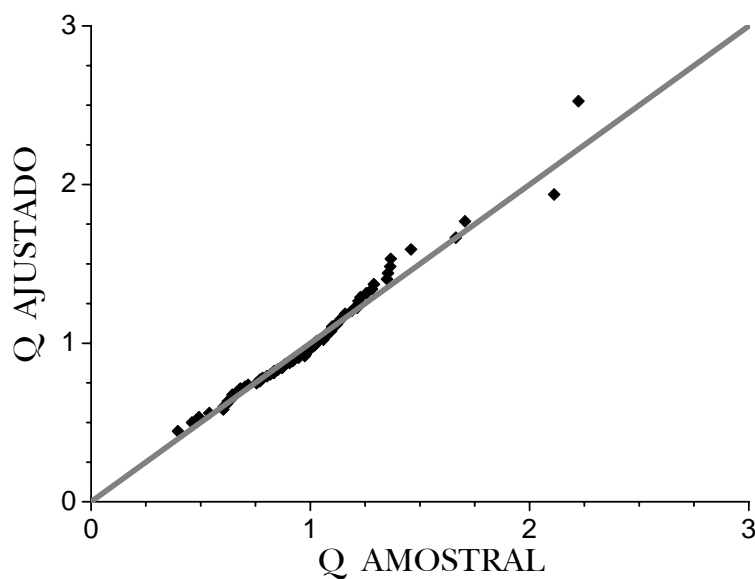


Figura 10 – Comparação do ajuste das vazões anuais

A Figura 11 ilustra a boa aderência entre a distribuição de probabilidade acumulada empírica e ajustada, enquanto a Figura 12 apresenta a comparação entre a distribuição massa de probabilidades ajustada e o histograma dos dados históricos.

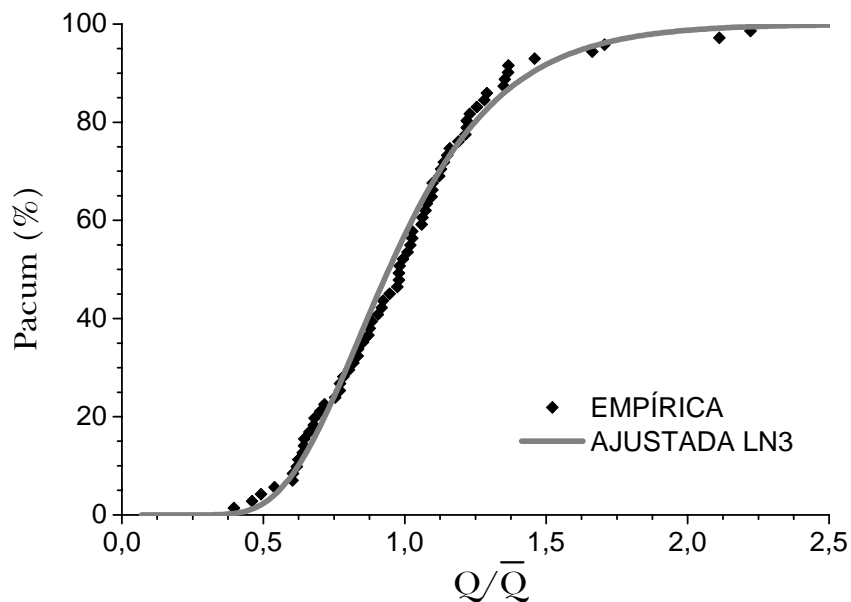


Figura 11 – Comparação da curva de probabilidade acumulada ajustada para q_T

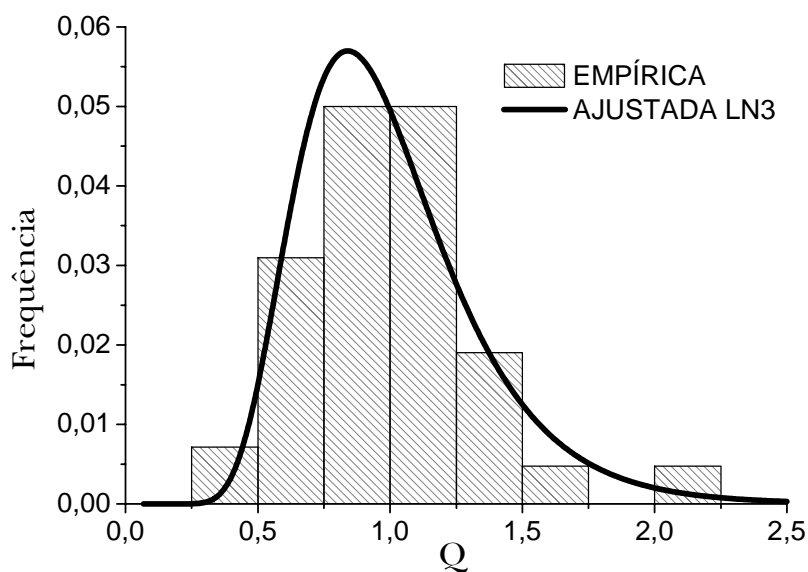


Figura 12 – Distribuição de probabilidade das vazões anuais

Uma vez que se deseja obter a regularização também dentro do ano as vazões anuais foram desagregadas em vazões mensais pelo método dos cenários hidrológicos descrito por Fill *et al.* (2011) e Groszewicz *et al.* (1991) e também descrito por Svanidze (1980) como método dos fragmentos. O método consiste basicamente em calcular para cada ano da série histórica a razão

entre as vazões mensais pela vazão média anual de tal forma que se obtém um número de cenários igual ao número de anos da série histórica, cada um composto de 12 fragmentos.

Para cada ano de cada série sintética sorteou-se um destes cenários, através de uma variável aleatória uniformemente distribuída. Após o sorteio foi verificada a compatibilidade da vazão do 12º mês do ano i com a vazão do 1º mês do ano $i + 1$. Considerou-se satisfatória a compatibilidade quando o valor ficou entre os valores máximo e o mínimo registrados na série histórica. Caso contrário sorteou-se outro cenário e repetiu-se até que a condição fosse satisfeita. Este processo garantiu maior reprodução da correlação entre os dois meses (dezembro-janeiro) evitando extremos de variações de vazões.

Foram geradas ao todo 10000 séries com um ano de extensão cada. Para cada uma delas foi calculado o máximo déficit acumulado de cada ano e os valores ordenados para construção da distribuição de probabilidades. A ordenação foi feita pelo algoritmo Shellsort (AZEREDO, 1996), uma vez que a grande quantidade de dados exige um algoritmo eficiente. Neste trabalho pode-se simplificar a equação (6) visto que foram gerados anos independentes, não correlacionados. Porém o programa desenvolvido para atividades futuras prevê geração de séries com diferentes extensões.

A Figura 13 apresenta a comparação das curvas obtidas pelo método do máximo déficit acumulado aplicado à série histórica e os resultados obtidos via simulação. A aderência do método de Monte Carlo aos dados históricos é boa, porém, com o aumento do nível de regularização (q_F) há um descolamento da curva em relação aos dados históricos.

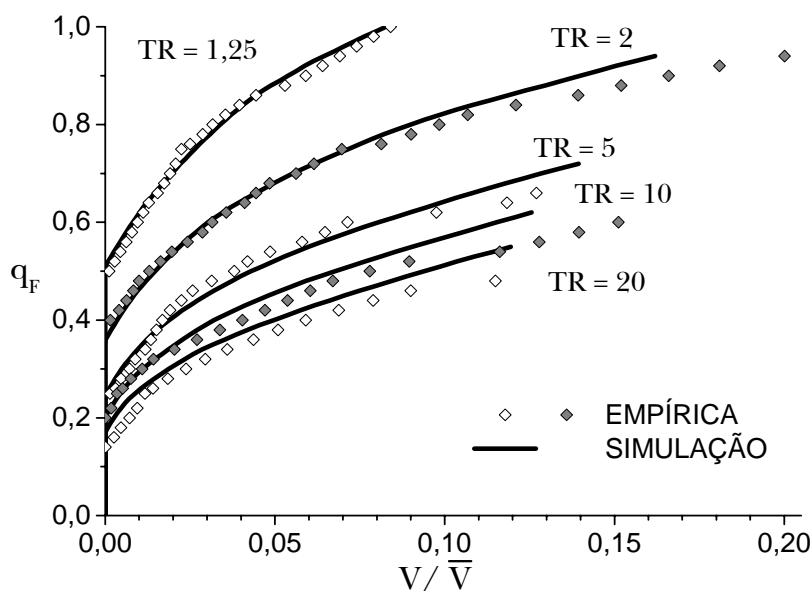


Figura 13 – Comparação da curva de regularização do método de Gomide e via simulação

A reprodução da simulação é boa uma vez que reproduz bem a distribuição de probabilidade dos coeficientes de desagregação utilizados. A Figura 14 ilustra as curvas de distribuição de probabilidade acumuladas dos coeficientes de desagregação (ou fragmentos) dos dados históricos e a distribuição acumulada dos valores sorteados durante a simulação para todos os meses. Para evitar a sobreposição das curvas os valores foram adicionados de 0,5 e 1,0 no valor da ordenada para os meses seqüentes ao primeiro.

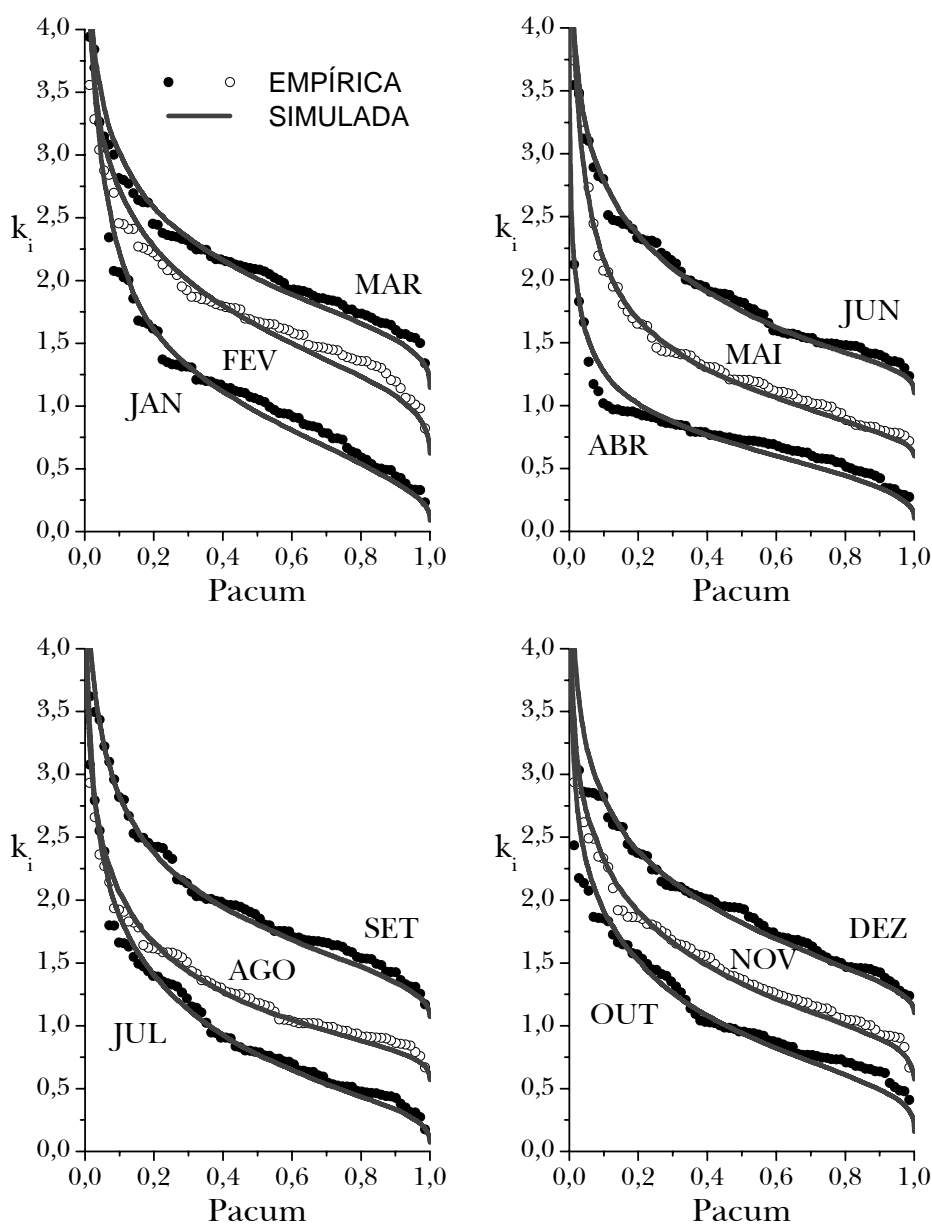


Figura 14 – Distribuição de probabilidade acumulada dos coeficientes de desagregação

A Figura 15 ilustra a comparação das curvas de regularização para diferentes tempos de retorno entre os resultados da simulação e os resultados do método de Gomide. Os métodos fornecem resultados similares apenas para tempos de retorno entre 5 e 20 anos e baixos níveis de

regularização. Tal característica é reflexo das simplificações adotadas no método de Gomide. Todavia, os resultados são muito bons como uma primeira aproximação devido à sua simplicidade e facilidade de implementação.

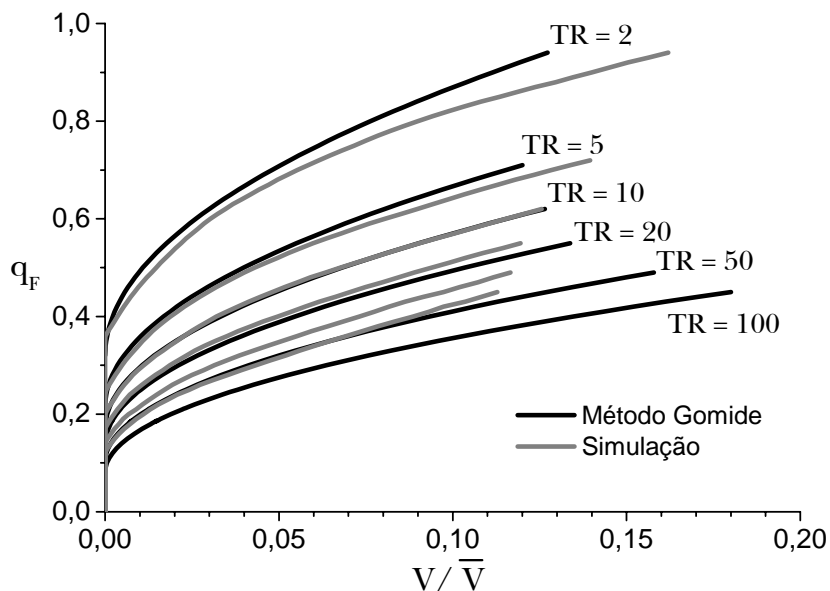


Figura 15 – Comparação da curva de regularização do método de Gomide e via simulação

Discussão Geral

O método desenvolvido por Gomide possui um grande potencial para construção das curvas de regularização de vazões intra-ano. A função objetivo e a construção da formulação matemática simples trazem segurança na aplicação do método. Simplicidade que também é importante para explicação do método e seus resultados a profissionais de outras áreas envolvidos em projetos de barragens e a tomadores de decisões. A comparação com a série histórica e com o método de simulação demonstra que para baixos níveis de regularização o método apresenta resultados similares àqueles aos quais foi comparado.

O método de Gomide apresenta algumas limitações e a mais óbvia é o objetivo do método que trata apenas de regularização de vazões dentro do ano. O tratamento dos dados para determinação do período crítico dentro do ano foi realizado avaliando-se vazões médias de t meses de duração. Independentemente se fossem analisados vazões mínimas de 30 dias consecutivos ou múltiplos de 30, a limitação do método é que não avalia períodos críticos menores do que um mês (ou 30 dias). Outra limitação, da forma como o método é apresentado, é a construção da função para a vazão média de estiagem de t meses de duração para até 6 meses. Portanto, quando o período crítico ultrapassa 6 meses de duração passa-se a confiar na extrapolação da função. Como

demonstrado a extrapolação interfere no resultado visto que a função contemplando 12 meses é aproximadamente parabólica. Esta limitação é facilmente contornada considerando uma função mais complexa, no entanto, há uma grande perda da simplicidade do método, a qual é sua principal virtude.

A estação analisada encontra-se na região sul do Brasil, cujas características do regime hidrológico são bastante distintas do restante do país. Na estação em questão não se observa um regime hidrológico bem definido, isto é, não há uma sazonalidade marcante das vazões. Em contrapartida, em muitas outras regiões do país como o sudeste é de reconhecida uma forte sazonalidade das vazões, marcadas por estações chuvosas e épocas de estiagem. Do ponto de vista do autor o método de Gomide apresentaria um desempenho muito superior em regiões com estas características, tendo em vista um regime hidrológico mais bem definido e a própria necessidade de regularização das vazões dentro do ano. Uma avaliação expedita com uma estação da região sudeste demonstrou as mesmas características de linearidade para vazões médias mensais de até 6 meses de duração e um comportamento parabólico para vazões médias com até 12 meses de duração. Todavia, a parábola apresenta concavidade invertida em relação à observada na estação do presente trabalho.

Uma próxima etapa do estudo dos autores com o método de Gomide é realizar avaliação similar à apresentada numa região marcada pela forte sazonalidade das vazões. Além disto, utilizar o método para determinar a regularização anual e “somar” o resultado da regularização pluri-anual obtida via teoria estocástica dos reservatórios.

CONCLUSÃO

O método de Gomide para regularização intra-anual de vazões, cuja principal virtude reside em sua simplicidade, apresenta resultados muito similares àqueles obtidos via simulação e através da série histórica pelo método do máximo déficit acumulado, apesar das claras limitações do método. O método permite a construção de curvas de regularização relacionadas a um tempo de retorno do insucesso.

APÊNDICE A

Tabela A1 – Estatísticas das séries de vazões de estiagem

	Período (meses)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
\bar{Q} (m ³ /s)	35,0	41,9	49,3	54,6	59,3	65,3	72,0	76,6	79,0	82,4	86,0	89,0
σ (m ³ /s)	15,4	18,1	21,0	23,3	26,0	28,8	33,1	34,0	33,8	32,2	31,4	30,4
Coef. de Variação	0,440	0,433	0,426	0,427	0,439	0,442	0,460	0,444	0,428	0,391	0,365	0,341

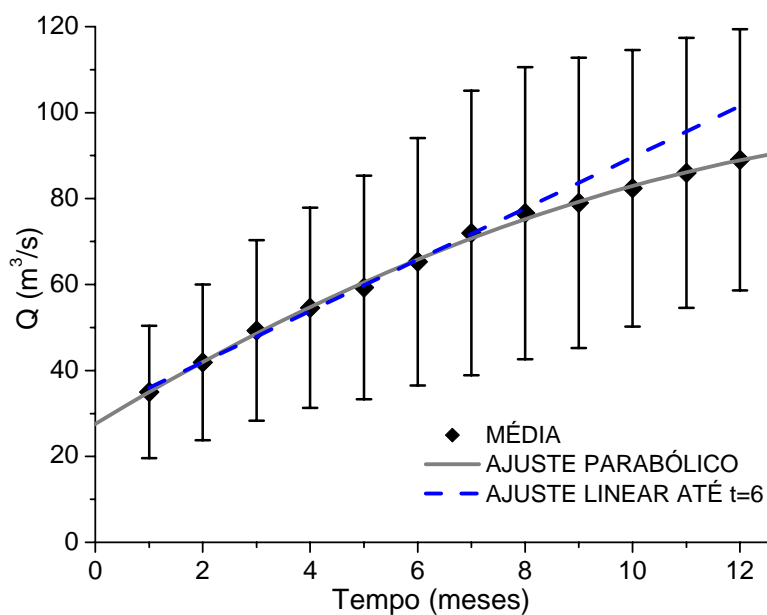


Figura A1 – Ajuste das vazões médias de t meses de estiagem até 12 meses

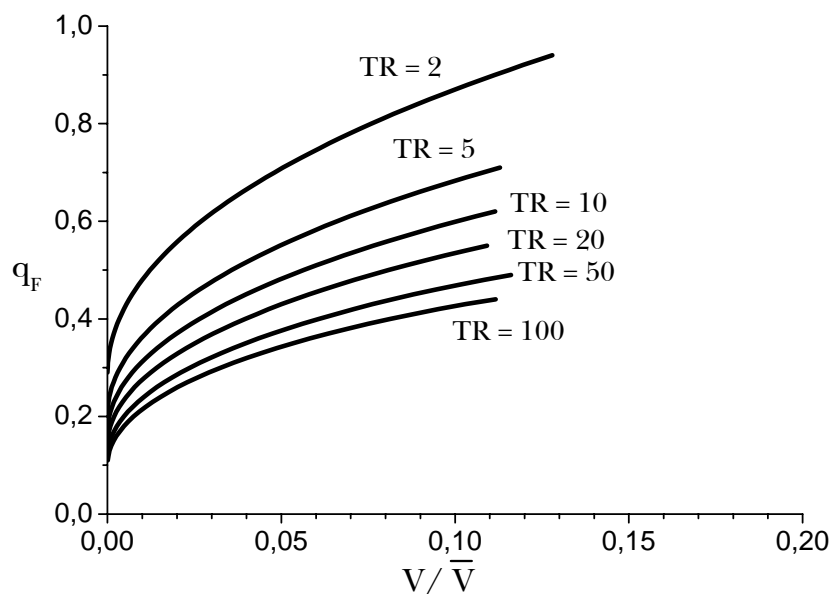


Figura A2 – Curva de regularização pelo método de Gomide com ajuste parabólico da vazões de estiagem

REFERÊNCIAS

- AZEREDO, P. (1996). *Métodos de Classificação de Dados e Análise de suas Complexidades*. Editora Campus.
- FILL, H. D. O. A., MINE, M. R. M., SANTANA, A. F. M. (2011). *Monthly precipitation model based in hydrological scenarios*. In: International Symposium on Climate Change and Water – ISCCW. 2011. Nanjing. Proceeding of the International Symposium on Climate Change and Water – ISCCW. NHRI. v1, pp. 1-10.
- GOMIDE, F. L. S. (1970). *Contribuição ao Estudo de Períodos de Estiagem*. In: Anais do IV Congresso LatinoAmericano de Hidráulica. IAHR. v.2, pp.25-36. Oaxtepec Morelos. México.
- GOMIDE, F. L. S. (1983). *Dimensionamento de Sistemas de Reservatórios*. In: Curso de Engenharia Hidrológica. V2 Hidrologia Operacional. EPUSP-DAEE. São Paulo.
- GOMIDE, F. L.S. (1986). *Teoria Estocástica dos Reservatórios Aplicada ao Planejamento de Sistemas Hidrelétricos*. Tese de Professor Titular. UFPR, Curitiba, Brasil.
- GROSZEWICZ, R. C.; KAVISKI, E.; MULLER, I. I.; MACHADO, J. F. P. (1991). *Avaliação de três métodos de desagregação de afluências*. In: IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, Brasil.
- KELMAN, J. (1987). *Modelos estocásticos no gerenciamento de recursos hídricos*. In: _____. Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos I. São Paulo: Nobel/ABRH. 1987, cap. 4.
- LANNA, A. E. (1993). *Elementos de Estatística e Probabilidades*. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: ABRH; UFRGS, p. 79-176.
- RAUDIKIVI, A. J. (1979). *Hydrology: An Advanced Introduction to Hydrological Processes and Modelling*. New York. Pergamon Press.
- STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M.; FOUFOULA-GEORGIU, E. (1992). *Frequency Analysis of Extreme Events*. In: _____. Handbook of Hydrology. New York: McGraw-Hill.