

## A conceitualização de um reservatório equivalente usando o método do Diagrama Triangular de Regularização: aplicação à bacia do rio Banabuiú

*Francisco Thibério Pinheiro Leitão<sup>1\*</sup> & José Nilson Campos<sup>2</sup>*

**Resumo** – A política de reservatórios de regularização de vazões constitui uma das medidas adotadas pelos responsáveis de gestão de águas para diminuir o risco do colapso hídrico e para suprir as diversas demandas da sociedade. Nas regiões semiáridas, esse problema é ainda mais relevante, devido a intermitência dos rios (com grandes períodos sem chuva), assim como a grande variabilidade associada (implicando em grandes incertezas nas estimativas de vazões). Construiu-se um modelo de reservatório equivalente através da metodologia do diagrama triangular de regularização, cuja resposta hidrológica a longo prazo seja semelhante à resposta hidrológica do sistema. Esse reservatório equivalente poderia ser então utilizado como parâmetro para analisar a eficiência hidrológica do sistema, já que sua resposta hidrológica é semelhante.

**Palavras-Chave** – reservatório equivalente, simulação de reservatórios, diagrama triangular de regularização

## The conceptualization of an equivalent reservoir using the Triangular Diagram of Regularization method: application to the Banabuiú river basin

*José Nilson Campos<sup>1\*</sup> & Francisco Thibério Pinheiro Leitão<sup>2</sup>*

**Abstract** – The policy of reservoir regularization is one of the measures adopted by water managers to reduce the risk of water collapse and to meet the diverse demands of society. In the semi-arid regions, this problem is even more relevant, due to the intermittence of the rivers (with large periods without rainfall), as well as the great variability associated with them (implying great uncertainties in the flow estimates). An equivalent reservoir model was constructed through the triangular regularization diagram methodology, whose long-term hydrological response is similar to the hydrological response of the system. This equivalent reservoir could then be used as a parameter to analyze the hydrological efficiency of the system, since its hydrological response is similar.

**Keywords** – Reservoir simulation, triangular regulation diagram

---

<sup>1\*</sup> Mestrando em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, e-mail: [thiberioleitao@gmail.com](mailto:thiberioleitao@gmail.com)

<sup>2</sup> Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará, e-mail: [nilson@ufc.br](mailto:nilson@ufc.br)

## 1. Introdução

No âmbito da gestão dos recursos hídricos, cada sociedade desenvolve suas metodologias, técnicas e sistemas de gestão para alcançar os seus objetivos, como suprir a demanda humana, agricultura e industrial. Conforme (CAMPOS et al., 2000), o ambiente molda o a sociedade, e a sociedade age de modo a acomodar suas necessidades, tentando diminuir possíveis impactos ambientais.

Isso se aplica fundamentalmente na região semiárida do Nordeste Brasileiro, cujo regime climático e hidrológico forçou, ao longo tempo, o desenvolvimento de medidas mitigatórias para que a sociedade pudesse se desenvolver, tentando manter a harmonia com a natureza. Essa região é caracterizada por um regime hidrológico anual com duas temporadas: uma com ocorrência de chuvas e outra com pouca ocorrência de chuvas. Além dessa variabilidade anual, a região também é caracterizada por períodos de secas (variação interanual), anos sucessivos em que a chuva média anual é bem inferior à média histórica anual para região.

A ação dos gestores mais aplicada para harmonização dessa variabilidade temporal de chuvas e vazões no Nordeste brasileiro foi a construção uma grande rede de reservatórios com objetivo da regularização de vazões anuais (reservatórios de menor capacidade) e interanuais (reservatórios com maior capacidade), para garantir o suprimento de água na maior parte do ano e em períodos de seca. Contudo, embora isso tenha ajudado a mitigar o problema da seca hidrológica, também implica no aumento da complexidade da gestão de recursos hídricos, pois deve-se realizar uma gestão integrada desse sistema, e quanto maior a rede, mais complexo o problema se torna. Somado a isso, estudos anteriores indicaram que a construção de reservatórios pode ter efeitos negativos nos reservatórios a jusante devido as às taxas de evaporação da região (ARAÚJO; MEDEIROS, 2013).

Nesse artigo, analisamos, através de uma série de simulações, o efeito, da adição de reservatórios a montante do reservatório do Banabuiú, na vazão regularizada, na evaporação e na sangria, assim como construímos um reservatório equivalente, cuja resposta hídrica é igual ao do subsistema simulado.

## 2. Base conceitual

### 2.1 Balanço Hídrico

As simulações foram realizadas considerando a hipótese de um modelo bisazonal (CAMPOS, 2015). Nesse modelo, o regime hidrológico pode ser dividido em dois períodos: um período úmido, em que ocorre a entrada de vazões, pode ocorrer sangria, não ocorre retirada de água e a evaporação líquida pode ser considerada nula; um período seco no qual não ocorre entrada de vazões nem sangria, mas ocorre evaporação e retirada de água. Esse modelo pode ser aplicado adequadamente para o semiárido do Nordeste brasileiro (CAMPOS et al., 2000)(STUDART; CAMPOS, 2001)(FILHO et al., 1990).

No período úmido, a equação do balanço hídrico pode ser expressa pela equação 2.1.1.

$$S_{t+1} = S_t + I_t - O_t \quad 2.1.1$$

Em que:  $S_t$  é o volume armazenado no reservatório no início do período  $t$ ;  $I_t$  são as vazões de entrada durante o período  $t$ ; e  $O_t$  é sangria durante o período  $t$ .

Já no período seco, a equação do balanço hídrico pode ser expressa pela equação 2.1.2.

$$S_{t+1} = S_t - M_t - \left( \frac{A_{t+1} + A_t}{2} \right) E_t \quad 2.1.2$$

Em que  $M_t$  é a retirada de água durante período  $t$ ;  $A_t$  e a área da lâmina de água no início de período  $t$ ; e  $E_t$  é a evaporação em lâmina de água durante período.

Uma das principais limitações da região é o tamanho necessário da série histórica de vazões para que os resultados sejam adequados. Conforme (STUDART; CAMPOS, 2001), seria necessária uma série histórica de 690 anos para obter resultados com precisão aceitável. Isso ocorre devido à alta variabilidade da região (coeficiente de variação da ordem de 1,2).

Para superar essa limitação, foi utilizado o método de geração de séries sintéticas com base na distribuição gama (CAMPOS, 2015). Gerou-se para cada simulação uma série de 5000 anos de volumes afluentes anuais, e aplicou-se o balanço hídricos com o objetivo de obter os valores retirados, sangrados e evaporados; e, através do diagrama triangular foi obtido o reservatório equivalente para cada sistema.

A contribuição principal deste artigo é a formulação do reservatório equivalente, cuja resposta hídrica é equivalente ao sistema de reservatórios

Para verificar a eficiência, foram comparados os valores do fator adimensional de evaporação  $f_E$  e do fator adimensional da capacidade  $f_K$ . Quanto maior o valor de  $f_E$ , maior a taxa de evaporação e menos eficiente o sistema; quanto maior o valor de  $f_K$ , maior a capacidade de retenção da água e mais eficiente o sistema.

## 2.2 A formulação do reservatório equivalente

Um reservatório equivalente, como proposto nesse estudo, tem as seguintes características:

- 1- O deflúvio médio afluente ao reservatório equivalente é igual ao volume médio escoado na bacia hidrográfica em condições naturais;

$$\mu_{Re} = \mu_s \quad 2.2.1$$

- 2- O coeficiente de variação dos deflúvios ao reservatório equivalente é igual ao coeficiente de variação dos deflúvios naturais na bacia hidrográfica

$$CV_{Re} = CV_s \quad 2.2.2$$

- 3- O fator adimensional de retirada do reservatório equivalente é o seguinte:

$$f_M = \frac{\sum_i M_i}{\mu_{Re}} \quad 2.2.3$$

- 4- O fator adimensional de capacidade do reservatório equivalente é o seguinte:

$$f_K = \frac{\sum_i K_i}{\mu_{Re}} \quad 2.2.4$$

- 5- O fator adimensional de evaporação do reservatório equivalente é obtido a partir do diagrama triangular de regularização para o CV, conforme equação 2.2.5.

$$f_E = DTR(CV, f_K, f_M) \quad 2.2.5$$

- 6- O coeficiente de forma ou fator de forma para o reservatório equivalente pode ser calculado através da equação

$$\alpha = \left( \frac{f_E \cdot M^1}{3 \cdot E} \right)^3 \quad 2.2.6$$

Conforme Hazen(1913) e Campos(2010), a função do regime hidrológico é dada pela equação 2.2.6 (formulação não dimensional) ou pela equação 2.2.7 (formulação adimensional).

$$\phi(K, Y, R) = 0 \quad 2.2.7$$

$$\phi(f_K, f_M, R) = 0 \quad 2.2.8$$

### 3. Metodologia

#### 3.1 Ferramenta computacional

Para o estudo do efeito cumulativo de reservatórios foi desenvolvido no âmbito da pesquisa uma nova versão do sistema computacional SimRes (CAMPOS; STUART), no qual a interface gráfica foi atualizada com o *framework* Qt (RISCHPATER, 2014) para ficar mais amigável para o usuário, os códigos foram transferidos para a linguagem de programação orientada a objetos C++ (visando a manutenção de longo prazo) e foi adicionada a funcionalidade para permitir a simulação de um sistema de reservatórios ao mesmo tempo. Até ao momento, o sistema é capaz de realizar a simulação da vazão regularizada através do método de Monte Carlo, considerando o modelo bisazonal aplicável ao semiárido do Nordeste (CAMPOS, 2015).

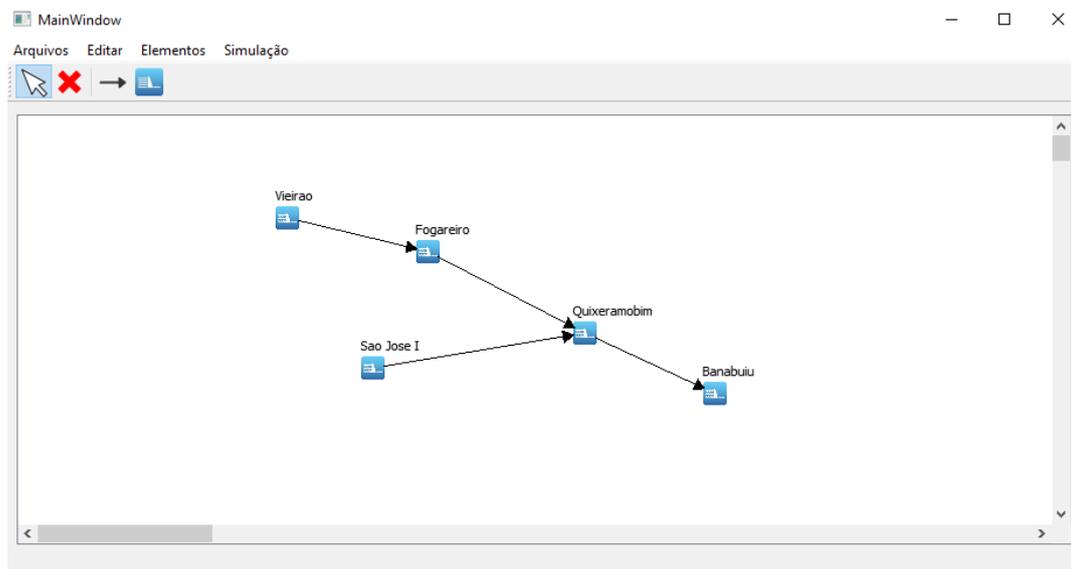


Figura 1 – Visual SimRes

#### 3.2 Área de estudo

O estudo foi realizado na bacia de contribuição para o reservatório de Banabuiú, conforme Figura 2. O estudo foi realizado considerando os principais reservatórios a montante do reservatório principal. As simulações foram realizadas para cada reservatório a montante adicionado ao modelo.

Após isso, os coeficientes adimensionais foram calculados para cada simulação e o reservatório equivalente foi encontrado para o sistema. A comparação dos coeficientes do sistema e do reservatório equivalente indicam a eficiente do sistema.

## Área de Estudo

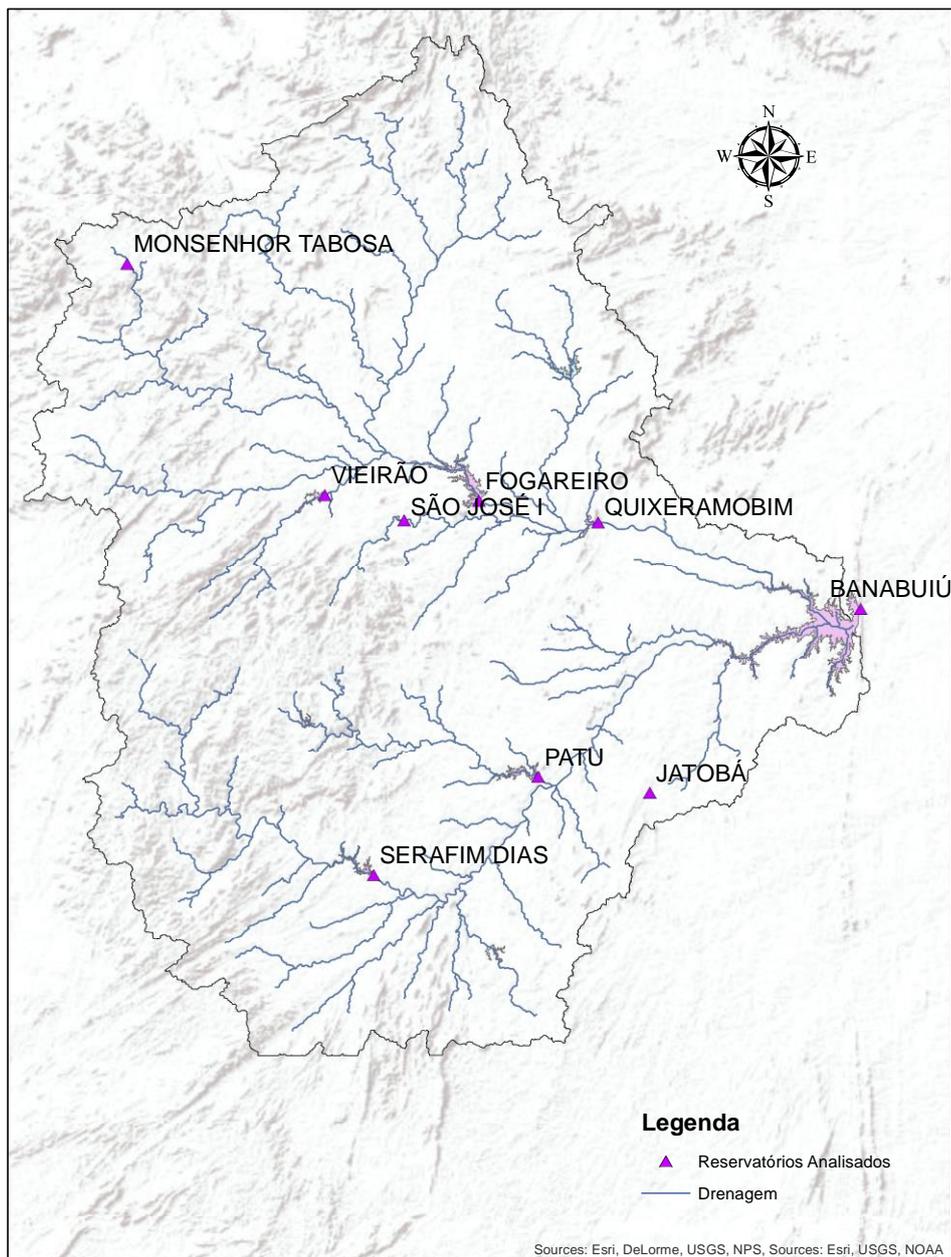


Figura 2-Área de estudo

Tabela 1 - Simulações

<b>Simulação</b>	<b>Reservatórios</b>
1	Banabuiú
2	Banabuiú + Quixeramobim
3	Banabuiú + Quixeramobim + Fogareiro
4	Banabuiú + Quixeramobim + Fogareiro + São José I
5	Banabuiú + Quixeramobim + Fogareiro + São José I + Vieirão
6	Banabuiú + Quixeramobim + Fogareiro + São José I + Vieirão + Monsenhor Tabosa
7	Banabuiú + Quixeramobim + Fogareiro + São José I + Vieirão + Monsenhor Tabosa + Patu
8	Banabuiú + Quixeramobim + Fogareiro + São José II + Vieirão + Monsenhor Tabosa + Patu + Jatobá
9	Banabuiú + Quixeramobim + Fogareiro + São José II + Vieirão + Monsenhor Tabosa + Patu + Jatobá + Serafim Dias

### 3.3 Parâmetros do modelo

Para simulação foi considerado que o volume anual médio para a região de 60 mm em lâmina de água e que o coeficiente de variação é da ordem de 1,2. Além disso, para geração das vazões afluentes foi aplicada a função de distribuição de Gamma, com geração de séries sintéticas de 5000 anos. As tabelas cota-volumes foram adquiridas através da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH). A evaporação média para cada região foi obtida através da tabela de normais climáticas do INMET, em que foi adotado o valor mais próximo para localização dos reservatórios.

## 4. Resultados e discussões

Na Figura 3 temos o gráfico que relaciona o crescimento da capacidade de acumulação do sistema a cada reservatório adicionada ao modelo. Regiões mais horizontais implicam que os reservatórios adicionados têm pouca capacidade de acumulação de água em relação aos outros. Por outro lado, regiões mais inclinadas implicam a adição de reservatórios com alta capacidade de acumulação.

Já a Figura 4 representa a evolução da capacidade de retirada anual do reservatório do Banabuiú para cada simulação realizada. Comparando os gráficos das Figura 3 e 4, é possível perceber que a capacidade de acumulação do sistema guarda uma relação inversa com a capacidade de retirada no Banabuiú. No geral, há uma redução na capacidade de retirada do sistema, mas o impacto é menor.

Analisando a Figura 5, temos o aumento na capacidade de acumulação causa um grande aumento na evaporação total do sistema, conforme trabalhos anteriores indicavam.

Além disso, foi calculado o reservatório equivalente para cada sistema simulado e construído a curva cota-volume para este reservatório com base no coeficiente adimensional da evaporação. Essa é a forma do reservatório equivalente para que a resposta hídrica seja equivalente ao do sistema. A Figura 6 representa essas curvas calculadas com base no coeficiente adimensional.

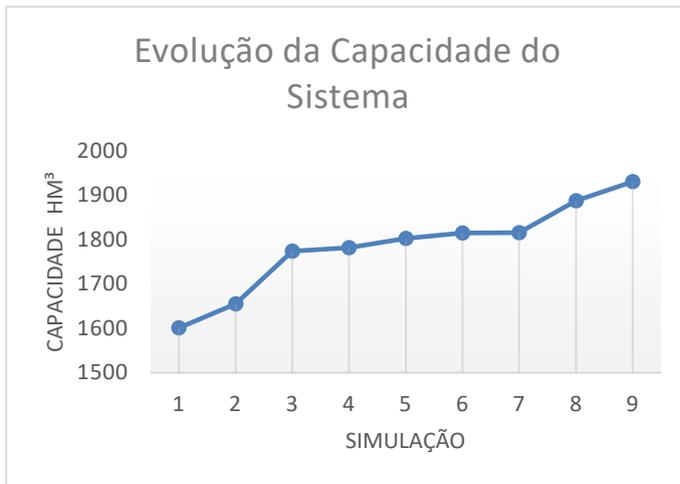


Figura 3-Evolução da capacidade do sistema

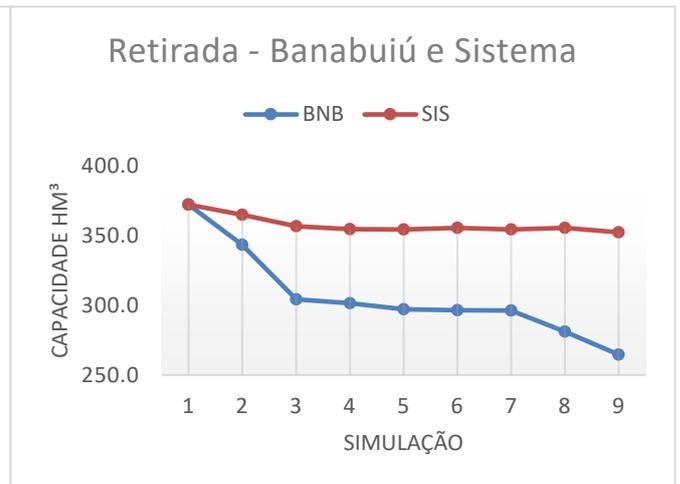


Figura 4- Evolução da capacidade de retirada no Banabuiú



Figura 5-Evolução da evaporação do sistema

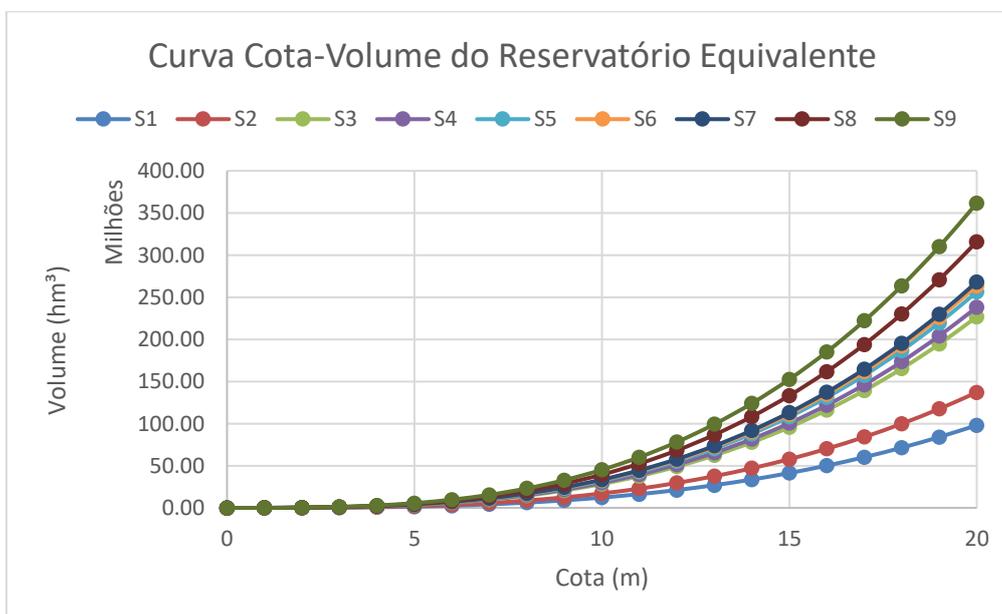


Figura 6 - Forma do reservatório equivalente

Além disso, foram construídos gráficos que relacionam  $f_O$ ,  $f_M$ ,  $f_E$  com o  $f_K$ , conforme a Figura 7. É possível perceber que essas grandezas guardam uma relação linear com o fator de capacidade  $f_K$ . O mesmo foi realizado para o fator de forma conforme a Figura 8, obtendo-se também uma relação linear entre as variáveis.

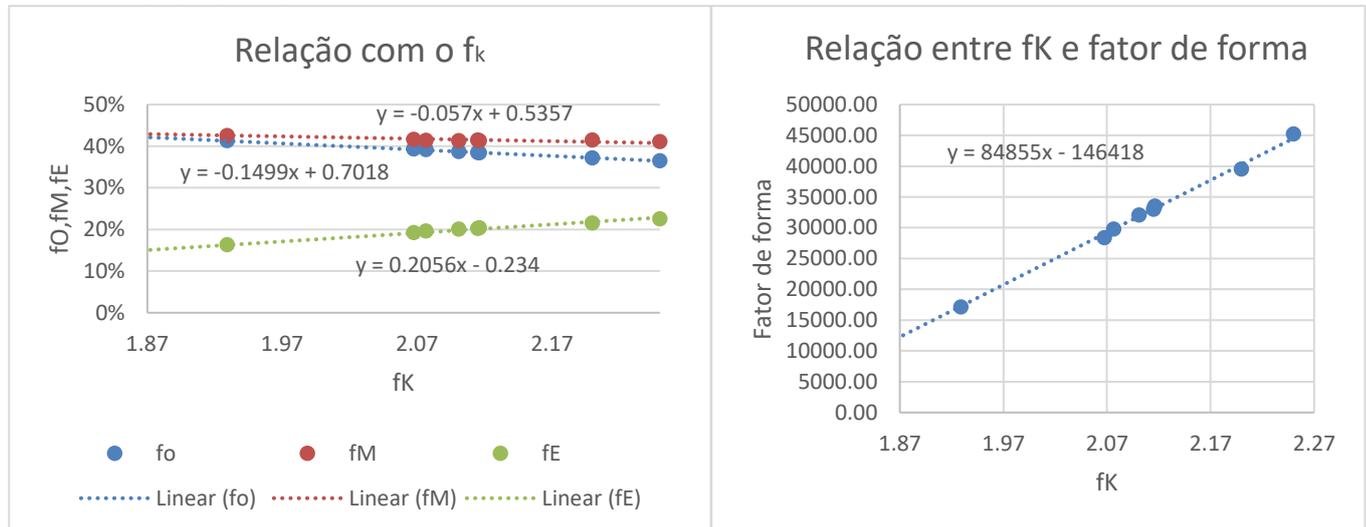


Figura 7 - Regressão linear entre variáveis adimensionais

Figura 8 - Relação entre  $f_K$  e fator de forma

## 5. Conclusões

Através da metodologia do modelo bizacional e do sistema computacional desenvolvido foi possível construir o reservatório equivalente para cada sistema, assim como obter relações entre as variáveis do reservatório equivalente e do sistema. Esse resultado por ser útil para uma análise preliminar da acumulação de reservatórios em série e paralelo. As relações obtidas podem ser utilizadas para calcular os parâmetros do reservatório equivalente sem a necessidade de novas simulações.

## 6. Referências

- DE ARAÚJO, J. C.; MEDEIROS, P. H. A. Impact of dense reservoir networks on water resources in semiarid environments. **Australian Journal of Water Resources**, v. 17, n. 1, p. 87-100, 2013.
- CAMPOS, José Nilson Bezerra. Modeling the Yield–Evaporation–Spill in the Reservoir Storage Process: The Regulation Triangle Diagram. **Water resources management**, v. 24, n. 13, p. 3487-3511, 2010.
- CAMPOS, José Nilson B. **Dimensionamento de reservatórios: o método do diagrama triangular de regularização**. Universidade Federal do Ceará, 1996.
- CAMPOS, J. N.; STUDART, T. M. DE C. Método monte carlo e simres: laboratório computacional para análise de reservatórios. , p. 1–11.
- CAMPOS, J. N. B. et al. Hydrological transformations in Jaguaribe River basin during 20th Century. **IN: Proceedings of the 20th Annual American Geophysical Union, Fort Collins Hydrology Days Publications**, v. 1, n. 1, 2000.
- FILHO, E. C. C.; STUDART, T. M. D. C.; CAMPOS, J. N. B. Método para estimativa regional da duração da estação seca dos rios do ceará, n. 21, p. 1–18, 1990.
- STUDART, T. M. C.; CAMPOS, J. N. B. Incertezas nas estimativas da vazão regularizada por um reservatório. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre**, v. 6, n. 3, p. 81-94, 2001.
- HAZEN, Allen. Storage to be provided impounding reservoirs for municipal water supply. **In: Proceedings of the American Society of Civil Engineers**. ASCE, 1913. p. 1943-2044.