

# NOVOS MÉTODOS NO ENSINO DE TEMAS HIDROLÓGICOS

NEW METHODS IN HIDROLOGICAL THEMES TEACHING

Paulo Roberto Ferreira de Moura Bastos<sup>1</sup>, Kleber Freire da Silva<sup>2</sup>

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v41p385-396.2022

## RESUMO

Este artigo apresenta dois novos métodos didáticos a serem aplicados em estudos hidrológicos, o primeiro na confecção da curva de permanência de vazões e o segundo no dimensionamento dos volumes dos reservatórios. Ambos foram desenvolvidos a partir da experiência dos autores no ensino da disciplina Geração de Energia Elétrica. O método usado na confecção da curva de permanência de vazões foi adaptado de outro empregado no estudo das enchentes máximas, enquanto o novo, para o dimensionamento de reservatórios, está fundamentado na analogia com a necessidade de se regularizar retiradas de capital em empresas cujo fluxo de caixa é sazonal, visto que os problemas são similares. A prática em classe mostrou que os alunos entendem com maior facilidade e se mostram mais motivados. Essa segunda metodologia permite a rápida identificação de períodos críticos e do volume útil para regularizar determinada vazão. Inicia-se com exemplos didáticos e são feitas comparações para comprovar a eficácia dos novos métodos. Mostra-se como o desvio padrão das vazões influencia no formato da curva de permanência e no volume de armazenamento para regularizar determinada vazão. Ao final, apresentam-se as conclusões.

**Palavras-chave:** estudos hidrológicos; curva de permanência; regularização de vazões; período crítico.

## ABSTRACT

In this work, two new methods are presented to be applied in hydrological studies, the first applied in the construction of the flow permanence curve, and the second one in the dimensioning of the reservoir volumes. Both were developed from the experience of authors in teaching the subject of Electricity Generation. The method used in making the flow permanence curve was adapted from another method used in the study of maximum floods, while this new one, proposed to dimensioning reservoirs, is based on the analogy with the need to regularize capital withdrawals in companies whose cash flow is seasonal, since the problems are similar. Class practice has shown that students understand more easily and are more motivated. This second methodology allows the quick identification of critical periods and the useful volume to regularize a given flow. It starts with didactic examples and comparisons are made to prove the effectiveness of these new methods. It is shown how the standard deviation of flow values influences the shape of the flow permanence curve and the required storage volume to regulate a given flow. Finally, the conclusions are presented.

**Keywords:** hydrological studies; flow permanence curve; flow regularization; critical period.

<sup>1</sup> Prof. Dr. Associado, aposentado, da Universidade Federal da Bahia; pbastos@ufba.br

<sup>2</sup> Prof. Dr. Titular do DEEC da Universidade Federal da Bahia, Doutor; kfreire@ufba.br

## INTRODUÇÃO

A curva de permanência, ou curva de duração, é bastante utilizada em diversas áreas da engenharia, como em estudos de confiabilidade em que, por exemplo, a curva de permanência da carga máxima de um sistema permite identificar qual a probabilidade ou em qual o percentual do tempo que determinada carga será excedida. Este artigo trata da curva de permanência aplicada em estudos hidrológicos e hidroenergéticos, em especial no cálculo da potência firme e da energia firme das usinas hidrelétricas a fio d'água. A curva de permanência relaciona a vazão e a probabilidade de ocorrerem valores iguais ou superiores sobre todo o período histórico utilizado para sua construção (CRUZ; TUCCI, 2008; ELETROBRÁS, 1982). A confecção da curva de permanência requer o uso de um programa específico de estatística, ou a determinação dos valores, máximo e mínimo, dos intervalos, frequência dos eventos em cada intervalo, cálculo da frequência acumulada, enfim, o rigor do tradicional método estatístico para determinação da distribuição de frequência.

Nos manuais para projetos de pequenas centrais e de minicentrais hidrelétricas, elaborados pela Eletrobrás na década de 1980, no que diz respeito à determinação das “vazões de projeto da estrutura extravasora e de desvio” (ELETROBRÁS, 1982, 1985), há uma expressão matemática para a posição de plotagem de cada evento. Aqui se adaptou tal expressão para facilitar a elaboração, de forma didática e de fácil compreensão, da distribuição de frequência de um histórico de eventos, sendo traçada a curva de permanência por meio de uma planilha eletrônica.

Este trabalho tem uma motivação principal calcada nos desafios do Ensino de Engenharia, em proporcionar aos alunos, além da compreensão sólida dos fundamentos da engenharia, o contato com aplicações em sistemas reais (OVERBYE, 2009). Vários trabalhos estão sendo publicados nos últimos anos visando a facilitar essa solidificação dos conhecimentos no Ensino de Engenharia, em particular na área de Sistemas Elétricos de Potência (BARATA; FILHO; NUNES, 2015;

MEEGAHAPOLA; THILAKARATHNE, 2019; SHAHNIA; MOGHBEL; YENGEJEH 2016), incluindo a aplicação de aprendizado ativo (HOSSEINZADEH; HESAMZADEH, 2012; HU; LI; CHEN, 2015).

Em estudos hidrológicos, o dimensionamento de reservatórios requer a identificação de períodos críticos, a decisão relativa à regularização anual ou plurianual, e a análise de outros fatores como as restrições devido a alagamento de aeroportos, cidades, sítios arqueológicos, áreas de preservação ambiental, enfim, instalações que possam inviabilizar o aproveitamento. Desse modo, por vezes, o problema se apresenta com outra face: sabe-se qual a cota máxima a atingir função da inundação admissível, determina-se o volume possível do reservatório e, então, identifica-se qual seria a vazão regularizada, conhecida uma série histórica de vazões. Os métodos tradicionalmente mais usados são o “Diagrama de Massa” ou “Diagrama de Rippl” (SOUZA; FUCKS; SANTOS, 1983) e o “método das diferenças totalizadas” (SCHREIBER, 1978).

Para o desenvolvimento do método ora proposto, muito contribuiu a experiência de sala de aula dos autores, buscando analogias e exemplos de fácil assimilação pelos alunos. Como em geral todos entendem um pouco de economia e da regularização de uma retirada constante em dinheiro a partir de fluxo de recursos financeiros sazonal, inicia-se propondo uma boa analogia entre o fato de se ter recursos financeiros acumulados de modo a regularizar uma retirada de dinheiro constante durante um período de necessidade e haver um volume de água armazenado que possibilite a regularização de vazões em aproveitamentos hidrelétricos.

Introduz-se o tema propondo exercícios de regularização de retiradas constantes de quantia para suprir necessidade de gastos do dono de uma empresa cuja receita é sazonal, a exemplo de hotéis, restaurantes em locais de veraneio ou indústrias cujos produtos são típicos de uma época determinada, como as festas de Natal ou Páscoa. É fácil determinar o período crítico e a necessidade de haver um capital acumulado imediatamente antes desse período para fazer frente às retiradas constantes.

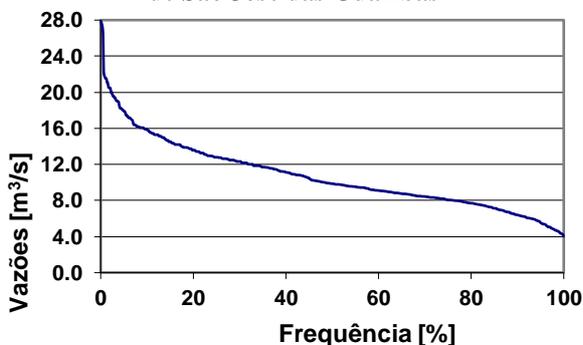
Aplica-se este novo método didático à regularização de vazões e dimensionamento de reservatórios, destacando-se como esses problemas se apresentam. Alterando-se propositalmente a série de dados, vê-se como o desvio padrão das vazões influencia na forma da curva de permanência e no volume útil necessário para regularizar determinada vazão. Por fim, apresentam-se as conclusões.

## NOVO MÉTODO PARA ELABORAÇÃO DA CURVA DE PERMANÊNCIA

### A curva de permanência

A curva de permanência de vazões é muito usada nos estudos hidrológicos. Em geração de energia elétrica nos estudos hidroenergéticos, essa curva é usada na determinação da potência firme e da energia firme em aproveitamentos a fio d'água. A curva de permanência, ou de duração das vazões, ou ainda curva de frequência, é um gráfico que relaciona nas ordenadas as vazões (em  $\text{m}^3/\text{s}$ ) e nas abscissas o percentual do tempo total do histórico das vazões em determinado posto fluviométrico ou no local da usina. Tais vazões podem ser médias diárias, mensais ou anuais. A Figura 1 mostra a curva de permanência das vazões para o estudo do aproveitamento de São José das Guaribas, no rio do Ouro, afluente do rio Preto, no Oeste da Bahia (BASTOS, 2002).

Figura 1– Curva de permanência do aproveitamento de São José das Guaribas



Fonte: acervo dos autores.

Para a curva da Figura 1 foi tomado o histórico das vazões médias mensais desde 09/1941 a 02/1999 (média mensal de longo

termo de  $10,7 \text{ m}^3/\text{s}$  e desvio padrão  $3,82 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Vê-se que a vazão com frequência de 80% corresponde a  $7,7 \text{ m}^3/\text{s}$ , o que significa que tal vazão tem a probabilidade de 80% de ser excedida naquele período (em hidrologia, refere-se a essa vazão como  $Q_{80\%}$ ). Nos estudos hidroenergéticos de pequenas centrais hidrelétricas a vazão correspondente à potência firme é determinada com  $Q_{95\%}$ .

### Descrição e aplicação do novo método

Em geral, elabora-se a curva de permanência usando um programa específico ou um método estatístico para determinação da distribuição de frequência e da frequência acumulada. O novo método didático aqui proposto é uma adaptação daquele utilizado no cálculo das enchentes máximas (ELETROBRÁS, 1985), sendo ótimo para ser feito em sala de aula, seguindo estes passos:

- listar os dados de vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) em uma coluna (“Vazões”), que podem ser as médias diárias, mensais ou anuais. Por exemplo, sendo vazões diárias de dois anos, são enumeradas trinta e uma médias dos dias de janeiro, seguidas das médias dos dias de fevereiro, etc., e se relativas a dois anos (24 meses) há um total de 730 linhas (dois anos não bissextos);
- ordená-los em ordem decrescente (o maior valor de vazão assumirá o topo da sequência de dados, e a menor vazão estará em último lugar, o mais inferior);
- criar uma coluna indicativa da posição da série, ou seja, da posição de ordem do evento ( $P_i$ ). Inicia-se com o valor um, dois na linha seguinte, depois três, etc., e neste exemplo, para dois anos, o último registro é 730;
- criar uma nova coluna indicativa da frequência acumulada do evento, que corresponde a sua posição de plotagem. Aplica-se a expressão:

$$F_{ac} = \frac{100}{P_N} \cdot (P_i - 0,5) \quad (1)$$

na qual:  $F_{ac}$  é a frequência acumulada, ou a posição de plotagem da frequência

relativa a cada evento;  $P_i$  é o número de ordem do evento, ou posição de ordem do evento  $i$ ;  $P_N$  é o número total de eventos da série estudada, no caso deste exemplo, é 730.

- e) Inserir um novo gráfico na planilha em que nas ordenadas estão as vazões e na abscissa o percentual do tempo, evoluindo de 0 até 100%.

Exemplifica-se construindo a curva de permanência das vazões afluentes médias mensais da Usina Hidrelétrica (UHE) de Sobradinho, localizada no rio São Francisco, referente a quatro anos (2010 a 2013), com dados disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2015), como mostra a Tabela 1.

Conforme os passos da metodologia proposta, cria-se a coluna “vazões” e são inseridos os dados (48 linhas), depois eles são selecionados e ordenados em ordem decrescente (estes são os passos “a” e “b”).

**Tabela 1 – Vazões afluentes na Usina de Sobradinho, em m<sup>3</sup>/s (ONS, 2015)**

Meses	2010	2011	2012	2013
Jan	3.459	4.656	5.948	1.662
Fev	1.939	2.947	5.205	3.586
Mar	2.642	4.010	2.120	1.762
Abr	2.701	5.080	2.114	2.857
Mai	1.289	1.881	1.251	1.383
Jun	1.025	1.232	1.221	1.127
Jul	815	1.036	904	843
Ago	690	804	755	755
Set	683	737	653	605
Out	831	973	554	671
Nov	1.794	1.272	1.559	903
Dez	3.086	3.635	2.143	2.842

Fonte: elaborada pelos autores.

Depois, inicia-se a nova coluna indicativa da posição de ordem do evento (neste caso, coluna com números crescentes de 1 a 48, correspondendo assim ao passo “c”). Usa-se a expressão indicada no passo “d” e se cria a

coluna da frequência acumulada ( $F_{ac}$  ou da posição de plotagem do evento). Assim, ao lado da vazão máxima de 5.948 m<sup>3</sup>/s a  $F_{ac}$  é 1,042; para a segunda vazão em ordem decrescente, 5.205 m<sup>3</sup>/s, posição de ordem 2 ( $P_i = 2$ ), corresponde a  $F_{ac}$  igual a 3,125. A Tabela 2 mostra como ficam as primeiras e últimas linhas da planilha.

**Tabela 2 – Algumas linhas da planilha do exemplo**

Frequência acumulada (%)	Vazões Q (m <sup>3</sup> /s)	Posição de ordem do evento (P)
1,042	5.948	1
3,125	5.205	2
5,208	5.080	3
XXX	xxx	xxx
96,875	605	47
98,958	554	48

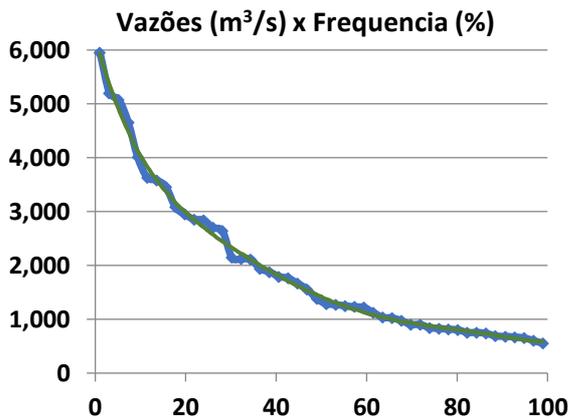
Fonte: elaborada pelos autores.

Usando-se o método estatístico tradicional, a frequência correspondente à vazão mínima seria 100%, ou a certeza de que haveria uma vazão maior; já neste, o valor de 0,5 no parêntesis de (1) introduz uma pequena possibilidade de incerteza.

Por fim, basta selecionar a coluna da frequência acumulada,  $F_{ac}$ , e a coluna das vazões e criar o gráfico. A Figura 2 mostra a curva de permanência obtida, em que também é inserida a curva de tendência, em tom claro (vermelho).

A seguir, apresenta-se a influência da dispersão das vazões na curva de permanência. As vazões do período 2010~2013 indicadas na Tabela 1 têm média de 1.930 m<sup>3</sup>/s e desvio padrão de 1.376 m<sup>3</sup>/s.

**Figura 2 – Curva de Permanência para 4 anos de vazões na UHE de Sobradinho**



Fonte: acervo dos autores.

Propositadamente foram alterados alguns dados de vazão da série anterior de modo a manter a mesma média e diminuir a dispersão, ou seja, reduzindo o desvio padrão. A mudança resulta em dados como os vistos na Tabela 3.

**Tabela 3 – Vazões afluentes em Sobradinho (m<sup>3</sup>/s), mudadas para obter menor dispersão**

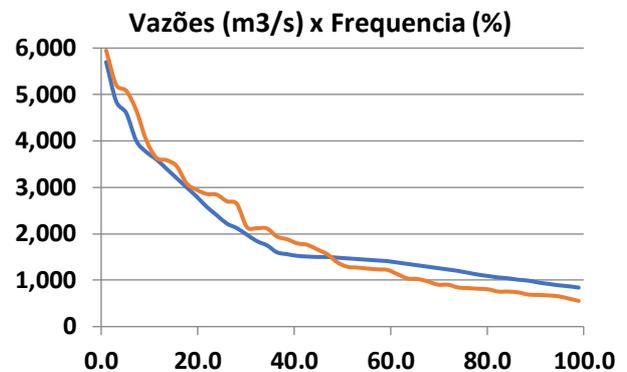
Meses	2010	2011	2012	2013
Jan	3.200	4.000	5.700	1.500
Fev	1.600	2.800	4.850	3.400
Mar	2.120	3.760	1.840	1.510
Abr	2.220	4.600	1.750	2.580
Mai	1.470	1.560	1.440	1.495
Jun	1.320	1.425	1.410	1.380
Jul	1.120	1.350	1.260	1.200
Ago	990	1.090	1.060	1.040
Set	950	1.010	890	870
Out	1.160	1.290	840	920
Nov	1.525	1.455	1.500	1.230
Dez	3.000	3.600	1.980	2.400

Fonte: elaborada pelos autores.

Esses novos dados com vazões alteradas apresentam valor máximo de 5.700 m<sup>3</sup>/s, mínimo de 840 m<sup>3</sup>/s, e o desvio padrão é 1.154 m<sup>3</sup>/s. A Figura 3 apresenta em azul a curva de permanência dessas novas vazões e em vermelho a curva relativa às vazões originais.

Observa-se na Figura 3 que a curva relativa às novas vazões é mais plana (em azul) que a curva com maior desvio padrão, especialmente entre as frequências de 36% a 90%.

**Figura 3 – Curvas de Permanência de vazões em Sobradinho, séries com distintos desvios padrão**



Fonte: acervo dos autores.

## NOVO MÉTODO DIDÁTICO PARA CÁLCULO DE VOLUME DE RESERVATÓRIOS

### O método aplicado a fluxo financeiro e retiradas constantes

Da experiência didática apresentando os métodos para regularização de vazões, como o do diagrama de massas ou Rippl (SOUZA; FUCKS; SANTOS, 1983) e o das descargas totalizadas (SCHREIBER, 1978), objetivando facilitar o entendimento pelos alunos, vislumbrou-se uma analogia com situações de fluxo financeiro sazonal.

Há anos que a mídia responsabiliza os reservatórios das usinas hidrelétricas por problemas ambientais, porém os reservatórios que acumulam água para abastecimento humano ou para irrigação têm uma mesma finalidade, qual seja acumular os excessos de água do período úmido para regularizar retiradas de água no período seco.

Na agricultura quando há uma grande safra, procura-se acumular o excedente em silos para enfrentar a entressafra ou incertezas futuras.

Em cidades históricas e litorâneas, em geral, o fluxo de turistas é maior na alta do que na baixa estação. A analogia facilita a

identificação de um “período crítico” e como enfrentá-lo. Sabe-se que a receita em um empreendimento localizado em zona turística é sazonal e conseqüentemente o lucro líquido, embora as despesas e as necessidades dos proprietários do negócio venham a requerer uma retirada constante de recursos. Apresenta-se como expor de forma mais didática o tema em discussão em aula: o método é progressivamente construído em conjunto com os alunos, de forma participativa e dinâmica. Inicia-se mostrando que o fluxo das vazões é análogo ao fluxo do lucro líquido mensal (ou diário) da empresa, uma Pousada, nos últimos dois anos, e tais dados são mostrados na segunda coluna da Tabela 4.

Propõe-se à turma que encontre o lucro médio, além do período de baixa estação; isso é, os meses com menores faturamentos e lucros, tal que o lucro líquido seja inferior ao médio. Para os dados da Pousada, cujos lucros líquidos mensais hipotéticos estão na Tabela 4, a média é R\$20.000,00, calcula-se em classe. Destaca-se que, em estudos hidrológicos, as séries históricas são grandes e que a “vazão média de longo termo” é análoga ao lucro médio.

Para identificar o período de baixa estação são calculadas as diferenças entre o lucro líquido do mês indicado e a média do período, em reais, aqui indicado na Tabela 4, 3ª coluna. Visando a facilitar a compreensão do significado do período crítico, expõe-se que o período de baixa estação (seco, para vazões) são os meses cuja diferença em relação à média é negativa, assim são identificados os meses de maio e junho, além do período de agosto a novembro do primeiro ano. Contudo, alerta-se que, no primeiro ano o “período seco” compreende desde maio até novembro, visto que o saldo positivo de R\$8.200,00 em julho não seria suficiente para recompor as reservas, ou, na analogia com hidrologia, não possibilitaria encher de novo o reservatório.

Nessa série há dois períodos secos: de maio até novembro, no primeiro ano, e de abril a novembro, no segundo. O período crítico é o pior deles. Vê-se que em julho, de ambos os anos, o lucro líquido excedeu à média, mas nos meses seguintes o déficit supera o saldo do referido mês, logo ambos os meses de julho fazem parte dos períodos secos.

**Tabela 4 – Lucro líquido mensal da empresa e as diferenças em relação à média (em R\$)**

Mês	Lucro líquido (R\$)	Diferença em relação à média
Jan/ano1	39.600	19.600
Fev	36.000	16.000
Mar	30.600	10.600
Abr	20.040	40
Mai	10.800	-9.200
Jun	7.200	-12.800
Jul	28.200	8.200
Ago	17.160	-2.840
Set	12.600	-7.400
Out	10.800	-9.200
Nov	10.200	-9.800
Dez/ano1	28.800	8.800
Jan/ano2	37.800	17.800
Fev	34.800	14.800
Mar	24.000	4.000
Abr	14.400	-5.600
Mai	9.600	-10.400
Jun	7.800	-12.200
Jul	29.400	9.400
Ago	16.200	-3.800
Set	7.200	-12.800
Out	9.000	-11.000
Nov	13.800	-6.200
Dez/ano2	24.000	4.000

Fonte: elaborada pelos autores.

Em seguida, propõe-se a questão: qual volume acumulado de recursos seria necessário para garantir que a retirada mensal ao longo do tempo seja igual à média? Intuitivamente, na busca pela solução, os alunos somam o total de déficit do lucro em cada um dos períodos secos e encontram R\$43.040,00 para o período do primeiro ano e R\$52.600,00 para o do segundo

ano. Conclui-se que o período crítico para o dimensionamento é abril a novembro do ano 2. Alerta-se que mesmo nas séries históricas de vazões com muitos dados, identifica-se o período crítico (o pior período seco da série).

Para enfatizar a analogia com o cálculo de volume de reservatórios, demonstra-se que caso se inicie uma baixa estação similar à do histórico e ao final de março se dispusesse de R\$52.600,00 acumulados em banco ou em cofre, ao final do período o saldo seria nulo, similar ao reservatório vazio. Mostra-se inserindo uma coluna com o saldo acumulado (+) no mês anterior ao início do período crítico, aqui R\$52.600,00 ao final de março do ano 2, e considera-se uma “situação de projeto” em que os lucros da baixa estação seriam aqueles do período crítico. Acompanha-se a redução mensal dos recursos armazenados: na nova coluna os valores acumulados ao final dos meses seguintes correspondem ao saldo anterior somado ao lucro líquido do mês menos a retirada do mês, ver Tabela 5.

**Tabela 5 – Acompanhamento dos recursos acumulados para regularizar a retirada (R\$)**

Meses Ano 2	Lucro líquido	Retirada	Recursos acumulados
Mar	24.000	20.000	+52.600,
Abr	14.400	20.000	47.000,
Mai	9.600	20.000	36.600,
Jun	7.800	20.000	24.400,
Jul	29.400	20.000	33.800,
Ago	16.200	20.000	30.000,
Set	7.200	20.000	17.200,
Out	9.000	20.000	6.200,
Nov	13.800	20.000	0,

Fonte: elaborada pelos autores.

Conforme o indicado na Tabela 5, neste caso, ao saldo do final de março do ano 2, soma-se R\$14.400,00 de lucro em abril e se subtrai a retirada (R\$20.000,00), restando R\$47.000,00 ao final de abril. Continua-se esta sequência de cálculo, ou algoritmo, até o último mês do

período crítico, encontrando-se saldo zero. Logo, com reservatório cheio no início do período crítico se chega ao volume útil zero no final, caso venha a se repetir no futuro essa pior série histórica, similar à depleção de reservatórios de regularização de vazões.

Para uso do método em classe, sugere-se empregar uma planilha na qual de início se cria a coluna “vazões” e nela são inseridos os dados históricos das médias mensais. Depois uma nova coluna relativa ao “volume afluente mensal” ( $m^3$ ) que em cada mês é o produto da vazão média ( $m^3/s$ ) pelo tempo (s). Calculam-se as médias para as vazões e para os volumes afluentes. Passa-se ao cálculo dos valores da coluna que vai permitir identificar os períodos seco e dentre estes o crítico, que pode ser denominada coluna da “diferença em relação à média” (ou saldo/déficit), preenchida com a diferença dos volumes afluentes dos meses (coluna anterior) e sua média; para facilitar a visualização dos períodos secos os valores dessa coluna são formatados de modo que os valores negativos estejam em vermelho. Por fim, caracterizados os períodos secos, faz-se o somatório do déficit de cada período e aquele de maior valor absoluto é o crítico.

Matematicamente, o volume de déficit acumulado em um período seco composto por “k” meses pode ser dado por:

$$V_{DEFsec} = \sum_1^k V_{DEFi} \quad (2)$$

sendo:  $V_{DEFsec}$  o volume acumulado de déficit no período seco;  $k$  o número de meses do período seco; e,  $V_{DEFi}$  o volume de déficit do mês  $i$  em cada período seco.

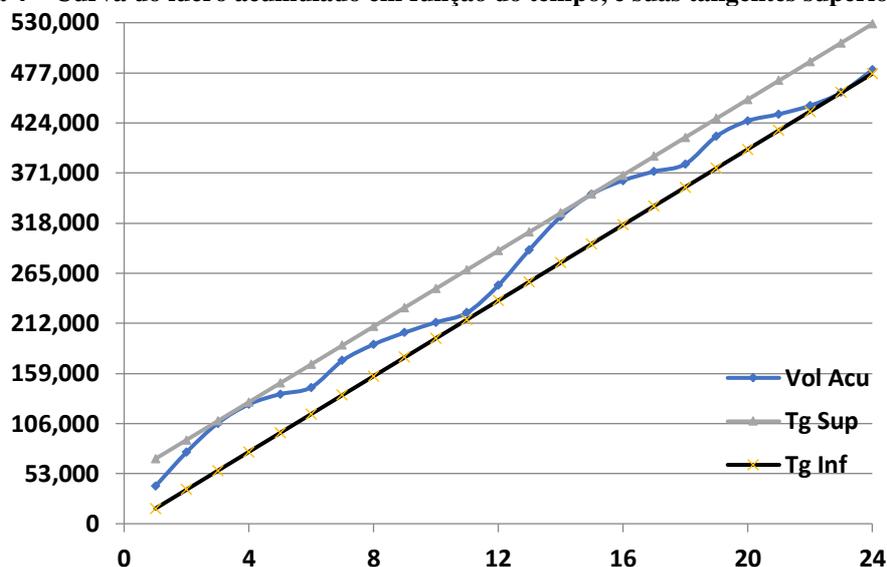
Os alunos devem observar que neste exemplo numérico se fez uma regularização anual, e no caso de reservatório se estaria dimensionando um cuja capacidade de regularização seria anual, isso porque há reservatórios plurianuais, aqueles com maior volume útil possibilitando regularizar uma vazão relativa a um período crítico que engloba mais de um ano.

Para comparação com os métodos tradicionais e usando essa série de lucro líquido, determina-se a necessidade de recursos para regularizar a retirada mensal igual à média

pelo método das descargas totalizadas (SCHREIBER, 1978). Basta que seja criada uma nova coluna na planilha acumulando os valores da coluna saldo/déficit, ou seja, somando sequencialmente os valores da diferença em relação à média mostrados na Tabela 4. Feito isso, devem ser pesquisados o máximo e o mínimo que são, respectivamente, R\$48.600,00 em março, do ano 2, e R\$-4.000,00 em novembro, do mesmo ano, sendo o volume de recursos necessários a soma dos módulos desses valores, que corresponde a R\$52.600,00.

Comparando-se com o método do diagrama de massa (SOUZA; FUCKS; SANTOS, 1983), fez-se o gráfico da Figura 4, no qual a curva em azul representa os lucros acumulados ao longo dos 24 meses. Para obter o volume de recursos para regularizar a saída média, são traçadas duas tangentes, a superior e a inferior, ambas com a inclinação média da curva em azul. Isso resulta no volume de recursos necessários igual a R\$52.600,00 (diferença nas ordenadas entre as tangentes em qualquer dos meses, em que, na Figura 4, tal valor é visto facilmente no décimo mês).

Figura 4 – Curva do lucro acumulado em função do tempo, e suas tangentes superior e inferior



Fonte: acervo dos autores.

Em classe, adverte-se logo que em hidrologia quase sempre é muito difícil regularizar a vazão média, pois conduz a reservatórios de volumes enormes.

Propõe-se aos alunos algo prático: qual o volume de recursos necessário a acumular caso se deseje apenas retirar mensalmente R\$16.000,00 (isto corresponde a regularizar 80% da média)? Logo algum aluno sugere iniciar uma nova coluna na planilha com a diferença entre o lucro líquido mensal e os R\$16.000,00 desejados como saída constante. Feito isto, identifica-se que no ano 1 só os meses de setembro/outubro/novembro compõem o período seco, enquanto no ano 2 o período seco continua sendo de abril a novembro (8 meses), e que, ao realizar a soma

dos déficits nesse período, resulta-se em R\$20.600,00 (sendo este o período crítico). Então é necessário se acumular R\$20,6 mil antes do período crítico para regularizar uma retirada mensal de R\$16 mil, neste exemplo.

Caso a própria turma de alunos não proponha uma expressão analítica, pode-se induzir mostrando que, para regularizar a média, o volume de recursos era R\$52.600,00, sendo 8 meses o período crítico e agora considerando menos R\$4.000,00 mensais a regularizar, isso totaliza R\$32.000,00. Portanto o volume de recursos para regularizar 80% da média seria correspondente a subtrair R\$32.000,00 (que agora não são necessários armazenar) de R\$52.600,00, e o resultado é R\$20.600,00, o mesmo da soma dos déficits.

Analiticamente isso corresponde à expressão:

$$V_N = V_{RM} - (L_m - L_n) \cdot NM_{pc} \quad (3)$$

na qual:  $V_N$  é o volume de recursos para regularizar a nova retirada de recursos;  $V_{RM}$  é o volume de recursos armazenados capaz de regularizar a média;  $L_m$  é a retirada média regularizada com o volume  $V_{RM}$ , igual ao lucro médio de longo termo;  $L_n$  é a nova retirada mensal de recursos; e  $NM_{pc}$  é o número de meses do período crítico.

Alerta-se que usando a expressão (3), deve-se certificar que para a nova retirada mensal  $L_n$ , o período crítico mantém o número de meses. Vê-se que, neste exemplo, o ano 1 teria seu número de meses do período seco reduzido de 7 para 3 meses. Por vezes, essa redução acontece no período crítico; mas a analogia com a regularização de vazões inferiores à média de longo termo é adequada.

Por fim, acrescenta-se que em hidrologia, por vezes, o volume do reservatório é conhecido, volume útil “X”, e caso este esteja disponível no início do período crítico qual vazão poderia ser regularizada? Para solução, aplica-se a expressão (3), determinando-se o valor de  $L_n$  sendo já conhecido  $V_N$ .

### O método aplicado ao volume de reservatórios para regularização de vazões

O novo método didático deve ser aplicado para o cálculo de um reservatório de regularização anual que permita regularizar a vazão média mensal dos quatro anos da série que compreende os anos 2010~2013 apresentada na Tabela 1 (segunda seção), cuja média é 1.930,0 m<sup>3</sup>/s e desvio padrão 1.376,1m<sup>3</sup>/s.

Para determinar a solução, o raciocínio é similar ao que foi feito com recursos financeiros: análogo ao lucro líquido mensal é o volume afluente no mês, entretanto, como aqui se dispõe de vazões, há que multiplicá-las pelo tempo médio mensal para se obter os volumes afluentes. Dessa forma, cria-se uma planilha em que as vazões médias mensais dos

quatro anos são colocadas em uma coluna, e em uma célula específica determina-se o número médio de segundos dos meses, aqui tomados todos com 30 dias, portanto 2,592x10<sup>6</sup>s. Numa segunda coluna ( $V_{afl}$ ) são calculados os volumes afluentes mensais, produto do citado tempo em segundos pelas vazões médias de cada mês, obtendo-se em sequência a média desses volumes ( $V_m$ ) 5.002,6x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

Em outra coluna são calculados os valores das diferenças entre os volumes afluentes mensais ( $V_{afl}$ ), valores da 2ª coluna, e a média ( $V_m$ ) destes. Sugere-se formatar essa coluna de modo que os valores negativos fiquem em vermelho, resultando em algo análogo ao que está na última coluna da Tabela 4 realizada no exemplo financeiro.

Por fim, são pesquisados os períodos secos de cada ano (meses consecutivos com valores negativos) com os respectivos volumes de déficit. Obtém-se um valor de -16.544,7 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> para o período seco de 2010, o valor de -17.283,5 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> para o período de maio/12 a janeiro/13, e -18.722,0 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> referente ao período seco de 2013 (maio a novembro). Portanto, esse último é o período crítico (pior entre os períodos secos da série). Assim, o volume útil necessário para regularização anual da vazão média de 1.930,0 m<sup>3</sup>/s é 18.722,0 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

De modo similar ao que foi realizado no exemplo financeiro, demonstra-se que caso se disponha desse volume útil no mês imediatamente anterior ao início do período crítico e repetindo-se a série histórica de vazões do período crítico, ao final do mês o reservatório terá deplecionado completamente, estando vazio. Então, a Tabela 6 apresenta para os meses de abril a dezembro/2013 os valores da vazão, do volume afluente e das diferenças entre os volumes afluentes e o médio, calculados neste exemplo. A soma dos valores de maio a novembro (período crítico) da quarta coluna (diferenças negativas) é o volume útil necessário ao reservatório.

**Tabela 6 – Valores de vazão, volume afluente e outros referentes ao período crítico da série**

Mês de 2013	Q (m <sup>3</sup> /s)	V <sub>afl</sub> (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Diferença V <sub>afl</sub> – V <sub>m</sub> (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	V <sub>reservt</sub> (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Abr	2.857	7.405	2.402,8	18.722,0
Mai	1.383	3.585	-1.417,8	17.304,2
Jun	1.127	2.921	-2.081,4	15.222,8
Jul	843	2.185	-2.817,5	12.405,3
Ago	755	1.957	-3.045,6	9.359,7
Set	605	1.568	-3.434,4	5.925,3
Out	671	1.739	-3.263,3	2.622,0
Nov	903	2.341	-2.662,0	0,0
Dez	2.842	7.366	2.363,9	2.363,9

Fonte: elaborada pelos autores.

A última coluna da Tabela 6 apresenta o acompanhamento mensal do volume do reservatório ( $V_{reservt}$ ), iniciando-se com a situação de reservatório cheio no mês anterior ao início do período crítico, acontecendo as mesmas vazões afluentes do período crítico (maio a novembro de 2013), e captando-se ou turbinando a média regularizada. Vê-se que ao final de novembro o volume útil seria nulo e em dezembro/13 começaria novamente a encher.

Outro problema: caso se deseje regularizar a vazão de 1.737 m<sup>3</sup>/s, que é 90% da média histórica, qual o volume útil do reservatório requerido? O procedimento para solução é similar, observando-se, entretanto, que a coluna da diferença entre volume afluente agora é em relação a 90% do volume médio mensal (4.502,3 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>). O pior período seco continua sendo de maio a novembro de 2013 e o volume útil requerido para o reservatório é 15.220,2 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, valor que poderia também ser determinado usando-se a expressão (3) readequada para volumes mensais afluentes e turbinados (em lugar do lucro médio e da retirada mensal de recursos).

Desejando-se uma regularização plurianual da vazão média de longo termo (1.930,0 m<sup>3</sup>/s), este novo método também pode ser usado e para os dados dessa série de 4 anos em Sobradinho o período crítico iria de maio/12 até

novembro/13, sendo o volume útil necessário do reservatório igual a 29.745,8 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. Para certificação, foram usados também os métodos das descargas totalizadas e do diagrama de massas, com os quais se obteve o mesmo resultado.

## INFLUÊNCIA DA DISPERSÃO DE VAZÕES NO VOLUME DO RESERVATÓRIO

Neste item, usam-se os dados de vazão da série histórica de quatro anos em Sobradinho já alterados na seção referente à elaboração da curva de permanência, para exercitar o cálculo de reservatório de regularização quando a série tem a mesma média, mas com menor dispersão, isto é, sendo as vazões médias mensais mais uniformes (menor desvio padrão). Tais dados das vazões afluentes em Sobradinho propositadamente alterados são vistos na Tabela 3, na seção anterior.

São seguidos os mesmos passos descritos na subseção relativa à determinação do volume útil do reservatório capaz de regularizar a vazão média, quais sejam: calculam-se os volumes afluentes mensais e a média destes, a coluna com as diferenças entre os volumes afluentes e a média, pesquisa-se entre essas diferenças as sequências com valores negativos que vão determinar o pior entre os períodos secos. Neste exemplo cujas vazões foram mudadas o período crítico que define o volume necessário para o reservatório vai desde março/2012 até janeiro de 2013, visto que embora a vazão em dezembro/12 seja superior à média que se deseja regularizar, já no mês seguinte, janeiro/13, o déficit é maior. Destaca-se que o período crítico é diferente daquele da seção anterior visto que a série de vazões é a modificada. Concluindo, para regularizar a vazão média, precisa-se de um reservatório cujo volume útil é de 14.941,8 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

Almejando-se regularizar a vazão de 1.737m<sup>3</sup>/s (90% da média histórica), os cálculos devem ser conduzidos da mesma forma descrita anteriormente. Verifica-se que o pior período seco é outro, maio a novembro/13, e o reservatório requer um volume útil de 10.437,0x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. Aqui, deve-se chamar a atenção da classe sobre o fato de que esse

volume de reservatório não pode ser calculado pela expressão (3) em virtude de se ter alterado o período crítico.

Vê-se, ao usar a série de dados modificada, tendo menor desvio padrão, que os reservatórios necessários tanto para a regularização anual da vazão média quanto para a vazão de 90% da média teriam volumes inferiores àqueles determinados no item anterior  $18.722,0 \times 10^6 \text{m}^3$  e  $15.220,2 \times 10^6 \text{m}^3$ , respectivamente.

Por fim, na hipótese de se desejar uma regularização plurianual da vazão média de longo termo,  $1930,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , o período crítico se estende desde março/12 até novembro/13, e o volume útil necessário é de  $24.478,2 \times 10^6 \text{m}^3$ . Observa-se que também aqui o volume útil necessário é menor do que aquele com regularização plurianual determinado da seção anterior.

Conclui-se que, realmente, sendo as vazões mais uniformes, os reservatórios de regularização de que se precisa para regularizar o mesmo valor de vazão são menores.

## CONCLUSÕES

Dois novos métodos didáticos foram apresentados para uso em estudos hidrológicos. Um que permite fácil e rapidamente a confecção da curva de permanência de vazões, e com o qual foram comparadas duas curvas de permanência, ficando evidente que aquela relativa a vazões mais uniformes, com menor desvio padrão, é mais plana, mais suave. O outro método inovador é utilizado na determinação de períodos críticos e no cálculo do volume útil necessário para reservatórios de regularização de vazões, inspirado na retirada constante de recursos em um problema financeiro típico de empresas com faturamento e lucro sazonais.

Demonstrou-se que esse último método é uma prática ativa de ensino, visto que pode ser desenvolvido em classe conjuntamente com os alunos, utilizando-se uma planilha eletrônica. Após a aplicação a uma série financeira cujos lucros mensais eram sazonais, foram realizados exemplos relativos a estudos hidrológicos, tanto para reservatórios de regularização anual

quanto plurianual, comparando-se os resultados com os métodos tradicionais.

Por fim, ficou demonstrado ainda que quando as séries de vazões são mais uniformes, para a regularização de uma mesma vazão são necessários reservatórios de menor capacidade.

## REFERÊNCIAS

- BARATA, P. N. A.; FILHO, M. R.; NUNES, M. V. A. Consolidating Learning in Power Systems: Virtual Reality Applied to the Study of the **Operation of Electric Power Transformers**. v. 58, n. 4, p. 255-261, 2015.
- BASTOS, P. R. F. de M. **Teoria do portfólio aplicada a pequenas centrais hidrelétricas**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, 2002.
- CRUZ, J.; TUCCI, C. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, p. 111-124, 2008.
- ELETROBRÁS. **Manual de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Eletrobrás/Ministério de Minas e Energia, 1982.
- ELETROBRÁS. **Manual de Mini Centrais Hidrelétricas**. Rio de Janeiro. Eletrobrás/Ministério de Minas e Energia, 1985.
- HOSSEINZADEH, N.; HESAMZADEH, M. R. Application of Project-Based Learning (PBL) to the Teaching of Electrical Power Systems Engineering. **IEEE Transactions on Education**, v. 55, n. 4, p. 495-501, nov. 2012.
- HU, Q.; LI, F.; CHEN, C. A Smart Home Test Bed for Undergraduate Education to Bridge the Curriculum Gap From Traditional Power Systems to Modernized Smart Grids. **IEEE Transactions on Education**, v. 58, n. 1, p. 32-38, fev. 2015.
- MEEGAHAPOLA, L. G.; THILAKARATHNE, C. Dynamic Learner-Assisted Interactive Learning Tools for Power Systems Engineering Courses. **IEEE Transactions on Education**, v. 62, n. 2, p. 149-156, 2019.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Série de Vazões Naturais Médias Mensais 1931-2013**. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/operacao/vazoes\\_naturais.aspx](http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx)>. Acesso em: 11 nov. 2015.

OVERBYE, T. J. Using research results for power system classroom education: A power flow and transient stability case study. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, PES '09, p. 9-11, 2009.

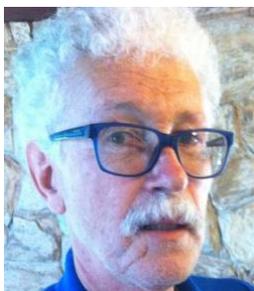
SCHREIBER, G. P. **Usinas Hidrelétricas**. Editora Edgard Blücher, Rio de Janeiro, 1978.

SHAHNIA, F.; MOGHBEL, M.; YENGEJEH, H. H. Motivating Power System Protection Course Students by Practical and Computer-Based Activities. **IEEE Transactions on Education**, v. 59, n. 2, p. 81-90, 2016.

SOUZA, Z. DE; FUCKS, R. D.; SANTOS, A. H. M. **Centrais Hidro e Termelétricas**. Itajubá: Editora Edgard Blücher, 1983.

---

## DADOS BIOGRÁFICOS DOS AUTORES



**Paulo Roberto Ferreira de Moura Bastos** – Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Bahia (UFBA, 1977), Especialista em Sistemas de Potência pela FUPAI, Mestre em Engenharia da Energia pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI, 2002) e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG, 2011). Trabalhou na Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia. Foi professor na Escola Politécnica da UFBA tendo lecionado na graduação várias disciplinas como Geração de Energia Elétrica, Sistemas Elétricos de Potência, Distribuição de Energia Elétrica, e outras em cursos de especialização e de extensão. Interesse atual em geração, sistemas elétricos e ensino da engenharia elétrica.



**Kleber Freire da Silva** – Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Bahia (UFBA, 1988), Mestrado pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB, 1991) e Doutorado em 2006 pela Universidade de São Paulo. Professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação (DEEC) da Escola Politécnica da UFBA, atuando nos cursos de graduação, pós-graduação e de especialização. Foi professor da Universidade Salvador, UNIFACS, lecionando na graduação e na pós-graduação. Atua na área de eficiência energética, qualidade da energia, controle e acionamento de máquinas elétricas, conversão eletromecânica de energia e geração de energia elétrica.