



NOVO MÉTODO PARA DETERMINAR VOLUMES DE RESERVATÓRIOS

1 INTRODUÇÃO

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 ou modificar o aproveitamento. Assim nem sempre a questão é "qual o reservatório que regulariza determinada vazão"? Por vezes o problema é: sabe-se qual a cota máxima a atingir função da inundação admissível, determina-se o volume possível do reservatório e, então, se identifica 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 et al, 1983) e o "método das diferenças totalizadas" (SCHREIBER, 1978).

Este trabalho tem uma motivação principal calcada nos desafios do ensino de engenharia, em proporcionar aos alunos uma sólida compreensão de temas fundamentais à engenharia, objetivando maior participação dos alunos em classe trazendo suas experiências e enfatizando analogias. Há vários trabalhos publicados recentemente visando essa solidificação dos conhecimentos no ensino de engenharia (MEEGAHAPOLA; THILAKARATHNE, 2019; SHAHNIA et al 2016), incluindo a aplicação de aprendizado ativo (HOSSEINZADEH; HESAMZADEH, 2012; HU et al, 2015).

Para o desenvolvimento do método ora proposto, muito contribuiu a experiência de sala de aula dos autores buscando analogias e exemplos fáceis para os 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 analogia entre o fato de 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. Deste modo, 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 o novo método à regularização de vazões e dimensionamento de reservatórios, destacando-se como estes problemas se apresentam. Depois, vê-se como o desvio padrão das vazões influencia no volume útil necessário para regularizar determinada vazão. Por fim apresentam-se as conclusões.

2 NOVO MÉTODO DIDÁTICO PARA CÁLCULO DE VOLUME DE RESERVATÓRIOS

2.1 O novo 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 et al, 1983), e o das descargas





totalizadas (SCHREIBER, 1978), objetivando facilitar o entendimento pelos alunos vislumbrou-se uma analogia com situações de fluxo financeiro sazonal.

Por exemplo, 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 colocar de forma mais didática o tema em discussão em aula, e assim durante aula expositiva 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, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - 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





Propõe-se à turma encontrar o lucro médio, além do período de baixa estação, isto 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 1, a média de R\$20.000,00 foi calculada 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 1, 3ª coluna. Visando a facilitar a compreensão do significado do período crítico coloca-se que 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 bastante de novo o reservatório.

Nesta 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.

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 da 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, se demonstra que caso se inicie uma baixa estação similar à do histórico e no final de março do ano 2 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.

Tabela 2 - 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,





Mostra-se na Tabela 2, inserindo uma coluna com o saldo acumulado (+) no mês anterior ao início do período crítico, aqui R\$52.600,00 no final de março do ano 2, e considera-se uma "situação de projeto" onde os lucros da baixa estação os mesmos 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.

Como indicado na Tabela 2, neste caso, ao saldo do final de março do ano 2 soma-se R\$14.400,00 de lucro em abril, e subtrai-se a retirada (R\$20.00,00) 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 esta 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 a "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 desta 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:

$$V_{DEFsec} = \sum_1^k V_{DEFi} \quad (1)$$

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.

Deve-se observar aos alunos que neste exemplo numérico se fez uma regularização anual, e no caso de reservatório se estaria dimensionando um cuja capacidade de regularização seria anual, isto 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 esta série de lucro líquido, determina-se a necessidade de recursos para regularizar a retirada mensal igual a média pelo método das descargas totalizadas (SCHREIBER, 1978). Basta criar 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 1. Feito isto, se pesquisam o máximo e 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 destes valores, que corresponde a R\$52.600,00.

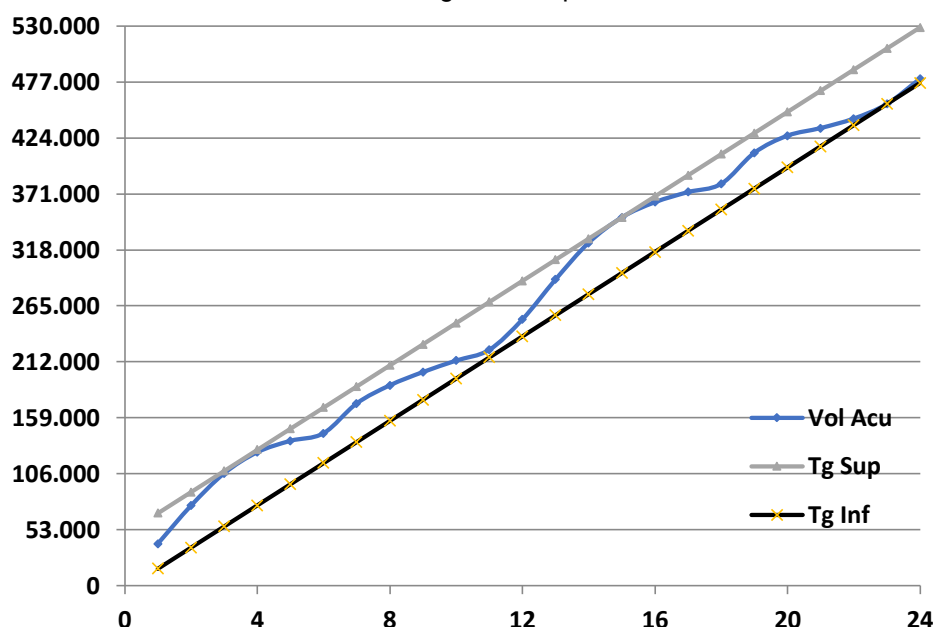
Comparando-se com o método do diagrama de massa (SOUZA et al, 1983), fez-se o gráfico da Figura 1 no qual a curva em azul são os lucros acumulados ao longo dos 24





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. Isto resulta no volume de recursos necessários igual a R\$52.600,00 (diferença nas ordenadas entre as tangentes em qualquer dos meses, onde na Figura 1 tal valor é visto facilmente no décimo mês).

Figura 1 - Curva do lucro acumulado em função do tempo, e suas tangentes superior e inferior.



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 neste período resulta em R\$20.600,00 (sendo este o período crítico). Então é necessário se acumular R\$20.600,00 antes do período crítico para regularizar uma retirada mensal de R\$16.000,00, 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, isto 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 corresponde a:

$$V_N = V_{RM} - (L_m - L_n) \cdot NM_{pc} \quad (2)$$

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 Equação (2), deve-se certificar que para a nova retirada mensal L_n , o período crítico mantém o mesmo 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, esta 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 há situações nas quais o volume do reservatório é conhecido, volume útil "X", e caso o mesmo esteja disponível no início do período crítico qual vazão poderia ser regularizada? Por exemplo, caso o volume de recursos acumulados ao final de março do ano 2 não fosse R\$52.600,00, mas apenas R\$33.400,00, qual o valor que poderia ser retirado mensalmente durante o período crítico? Para solução desta questão aplica-se a Equação (2), determinando-se o valor de L_n , sendo já conhecido V_N , resultando na Equação (3):

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

Assim, com os dados do exemplo, tem-se

$$L_n = 20000 - \left(\frac{52600 - 33400}{8} \right) = 17.600 \quad (4)$$

Portanto, no período de abril a novembro do ano 2 daria para se retirar mensalmente R\$17.600,00 (ou 88,0% da média) caso se iniciasse abril com uma reserva acumulada de R\$33.400,00. Mais uma vez deve-se observar se para este novo valor de retirada regular o período crítico se mantém ou é menor que aquele referente à regularização da média de todo o período.

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

Aplicando o novo método didático 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 3, cuja média é 1.930,0 m³/s e desvio padrão 1.376,1 m³/s. Tais dados são relativos às 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).

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 obter os volumes mensais afluentes. Desta forma, cria-se uma planilha onde 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 2,592x10⁶s. Na coluna seguinte são calculados os volumes afluentes mensais (V_{af}), produto do citado tempo em segundos pelas vazões médias de cada mês, obtendo-se em sequência a média destes volumes (V_m) de 5.002,6x10⁶ m³.

Estes procedimentos de cálculo estão mostrados na Tabela 4, embora não relativos a todos os 48 valores de vazões médias mensais dos quatro anos estudados (2010~2013), mas apenas os treze primeiros meses e os três últimos do período. Assim, na sequência a



Tabela 3 - Vazões afluentes na Usina de Sobradinho
em m³/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

quarta coluna da Tabela 4 traz os valores das diferenças entre os volumes afluentes mensais (V_{afi}), valores da 3ª coluna, e a média (V_m), e sugere-se formatar esta coluna de modo que os valores negativos fiquem em vermelho, como aqui. Por fim, são pesquisados os períodos secos de cada ano (meses consecutivos com valores negativos) com os respectivos volumes de déficit, obtendo-se:

O valor de $-16.544,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ para o período seco de 2010 (maio a novembro);

O valor de $-14.450,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ para o período seco de 2011 (maio a novembro);

O valor de $-17.283,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ para o período seco de 2012 (maio/12 a janeiro/13);

O valor de $-18.722,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ referente ao período seco de 2013 (maio a novembro).

Na Tabela 4, a última coluna referente a "observações" destaca os meses que correspondem ao início e fim desses respectivos períodos secos. O período seco que se inicia em maio/2013 e finda em novembro/2013 é o pior dentre os períodos secos, sendo portanto, o período crítico. A soma dos valores de maio a novembro de 2013 (sete meses do período crítico) da 4ª coluna, que aparecerem em negativo, embora não todos estejam lançados na Tabela 4, resulta no volume útil necessário ao reservatório. Assim, para regularização anual da vazão média de $1.930,0 \text{ m}^3/\text{s}$ é necessário que o reservatório tenha um volume útil de $18.722,0 \times 10^6 \text{ m}^3$.

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 período o reservatório terá deplecionado completamente, estando vazio. A Tabela 5 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 última coluna da Tabela 5 mostra o acompanhamento mensal do volume do reservatório ($V_{reservat}$), 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-se a média regularizada. Vê-se que ao final de novembro o volume útil seria

Tabela 4 - Identificação de períodos seco para cálculo do volume do reservatório

Mês	Vazão média mensal (m ³ /s)	Volume afluyente mensal, V _{afl} (10 ⁶ m ³)	Diferença em relação a média, V _{afl} -V _m (10 ⁶ m ³)	Observações
Jan/2010	3.459	8.965,7	3.963,2	
Fev/2010	1.939	5.025,9	23,3	
Mar/2010	2.642	6.848,1	1.845,5	
Abr/2010	2.701	7.001,0	1.998,4	
Mai/2010	1.289	3.341,1	-1.661,5	Início Período Seco/2010
Jun/2010	1.025	2.656,8	-2.345,8	
Jul/2010	815	2.112,5	-2.890,1	
Ago/2010	690	1.788,1	-3.214,1	
Set/2010	683	1.770,3	-3.232,2	
Out/2010	831	2.154,0	-2.848,6	
Nov/2010	1.794	4.650,0	-352,5	Fim Período Seco/2010
Dez/2010	3.086	7.998,9	2.996,4	
Jan/2011			7.065,8	
XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Out/2013	671	1.739,2	-3.263,3	
Nov/2013	903	2.340,6	-2.662,0	Fim Período Seco/2013
Dez/2013	2.842	7.366,5	2.363,9	

nulo e em dezembro/13 começaria novamente a encher.

Como na maioria dos estudos é inviável ter reservatórios capazes de regularizar a vazão média mensal, propõe-se: caso se deseje regularizar a vazão de 1.737 m³/s, que é 90% da média histórica, qual o volume útil necessário ao reservatório? A solução é similar, observando-se, entretanto que a coluna da diferença entre volume afluyente agora é em relação a 90% do volume médio mensal (4.502,3 x 10⁶ m³), podendo-se acrescentar uma nova coluna da Tabela 4, relativa a tal diferença. Assim procedendo-se, o pior período seco continua sendo maio a novembro de 2013 e o volume útil requerido do reservatório é 15.220,2x10⁶ m³, valor que pode ser determinado usando-se a Equação (2) readequada para volumes mensais afluentes e turbinados (em lugar do lucro médio e da retirada mensal de recursos), além de considerar o tempo médio mensal em segundo. Deste modo a Equação (2) adaptada para vazões em m³/s, volumes em milhões de m³, e tempo em milhões de segundos (2,592) resulta na Equação (5) a seguir.

Tabela 5 - Valores de vazão, volume afluyente e outros referentes ao período crítico da série.

Mês de 2013	Q (m³/s)	V _{afl} (10 ⁶ m³)	Diferença V _{afl} - V _m (10 ⁶ m³)	V _{reservt} (10 ⁶ m³)
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

$$V_N = V_{RM} - (L_m - L_n) \cdot 2,592 \cdot NM_{pc} \quad (5)$$

Logo, relativo ao exemplo, o volume desse novo reservatório em milhões de m³ é:

$$V_N = 18.722 - (1.930 - 1.737) \cdot 2,592 \cdot (7) = 15.220,2 \quad (6)$$

Buscando a solução através da Equação (5) deve-se ficar atento para observar se o período crítico se mantém, o que acontece neste exemplo, continuando de maio a novembro/2013. Entretanto realizando-se os cálculos em planilha similar à forma mostrada na tabela 4, vê-se que o período seco de 2012 seria desde maio a novembro e não mais de maio/12 a janeiro/13.

Por vezes os problemas de regularização se apresentam de outra forma: é conhecido o nível máximo do reservatório (maior cota) e então se determina o volume útil do mesmo. Assim, para estes dados que aqui se está trabalhando, conhecendo-se a capacidade do reservatório, por exemplo, 16.271×10^6 m³, pergunta-se qual a vazão regularizada? De modo análogo ao exemplo financeiro, quando a partir da Equação (2) se determinou L_n através da Equação (3), em estudos hidrológicos determina-se a nova vazão regularizada a partir da Equação (5). Destaca-se que estando os volumes dos reservatórios em milhões de m³, e tomando um mês médio de 30 dias, ou seja, tendo $2,592 \times 10^6$ s, L_n é dado por:

$$L_n = L_m - \left(\frac{V_{RM} - V_N}{2,592 \cdot NM_{pc}} \right) \quad (7)$$

Isto é, conhecido um reservatório de volume útil V_N , o mesmo irá regularizar uma vazão L_n . Entretanto, deve-se atentar se para esta nova vazão regularizada, o período crítico se mantém ou é menor que aquele relativo à vazão média L_m . Então, usando a Equação (7) e os dados do exemplo, tem-se:

$$L_n = 1930,0 - \left(\frac{18722,0 - 16271}{2,592 \cdot 7} \right) = 1930,0 - 135,1 = 1.794,9 \quad (8)$$

Ou seja, um reservatório com volume útil de 16.271 milhões de m³ regulariza uma vazão de 1.794,9 m³/s, na hipótese que se enfrente um período crítico igual ao anteriormente encontrado (meses de maio a novembro de 2013).

Por fim, destaca-se que os exemplos anteriormente mostrados trataram de regularização anual. Desejando-se uma regularização plurianual da vazão média de longo termo (1.930,0 m³/s), este novo método também pode ser usado. Para os dados desta 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 x10⁶ m³. Para certificação, foram usados também os métodos das descargas totalizadas e do diagrama de massas obtendo-se o mesmo resultado.

3 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 alterados pelos autores, propositadamente, visando obter uma série com a mesma média, mas com menor dispersão, isto é, sendo as vazões médias mensais mais uniformes (menor desvio padrão). A mudança resulta nos dados da Tabela 6.

Tabela 6 -Vazões afluentes em Sobradinho (m3/s), alteradas 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

Estes novos dados com vazões alteradas apresentam valor máximo de 5.700 m³/s, mínimo de 840 m³/s, e o desvio padrão é 1.154 m³/s.

Seguem-se os mesmos passos descritos na subseção relativa a determinação do volume útil do reservatório capaz de regularizar a vazão média, quais sejam: calculam-se os volumes afluentes mensais e a média dos mesmos, a coluna com as diferenças entre



os volumes afluentes e a média, pesquisa-se dentre estas diferenças as sequências com valores negativos que vão determinar o pior dentre os períodos secos.

Neste exemplo cujas vazões foram alteradas, 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 $14.941,8 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Almejando-se regularizar a vazão de $1.737 \text{ m}^3/\text{s}$ (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 requerer um volume útil de $10.437,0 \times 10^6 \text{ m}^3$. Aqui, deve-se chamar a atenção da classe que este volume de reservatório não pode ser calculado pela Equação (5) em virtude de ter se alterado o período crítico.

Ao usar a série de dados modificada (cujo desvio padrão das vazões é menor) verifica-se que os reservatórios necessários apresentam volumes inferiores àqueles determinados no item anterior:

Para a regularização anual da vazão média o volume antes era de $18.722,0 \times 10^6 \text{ m}^3$, e agora é necessário um volume útil de $14.941,8 \times 10^6 \text{ m}^3$;

Para a regularização anual da vazão correspondente a 90% da média, um volume útil de $10.437,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ é suficiente (antes seriam $15.220,2 \times 10^6 \text{ m}^3$).

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 que aquele com regularização plurianual determinado da seção anterior.

Portanto, sendo as vazões mais uniformes, os reservatórios de regularização que se precisa para regularizar os mesmos valores de vazão são menores.

4 CONCLUSÕES

Foi apresentado um novo método didático a ser usado 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 tal método é uma prática ativa de ensino, podendo 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 como 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 é necessário um reservatório de menor capacidade.

REFERÊNCIAS





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**. 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>. Acesso em: 11 nov. 2015.

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**. 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.

NEW METHODS IN THE DIMENSIONING OF THE RESERVOIR VOLUMES

Abstract: *This article presents a new method to be applied in hydrological studies regarding the dimensioning of the volumes of reservoirs, demonstrating its characteristic of didactic ease. It has the advantage of simplicity, having been developed from the authors' experience in teaching the subject Electricity Generation. This new method is based on the analogy with the need to regularize capital withdrawals in companies whose cash flow is seasonal, since the problems are similar. Classroom practice showed that students understand more easily and are more motivated, as it allows for the quick identification of critical periods and the useful volume to regulate a given flow. It starts with didactic examples and comparisons are made to prove the effectiveness of the method. It is shown how the standard deviation of the flows influences the storage volume needed to regularize a given flow. At the end, the conclusions are presented.*

Keywords: *Hydrological studies, flow regularization, critical period*

