

XV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

DEFINIÇÃO DE REGRA DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIO NA REGIÃO SEMIÁRIDA EM SITUAÇÃO DE ESCASSEZ HÍDRICA

Maurício de Gois Gomes¹; Joana D'arc Freire de Medeiros²

RESUMO – O aumento do uso de recursos hídricos para múltiplas finalidades pode implicar conflitos entre usuários, principalmente, nas regiões semiáridas por causa da redução de vazão em longos períodos de estiagem. O método Curva Guia baseado em Zonas tem sido utilizado na operação de reservatórios e consiste em racionar os usos de água em função do nível de armazenamento de água no reservatório e, assim, preservar um volume de água para atender as demandas em uma estiagem futura. Com isso, esse trabalho tem o objetivo de otimizar a regra de operação do reservatório Cruzeta, situado na Bacia Piancó-Piranhas-Açu, localizada na região semiárida do Brasil. Foram considerados diferentes cenários de aplicação de funções objetivos com o uso do Algoritmo Genético Multiobjetivo, NSGA-II. Os resultados mostram que a aplicação da Curva Guia baseada em Zonas satisfaz as garantias desejadas para os usuários prioritários mesmo em períodos de estiagem, sendo necessário, para isso, o racionamento das demandas dos usuários não prioritários. O melhor cenário de aplicação das funções objetivos foi otimizar a regras de operação adotando parâmetros com valores diferentes entre períodos de chuva e de estiagem, como também minimizar os déficits hídricos no período de estiagem.

ABSTRACT– The increase in the use of water resources for multiple purposes can lead to conflicts between users, mainly in semi-arid regions because of the reduction in flow in long periods of drought. The Zone-based Guide Curve method has been used in reservoir operation and consists of rationing water uses according to the level of water storage in the reservoir and, thus, preserving a volume of water to meet the demands in a future drought. Thus, this work aims to optimize the operating rule of the Cruzeta reservoir, located in the Piancó Piranhas-Açu Basin, located in the semiarid region of Brazil. Different scenarios for the application of objective functions were considered using the Multiobjective Genetic Algorithm, NSGA-II. The results show that the application of the Zone-Based Guide Curve satisfies the desired guarantees for priority users even in periods of drought, making it necessary to ration the demands of non-priority users. The best scenario for the application of objective functions was to optimize the operating rules by adopting parameters with different values between periods of rain and drought, as well as minimizing water deficits in the period of drought.

Palavras-Chave – operação de reservatórios; otimização; NSGA-II

1) Afiliação: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Av. Passeio dos Girassóis, Lagoa Nova, Natal, (82) 99628-0200, mauriciogomes95@gmail.com

2) Afiliação: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Av. Passeio dos Girassóis, Lagoa Nova, Natal, (84) 99418-2990, joanadarc.medeiros@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O uso de recursos hídricos para múltiplas finalidades tem aumentado consideravelmente com a crescente urbanização, juntamente com o crescimento industrial e a ocupação do solo pela agropecuária (Raje & Mujumdar, 2010). Em regiões com escassas disponibilidades de água, como as regiões semiáridas, a soma das demandas dos usuários, muitas vezes, requerem volumes de água superiores aos disponíveis nos corpos hídricos, o que resulta em déficits hídricos e, conseqüentemente, gera conflitos entre os usuários (Ahmad & Giordano, 2010; Demertzi *et al.*, 2014).

Nestas regiões os conflitos se agravam em períodos de estiagem (Zamani *et al.*, 2017) quando ocorre uma redução das vazões nos corpos hídricos associada a maiores demandas de água para uso doméstico e de irrigação. Em virtude disso, os reservatórios são praticamente as únicas fontes hídricas disponíveis. Deste modo, operar corretamente os reservatórios tem se tornado um importante mecanismo para prevenir conflitos e alocar água satisfatoriamente aos diferentes usuários (da Silva *et al.*, 2017).

Uma das regras de operação mais simples é a Política Operacional Padrão (POP), uma vez que permite a liberação total da demanda de água solicitada pelos usuários e armazena somente as quantidades excedentes (Stedinger, 1984). Contudo, as entregas totais das demandas de água podem exceder as quantidades armazenadas no reservatório, o que pode resultar em déficits hídricos elevados nos atendimentos, principalmente em períodos de estiagem. Esta problemática é minimizada ou evitada com a regra de operação chamada “hedging rule” ou curva guia (CG). Nesta regra de operação admite-se déficits nas entregas atuais, a fim de preservar volumes e, assim, satisfazer, pelo menos, as demandas prioritárias sem grandes déficits em períodos de estiagem futuros (Tu *et al.*, 2008).

No entanto, em termos práticos, essa metodologia não corresponde ao comportamento operacional real dos reservatórios, visto que a CG representa uma função praticamente contínua, o que obrigaria aos operadores modificarem o racionamento muito frequentemente. Desta forma, uma alternativa para contornar esta dificuldade operacional é discretizar a CG, permitindo que o racionamento seja realizado em etapas discretas (Tu *et al.*, 2008). Neste método, os reservatórios são divididos em zonas de armazenamento que definem a regra de racionamento no uso da água. Então, no início de cada período de tempo, a quantidade de água a ser liberada para atendimento das demandas é definida com base na respectiva zona na qual o nível do volume do reservatório está

localizado (Barros *et al.*, 2008). Assim, quando os níveis de armazenamento estão baixos e a conservação da água se torna necessária, há redução das liberações determinada pela zona de armazenamento em que o nível da água se encontra, ocorrendo as maiores reduções quando o volume armazenado alcança zonas mais baixas.

A curva guia baseada em zonas ou “zone-based hedging” vem sendo amplamente utilizada, inclusive, em regiões com problemas de atendimento nos períodos de seca (Ahmadianfar *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2017; Men *et al.*, 2019). Nessa regra se torna necessário saber “quando a regra deve iniciar” e “qual o racionamento ideal”, ou seja, conhecer os níveis de volume da água que limitam as diferentes zonas e os coeficientes de redução da liberação (Tu *et al.* 2008; Ahmadianfar *et al.*, 2017).

Devido a capacidade de encontrar soluções próximas ao resultado ideal com tempo de computação razoável em problemas lineares ou não-lineares (Labadie *et al.*, 2004) e multiobjetivos, os Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos (AEMO), como por exemplo o NSGA-II (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*) (Deb *et al.*, 2002), têm sido bastante utilizados para as otimizações das regras de operação de reservatórios, inclusive para a regra de Curva-Guia baseada em Zonas (Ahmadianfar *et al.*, 2017).

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a aplicação da regra de curva guia baseada em zonas em um reservatório na região semiárida do Brasil. Desta forma, busca-se definir a melhor aplicação da regra de operação para possibilitar o suprimento satisfatório das demandas e água e reduzir a escassez hídrica no reservatório.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estudo foi desenvolvido no reservatório Cruzeta localizado na porção potiguar da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu (Figura 1 e Tabela 1). O clima da bacia é classificado como Bsh ou semiárido quente (ANA, 2016).

A precipitação média anual climatológica no posto pluviométrico no município de Cruzeta é de 578 mm (CPRM, 2005), caracterizado por uma estação chuvosa ocorrendo de janeiro a junho, mas concentrada entre os meses de fevereiro a abril e uma estação seca nos demais meses. A evaporação no açude é de 2326,6 mm/ano, medida a partir da evaporação em tanque classe “A”, com valores máximos nos meses de setembro a dezembro (CPRM, 2005).

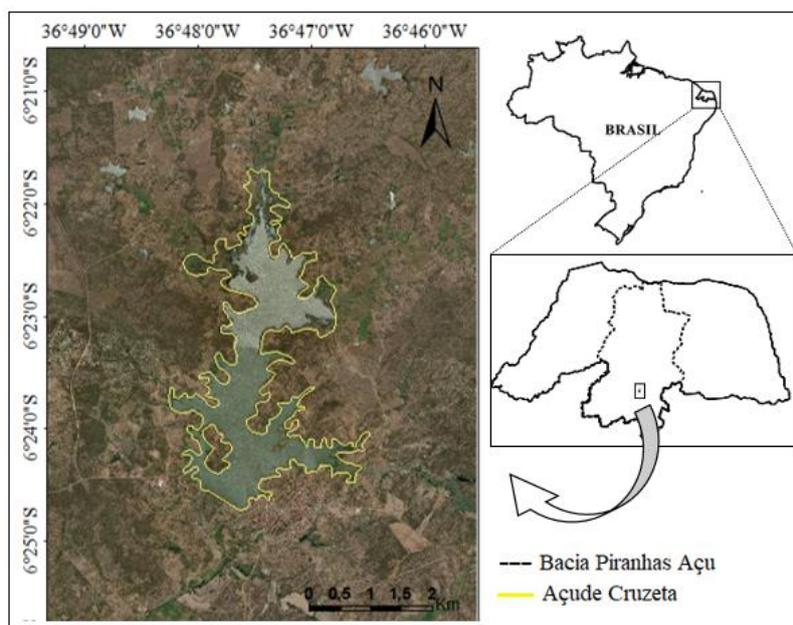


Figura 1 - Localização do Reservatório Cruzeta

Tabela 1 - Características gerais do reservatório.

Reservatório	Área da Bacia Hidrográfica (km ²)	Área Superficial Máxima (km ²)	Capacidade Máxima (hm ³)	Profundidade Máxima (m)
Cruzeta	1400	6,16	23,55	9,3

O reservatório atende a uma demanda total de 0,938 m³.s⁻¹ destinado a usos múltiplos, onde 0,054 m³.s⁻¹ (6,0%) é alocada para os usos prioritários, conforme a Lei n° 9.433 de 1997, e 0,874 m³.s⁻¹ é usado para irrigação (93,2%), sendo o restante para usos múltiplos.

2.2. Determinação das regras de operação

A regra de operação do reservatório foi definida considerando o método Curva Guia baseada em Zonas, proposto por Tu *et al.* (2008). O armazenamento total do reservatório foi dividido em zonas, sendo definido para cada uma delas os níveis de racionamento no atendimento das demandas.

Considerando que a Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei n° 9.433 de janeiro de 1997, diz no Art 1º, inciso III, que “em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais”, neste trabalho, foram consideradas duas classes de demandas: as demandas prioritárias (D1), composta pelas demandas para abastecimento humano e pecuária; e as demandas não prioritárias (D2) para os demais usos presentes no reservatório. Assim, as demandas prioritárias (D1) receberam sempre que possível toda a demanda necessária, ou seja,

sem sofrer racionamentos. No Rio Grande do Norte, se trabalha com uma garantia de 90%, ou seja, aceitou-se que o sistema apresente falha no atendimento das demandas D1 em 10% do tempo.

Assim, o método de Curva Guia baseada em Zonas utilizado neste trabalho (figura 2), avalia o volume armazenado no reservatório para um determinado intervalo de tempo, se o armazenamento for maior que o limite da Zona 1 (V_1), então a demanda total ($D1+D2$) pode ser liberada. Porém, se o armazenamento estiver entre os volumes V_2 e V_1 , ou seja, na Zona 2, então D2 será reduzida para uma fração da sua demanda total, utilizando-se o coeficiente α . Já se o armazenamento estiver na Zona 3, com volume menor que V_2 e maior que V_{MIN} , D2 será reduzida totalmente, sendo fornecida somente D1 (Shih & Reville, 1994; Tu *et al.*, 2008; Ahmandianfar *et al.*, 2017).

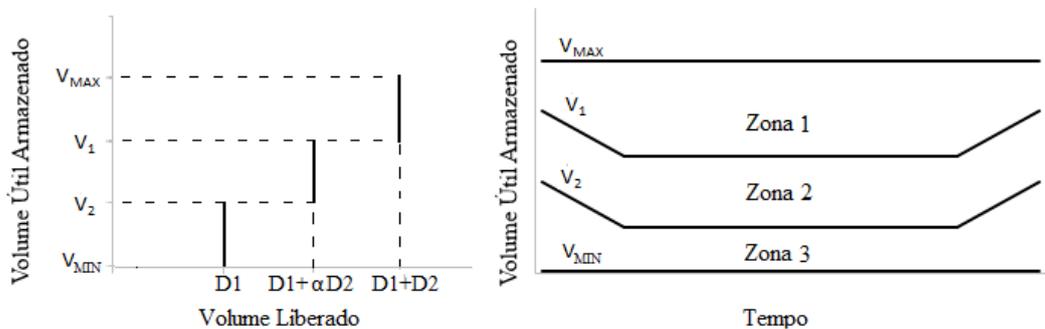


Figura 2 - Exemplos de zonas com fases de racionamento. Fonte: Adaptado Ahmandianfar et al. (2017)

A otimização dos parâmetros, ou seja, a definição dos limites das zonas (V_1 e V_2) e do coeficiente de racionamento (α) foi realizada com base na simulação dos volumes através do balanço hídrico utilizando o método de otimização NSGA-II por meio do pacote “NSGA2R” no programa *R Studio*. Na aplicação do NSGA-II foi definido o tamanho da população igual a 100 e o critério de parada sendo no máximo 100 gerações.

2.2.1. Simulação do reservatório

O período de simulação do reservatório Cruzeta foi de 1921 a 2012. O balanço hídrico foi realizado por meio da Equação 1, a fim de obter os volumes armazenados em cada intervalo de tempo.

$$S(t+1) = S(t) + Q(t) + P(t) - D1(t) - \alpha D2(t) - E(t) - V(t) \quad (1)$$

Sendo $S(t+1)$ o volume do reservatório no final do mês t ; $S(t)$ o volume do reservatório no final do mês anterior; $Q(t)$ o volume afluente ao reservatório no mês t ; $P(t)$ o volume precipitado no

mês t ; $D1(t)$ a demanda do reservatório para os usuários prioritários no mês t ; α o coeficiente de racionamento para os usuários não prioritários $D2(t)$ no mês t ; $E(t)$ o volume evaporado no mês t e $V(t)$ o volume vertido no mês t . Os coeficientes de racionamento α pode variar entre 0.2 e 1.0 na Zona 2, sendo sempre igual a 1.0 na Zona 1 e 0.0 na Zona 3.

Na Equação 1 foram definidas algumas restrições para os valores armazenados. Onde, $S(t+1)$ deve ser superior ou igual ao volume morto (V_{MIN}), pois abaixo deste volume haverá falha no atendimento das demandas. Já se $S(t+1)$ for superior ao volume máximo (V_{MAX}), então ocorrerá o vertimento da água.

Os dados de vazões afluentes, evaporação, curva cota-área-volume dos reservatórios e demandas dos usuários são disponibilizados no Plano da Bacia Piancó-Piranhas Açú (ANA, 2016) e as precipitações foram fornecidas pela EMPARN (2016).

2.2.2. Otimização das regras de operação

Na otimização da regra de operação, utilizou-se duas funções objetivos: uma para minimizar o déficit (FO1), ou seja, minimizar a diferença entre o volume de água requerido ($D(t)$) para atendimento de todas as demandas no tempo t e o volume de água disponível ($R(t)$) para ser alocado no tempo t (equação 2); e uma outra para minimizar a quantidade de vezes que o reservatório ficou na Zona 3 ou no Volume Morto (V_{morto}) (FO2) (equação 3).

$$FO1 = \min\{\sum_{t=1}^N [D(t) - R(t)]\} \quad (2)$$

$$FO2 = \min\{\sum_{t=1}^N Zona_3(t) + \sum_{t=1}^N V_{morto}(t)\} \quad (3)$$

Pra avaliar a aplicação da função objetivo FO2, primeiramente otimizou-se utilizando somente a FO1 na regra de operação e, posteriormente, otimizou-se FO1 e FO2, afim de comparar os resultados e verificar mudanças nos desempenhos.

Adicionalmente foram testadas a aplicação das duas funções objetivos (FO1 e FO2) em 04 (quatro) cenários distintos para avaliar que situação apresentava o melhor desempenho: Cenário 1 (C1) - foi considerado os valores de $V1$ e $V2$ constantes para todo o ano, sendo a(s) função(ões) objetivo analisada em todo horizonte de operação; Cenário 2 (C2) - mesma situação do Cenário 1, mas os valores de $V1$ e $V2$ variavam nos períodos úmidos e secos, logo, se otimiza quatro valores de volume, dois para o período úmido ($V1u$ e $V2u$) e dois para o período seco ($V1s$ e $V2s$); Cenário 3 (C3) - valores de $V1$ e $V2$ constantes para todo o ano e a(s) função(ões) objetivo analisada(s) somente

nos meses de período seco; Cenário 4 (C4) - os valores de V1 e V2 variavam nos períodos úmidos e secos, e a(s) função(ões) objetivo analisada(s) somente nos meses de período seco;

3. RESULTADOS

3.1. Análise do desempenho das funções objetivo

Ao analisar os déficits hídricos no atendimento as demandas (tabela 2), verifica-se que nos cenários, em que V1 e V2 são constantes, o fornecimento de água é semelhante (Cenário 1 e Cenário 3), tanto para período total como para o período seco, indicando que nessas situações otimizar reduzindo os déficits somente no período seco (Cenário 3) não traz ganho para o sistema. No entanto, se as funções objetivos forem aplicadas considerando V1 e V2 variável (Cenário 2 e Cenário 4), observa-se que ao otimizar o déficit em todo o período (Cenário 2), o fornecimento de água no período seco é reduzido em relação ao período úmido. Porém, ao se otimizar o déficit hídrico somente para o período seco (Cenário 4), apesar dos déficit hídricos no período total ser superior em relação às demais situações, essa situação apresenta a redução mais significativa do déficit hídrico somente no período seco.

Salienta-se que as regras de racionamento são aplicadas somente às demandas não prioritárias, logo, os fornecimentos de água às demandas prioritárias nos períodos úmidos e secos não se alteram. Desta forma, como na região semiárida a irrigação necessita de maiores quantidades de água no período seco devido ao longo tempo de estiagem, a aplicação das funções objetivos no Cenário 4 mostra-se uma boa opção para otimizar a operação dos reservatórios.

Tabela 2 - Déficit hídricos do reservatório Cruzeta para as diferentes aplicações de FO1 e FO2.

	Somente FO1				FO1 + FO2			
	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
Déficit Hídrico no Período Total	46%	47%	48%	55%	48%	49%	48%	55%
Déficit Hídrico no Período Seco	42%	47%	40%	24%	41%	43%	41%	24%
Nº Falhas no Período Seco	47%	51%	28%	30%	12%	11%	16%	15%

Contudo, em todos os cenários, observa-se que ao considerar a otimização das duas funções objetivo FO1 e FO2 a frequência do tempo em que os usuários não prioritários ficam sem receber água durante os períodos secos, ou seja, quando apresentam falhas no período seco, diminui de 15%

a 40% quando comparado a otimização considerando somente FO1. Desta forma, os resultados do Cenário 4 melhoram ao considerar as duas funções objetivos, diminuindo a diferença do tempo sem fornecer água aos usuários não prioritários em quase 02 (dois) meses/ano (tabela 2).

Assim, os resultados obtidos mostraram que o uso das duas funções objetivos trazem melhores resultados, uma vez que otimizar somente se preocupando em minimizar os déficits hídricos (somente FO1) poderia implicar em diminuição nas frequências de atendimento, visto que seria priorizado a entrega total das vazões demandadas e, conseqüentemente, os volumes armazenados nos reservatórios seriam reduzidos mais rapidamente, como foi observado por Xu *et al.* (2017), levando ao aumento da frequência dos volumes armazenados na Zona 3 e Volume Morto.

3.2. Regra de Operação

Ao operar o reservatório Cruzeta pela Política de operação padrão (POP), observa-se que o reservatório apresentou uma baixa garantia no atendimento às demandas, inclusive às prioritárias, fornecendo água para os usuários em somente 58% do tempo (figura 3).

Ao adotar a regra de Curva Guia baseada em Zonas o atendimento as demandas prioritárias ficam garantidas em 90% do tempo, somente as demandas não prioritárias (no caso em estudo as demandas de irrigação) é que são racionadas. Em todos os cenários de aplicação das FOs, inclusive no Cenário 4, verifica-se nos períodos úmidos maiores frequências da posição do nível da água nas zonas com regras de racionamentos a fim de se preservar maiores volumes de água para o período seco e assim resultar em maiores fornecimentos para os usuários não prioritários (Figura 3).

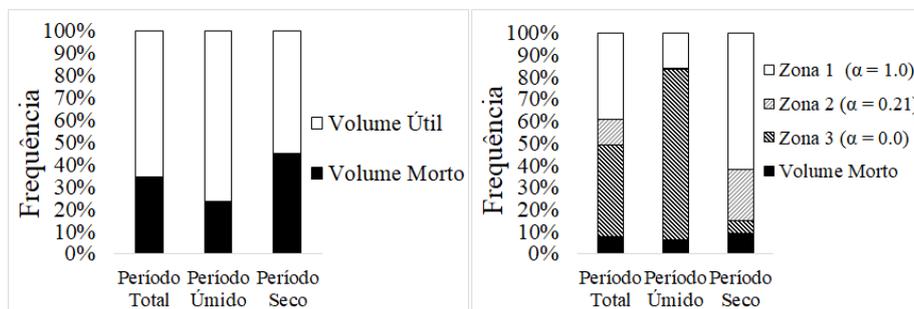


Figura 3 – Frequência de tempo da posição do nível de água em Cruzeta para os períodos úmidos e secos resultantes da aplicação da regra POP (à esquerda) e do Cenário 4 com uso de FO1 e FO2 (à direita).

Este fato é visível principalmente no Cenário 4 onde em mais de 60% do tempo dos períodos secos o reservatório consegue atender totalmente as demandas não prioritárias, desde que no período

úmido imponha racionamentos pesados, da ordem de 80% de redução em mais de 80% do tempo. Este racionamento no período úmido pode ser aceitável uma vez que no período chuvoso os agricultores podem ter outras fontes hídricas para produção agrícola e podem prescindir da água do reservatório, deixando a mesma armazenada para ser utilizada nos períodos secos.

Com isso, verifica-se que a aplicação da Curva Guia baseada em Zonas, otimizada para reduzir a escassez hídrica nos períodos secos, se apresenta uma alternativa viável e resulta em maiores garantias de atendimento aos usuários em relação a POPs. Resultados similares dessa comparação também foram verificados em outros estudos (Xu *et al.*, 2019; Men *et al.*, 2019).

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostraram que diante das características da região semiárida que apresenta longos períodos de estiagem associados a altas taxas de evaporação e aumento das demandas, a Regra da Política de Operação Padrão (POP) não é capaz de atender as demandas nas garantias desejadas. A aplicação da regra da Curva Guia baseada em Zonas com coeficientes de racionamento apresentou melhor desempenho, principalmente a otimização diferenciando os limites das Zonas entre o período úmido e seco e minimizando os déficits hídricos no período seco.

A otimização das regras de operação permitiu atender as demandas prioritárias (D1) na garantia desejada (90%), no entanto, impõe déficits hídricos às demandas não prioritárias (D2) na ordem de 47% a 58%. Contudo, nos períodos secos, os déficits hídricos e o número de falhas para D2 foram da ordem de 20% e 30%, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- ANA - Agência Nacional de Águas. (2016). “*Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piancó Piranhas-Açu*”. Resumo Executivo. Brasília.
- AHMAD, M. U. D.; GIORDANO, M. (2010). “*The karkheh river basin: The food basket of iran under pressure*”. *Water International* 35(5): 522-544.
- AHMADIANFAR, I.; ADIB, A.; TAGHIAN, M. (2017). “*Optimization of multi-reservoir operation with a new hedging rule: application of fuzzy set theory and NSGA-IP*”. *Applied Water Science* 7: 3075-3086.
- BARROS, M. T. L.; ZAMBON, R. C.; BARBOSA, P. S. F.; YEH, W. G. G. (2008). “*Planning and Operation of Large-Scale Water Distribution Systems with Preemptive Priorities*”. *Journal of*

Water Resources Planning and Management 134: 247-256.

- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. (2005). "*Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea - Diagnóstico do município de Cruzeta.*" Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios - PRODEEM. Recife.
- DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T. (2002) "A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II". IEEE T Evolut Comput 6(2):182–197.
- DEMERTZI, K. A. *et al.* (2014). "Assessment of rural and highly seasonal tourist activity plus drought effects on reservoir operation in a semi-arid region of Greece using the WEAP model". Water International 39(1): 23-34.
- EMPARN - Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte. 2016. Monitoramento Pluviométrico. Disponível em: <<http://emparn.rn.gov.br>> Acesso em: 28/02/2019.
- LABADIE, J. W. (2004). "Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review". Journal of Water Resources Planning and Management 130:93-111.
- MEN, B.; WU, Z.; LIU, H *et al.* (2019). "Research on Hedging Rules Based on Water Supply Priority and Benefit Loss Ofwater Shortage-A Case Study of Tianjin, China." Water (Switzerland) 11(4):778-791.
- RAJE, D.; MUJUMDAR, P. P. (2010). "Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change". Advances in Water Resources 33:312-326.
- DA SILVA, S. M. O.; SOUZA FILHO, F. A.; AQUINO. S. H. S. (2017). "Avaliação do risco da alocação de água em período de escassez hídrica: o caso do Sistema Jaguaribe-Metropolitano". Engenharia Sanitaria e Ambiental 22(4):749-760.
- STEDINGER, J. R. (1984). "The Performance of LDR Models for Preliminary Design and Reservoir Operation". Water Resources Research 20(2): 215-224.
- TU, M. Y.; HSU, N. S.; TSAI, F. T. C. *et al.* (2008). "Optimization of hedging rules for reservoir operations." Journal of Water Resources Planning and Management 134:3-13.
- XU, Z. *et al.* (2019). "Is Water Shortage Risk Decreased at the Expense of Deteriorating Water Quality in a Large Water Supply Reservoir?" Water Research 165.
- XU, B. *et al.* (2017). "Optimal Hedging Rules for Water Supply Reservoir Operations under Forecast Uncertainty and Conditional Value-at-Risk Criterion." Water (Switzerland) 9:568-585.
- ZAMANI, R. *et al.* (2017). "Optimal Reservoir Operation under Climate Change Based on a Probabilistic Approach". Journal of Hydrologic Engineering 22(10).