



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

LAYAN SOARES GOMES

**REGRA DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIO ISOLADO
NO SEMIÁRIDO: UMA APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY**

NATAL/RN
AGOSTO/2020

LAYAN SOARES GOMES

**REGRA DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIO ISOLADO NO
SEMIÁRIDO: UMA APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA AO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO, EM
ENGENHARIA SANITÁRIA, DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, COMO
PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO

NATAL

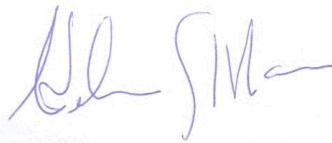
2020

LAYAN SOARES GOMES

**REGRA DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIO ISOLADO NO
SEMIÁRIDO: UMA APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da
Universidade Federal do Rio Grande do Norte,
como requisito parcial à obtenção do título de
Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental.

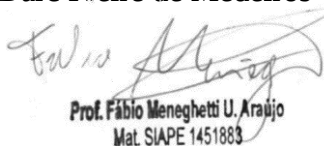
BANCA EXAMINADORA



Dra. Adelenia Gonçalves Maia – Orientadora



Dra. Joana Darc Freire de Medeiros – Coorientadora



Prof. Fábio Meneghetti U. Araújo
Mat. SIAPE 1451883

Dr. Fábio Meneghetti Ugolino de Araújo – Examinador UFRN



Dra. Silvia Helena Lima dos Santos – Examinador Externo UNILAB

Natal/RN, 10 de agosto de 2020

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Gomes, Layan Soares.

Regra de operação de reservatório isolado no semiárido: uma aplicação da lógica fuzzy / Layan Soares Gomes. - 2020.
37 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Natal, RN, 2020.

Orientadora: Profa. Dra. Adelena Gonçalves Maia.

Coorientadora: Profa. Dra. Joana Darc Freire de Medeiros.

1. Abastecimento de água - Dissertação. 2. Regra de racionamento - Dissertação. 3. Modelagem - Dissertação. 4. Otimização - Dissertação. I. Maia, Adelena Gonçalves. II. Medeiros, Joana Darc Freire de. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.1

Agradecimento dedicado a todos que contribuíram para a concretização deste trabalho e me apoiaram nessa formação, dedico a minha família, aos colegas de curso, aos professores do programa de pós-graduação e, em especial, para prof^a Adelena Maia e prof^a Joana Darc pela dedicação, compreensão e imprescindível orientação.

Regra de operação de reservatório isolado no semiárido: Uma aplicação da lógica fuzzy

RESUMO

A boa gestão de reservatórios requer a criação de um conjunto de procedimentos operacionais, regras ou planos que melhor atendam aos objetivos da sociedade. Em geral, as regras de operação são equações lógicas ou matemáticas que levam em consideração as variáveis do sistema para calcular a liberação de água de um reservatório. As técnicas computacionais, lógica difusa e computação evolucionária, têm sido bastante utilizadas para otimização de problemas de recursos hídricos, incluindo operação de reservatórios. Esta é uma pesquisa aplicada em uma análise quantitativa que propõe desenvolver um modelo de simulação e otimização da operação de reservatórios isolados com o objetivo de avaliar a regra de racionamento com aplicação da lógica *fuzzy* (FHR). A área de estudo é um reservatório inserido no semiárido brasileiro, o reservatório Cruzeta. A área encontra-se em uma região que apresenta significativa variabilidade hidrológica intra-anual, interanual e secas severas, o que exige melhor planejamento na gestão. A otimização da operação foi realizada via algoritmo genético associada à simulação de balanço hídrico do reservatório. Buscou-se maximizar a eficiência do atendimento das demandas hídricas no período de estiagem, período com maior demanda hídrica. A performance das regras de operação padrão (SOP), regra de racionamento (HR) e FHR foram avaliadas por simulação através de indicadores como confiabilidade, eficiência, resiliência, vulnerabilidade e tempo no volume morto. Sendo assim, as regras com melhor performance em mitigar a escassez de água no período de estiagem, em ordem decrescente, foram a FHR, HR e SOP. A melhoria é constatada pela elevação da eficiência de atendimento às demandas prioritárias, assim como, maior redução da vulnerabilidade e do tempo com armazenamento no volume morto. Contudo, as regras de racionamento induzem maiores períodos com redução de oferta por racionamento. Portanto, os resultados confirmam vantagens desejáveis do racionamento de água antecipado, uma vez que permite mitigar futuros eventos de escassez contínua e severa.

Palavras-chave: Abastecimento de água; regra de racionamento; modelagem; otimização.

ABSTRACT

Good reservoir management requires the creation of a set of operational procedures, rules or plans that best meet society's objectives. In general, the operational policy are logical or mathematical equations that take into account system variables to calculate the release of water from a reservoir. The computational techniques, fuzzy logic and evolutionary computing, have been widely used to optimize water resource problems, including the operation of reservoirs. This is a research applied in a quantitative analysis that implements a simulation and optimization model of reservoirs' operation in order to evaluate a hedging rule with application of fuzzy logic (FHR). The study area is a reservoir inserted in the Brazilian semiarid, the Cruzeta reservoir. The area is located in a region that has intra-annual, inter-annual hydrological variability and severe droughts, that requires better management. The optimization of the operation was carried out via a genetic algorithm associated with the simulation of the reservoir's water balance. It was sought to maximize the efficiency of meeting water demands during dry season, a period with greater water demand. A performance of standard operating policy (SOP), hedging rule (HR) and FHR were assessed by analysis of indicators such as indicators, efficiency, resilience, vulnerability and time on dead volume. Thus, the rules with the best performance in mitigating water scarcity during the dry season, in decreasing order, were FHR, HR and SOP. The improvement is evidenced by the increase in efficiency in meeting priority demands, such as, for example, greater reduction of vulnerability and time with storage in the dead volume. However, the hedging rules induce more time with reduced supply, while rationing. Therefore, the results confirm the desirable advantages of the anticipated rationing of water, since it allows to mitigate future events of continuous and severe scarcity.

Keywords: Water supply; hedging rule; modelling; optimization.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Fluxograma do algoritmo de simulação e otimização das regras de racionamento da operação do reservatório	11
FIGURA 2 - Localização do reservatório Cruzeta	13
FIGURA 3 - Precipitação e evaporação média no reservatório Cruzeta	13
FIGURA 4 - Demanda hídrica de diferentes usuários do reservatório Cruzeta	14
FIGURA 5 - Acompanhamento do armazenamento do reservatório Cruzeta	15
FIGURA 6 - Esquema de fluxo de água num reservatório	16
FIGURA 7 - Liberação de água com a regra de operação padrão	18
FIGURA 8 - Regra de operação com racionamento em dois períodos	19
FIGURA 9 - Funções de pertinência trapezoidais para as zonas de armazenamento	20
FIGURA 10 - Funções de pertinência triangulares para o fornecimento de água	21
FIGURA 11 - Regra de racionamento com aplicação de lógica <i>fuzzy</i> otimizada (FHR)	28
FIGURA 12 - Regra de racionamento otimizada (HR)	29
FIGURA 13 - Indicadores de performance resultantes das simulações	30
FIGURA 14 - Indicadores de proporção do fluxo de saída de água	32
FIGURA 15 - Armazenamento acumulado no tempo sob a regra de operação padrão, regra de racionamento e regra de racionamento utilizando <i>fuzzy</i>	32
FIGURA 16 - Eficiência mensal no atendimento a todas as demandas sob a regra de operação padrão, regra de racionamento e regra de racionamento utilizando <i>fuzzy</i>	33
FIGURA 17 - Exemplo gráfico do processo de inferência <i>fuzzy</i> baseada em regras	37

LISTA DE ABREVIATURAS

AG – Algoritmo genético

ANA – Agência Nacional de Águas

FHR – Regra de racionamento *fuzzy* (do inglês *Fuzzy Hedging Rule*)

FO – Função Objetivo

HR – Regra de racionamento (do inglês *Hedging Rule*)

MMA – Ministério do Meio Ambiente

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

PRH – Plano de Recursos Hídrico da Bacia

Q₉₀ – Vazão regularizada em 90% do tempo

RN – Rio Grande do Norte

SOP – Regra de operação padrão (do inglês *Standard Operation Policy*)

SEMARH – Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do RN

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. MATERIAIS E MÉTODOS	10
2.1. DELINEAMENTO DA PESQUISA	11
2.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	12
2.3. DADOS DE ENTRADA DO MODELO	15
2.4. OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS	16
2.4.1. REGRA DE OPERAÇÃO PADRÃO	17
2.4.2. REGRA DE RACIONAMENTO	18
2.4.3. REGRA DE RACIONAMENTO UTILIZANDO A LÓGICA FUZZY	19
2.5. FORMULAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO	22
2.6. AVALIAÇÃO DE PERFORMANCE	25
3. RESULTADOS	27
4. CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
APÊNDICES	37

1. INTRODUÇÃO

Os reservatórios são formados pelo acúmulo de água resultante da construção de barragens num curso de água. Eles são construídos com diversas funções, sendo uma das mais frequentes a regularização das vazões por meio da reserva de água do período úmido para uso no período seco (TUCCI; SILVEIRA, 2015). Há diversas demandas pelo uso de água que precisam ser satisfeitas na sociedade e na natureza, razão pela qual os reservatórios são importantes por compensar as deficiências nos períodos de estiagem para o atendimento das demandas humanas, industriais e de irrigação, produção de energia hidrelétrica, controle de enchentes, recreação, navegação ou requisitos ecológicos (TU; HSU; YEH, 2003).

O semiárido brasileiro é uma região que apresenta significativa variabilidade intra e interanual de precipitações e vazões de rios. As frequentes ocorrências de secas geram desequilíbrio no balanço hídrico e, conseqüentemente, conflitos de uso dos recursos hídricos. A população destas regiões é dependente de reservas escassas de água, de modo que, a operação adequada de um reservatório permite conciliar, prevenir ou mitigar conflitos pelo uso de recursos hídricos (NUNES; GALVÃO; RÊGO, 2016).

A boa gestão de reservatórios requer, no entanto, a criação de um conjunto de procedimentos operacionais, regras ou planos que melhor atendam a um conjunto de objetivos. Em geral, as regras de operação são equações lógicas ou matemáticas que levam em consideração variáveis do reservatório para calcular a liberação de água. (BOLOURI-YAZDELI *et al.*, 2014). Diferentes regras de operação têm sido utilizadas, a exemplo da regra de operação padrão (SOP) e regra de racionamento (HR).

Em essência, a SOP dá a maior prioridade à liberação de água para uso benéfico imediato, até o atendimento total da demanda, quando há disponibilidade hídrica. Após o total atendimento, a água restante disponível é mantida até que a capacidade máxima de armazenamento seja alcançada (DRAPER; LUND, 2004). Por outro lado, a regra de racionamento consiste em estabelecer níveis de volume de água armazenado que disparam o gatilho para o racionamento, em proporção necessária para evitar uma futura escassez severa de água. Estudos afirmam que regras de racionamento podem reduzir o risco de colapso do abastecimento de água prolongado, mas podem induzir maior frequência de reduções na oferta de água em função do racionamento (EUM; KIM; PALMER, 2011).

A operação de reservatórios propõe promover o melhor uso benéfico da água, elevando a preocupação com as demandas prioritárias sem desconsiderar a importância dos usos não prioritários para o desenvolvimento socioeconômico. O racionamento em excesso

pode restringir demais os diferentes usuários, todavia, o racionamento insuficiente pode não promover o uso mais eficiente dos recursos hídricos. Em algumas bacias hidrográficas, em função da estiagem prolongada e dos baixos níveis dos reservatórios, a Agência Nacional de Águas (ANA) e os órgãos gestores estaduais estabeleceram, além dos termos de alocação de água, regras de restrição de uso da água com o objetivo de preservar e prolongar a disponibilidade hídrica, garantindo o atendimento aos usos prioritários definidos pela Política Nacional de Recursos Hídricos, o consumo humano e a dessedentação animal (ANA; MMA, 2017a).

Geralmente, os fatores de racionamento são alterados bruscamente quando o nível de armazenamento de água se move entre zonas da regra de racionamento. Então, a lógica *fuzzy* é uma técnica utilizada com o objetivo modelar o modo gradual e aproximado de raciocínio, imitando a habilidade humana de tomar decisões em um ambiente de incerteza e imprecisão. Enquanto a lógica clássica (booleana) admite apenas valores de zero ou um (verdadeiro ou falso), a lógica *fuzzy* admite graus parciais de pertinência a um conjunto e trata de números reais entre zero e um. Assim, uma pertinência de 0,5 pode representar meio verdade, logo 0,9 e 0,1, representam quase verdade e quase falso, respectivamente (ZADEH, 1965).

A precisão dos dados levantados exerce grande influência no estudo da operação de reservatórios, como por exemplo, a mensuração da vazão afluente, armazenamento e evaporação. Além disso, a variabilidade dinâmica de clima e da batimetria no reservatório em estudo também compromete a exatidão dos resultados matemáticos com relação a realidade. Por esses motivos, pesquisadores têm aplicado o conceito de lógica *fuzzy* para superar essas incertezas e permitir maior flexibilidade na incorporação da opinião especializada de operadores (MOORTHY; SINGH; AGNIVESH, 2018). Portanto, espera-se que o uso de técnicas computacionais na determinação de regras de racionamento atenda às necessidades da sociedade e contribua para melhoria contínua na gestão do risco às secas no semiárido.

Uma modelagem da operação de um único reservatório baseado em regras *fuzzy* foi alvo de estudos por Panigrahi et al. (2000). Nesta pesquisa concluiu-se que é possível evitar procedimentos complexos de otimização da operação. Declarações linguísticas como "baixo fluxo de entrada", "pouca chuva", podem ser prontamente incorporadas. Assim, os autores apontam que os operadores e usuários do reservatório teriam a oportunidade de participar da formulação da base de regras, pois usar sistemas de lógica *fuzzy* seria mais confortável (PANIGRAHI; MUJUMDAR, 2000). Outro modelo de operação de reservatório usando conjuntos *fuzzy* e algoritmo genético foi aplicado por Akter et al. (2004) ao problema de

encontrar os valores ótimos de liberação e armazenamento. Também foi constatado o sucesso do algoritmo genético em lidar com a aplicação da teoria dos conjuntos *fuzzy* para representar as incertezas, incorporar conhecimento especializado e servir como ferramenta de suporte à decisão na operação de reservatórios (AKTER; SIMONOVIC, 2004).

A pesquisa de Celeste et al. (2015) investigou a aplicação de uma abordagem adaptativa neuro-fuzzy na construção de regras mensais de operação para um reservatório no Estado da Paraíba. Os resultados mostraram que tal modelo obteve melhor desempenho do que a “SOP” e do que otimizações com programação dinâmica estocástica. Isso mostra que estratégias de inteligência computacional podem ser uma boa alternativa para a construção de regras operacionais perante incertezas (CELESTE; HERBERT; CURI, 2015). No artigo de Ahmadianfar et al. (2016), é apresentado um modelo com utilização de lógica *fuzzy* desenvolvido para pesquisar novas regras de racionamento a fim de minimizar os impactos das secas. O principal objetivo do sistema é reduzir o déficit às demandas de vazão mínima estabelecidas e o método apresentado consegue reduzi-lo consideravelmente (AHMADIANFAR; ADIB; TAGHIAN, 2016).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a aplicação da lógica *fuzzy* em um modelo de simulação e otimização da operação de um reservatório isolado no semiárido, em busca da melhor regra de racionamento. Para a otimização foi utilizado um algoritmo genético associado a simulação de balanço hídrico do reservatório, de modo a maximizar a eficiência do atendimento das demandas hídricas no período de estiagem. Portanto, o presente trabalho fez a avaliação da melhoria de performance do reservatório em atender suas demandas, demonstrando resultados comparativos entre a regra de operação padrão (SOP), regra de racionamento (HR) e a regra de racionamento com utilização da lógica *fuzzy* (FHR).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa envolve um estudo de caso que se aprofunda na busca de uma metodologia aplicada ao gerenciamento de recursos hídricos em reservatórios isolados. Portanto, é uma pesquisa teórico-numérica aplicada em uma análise quantitativa para investigar alternativas de regras de operação dentro de um contexto da realidade de um reservatório inserido em região semiárida.

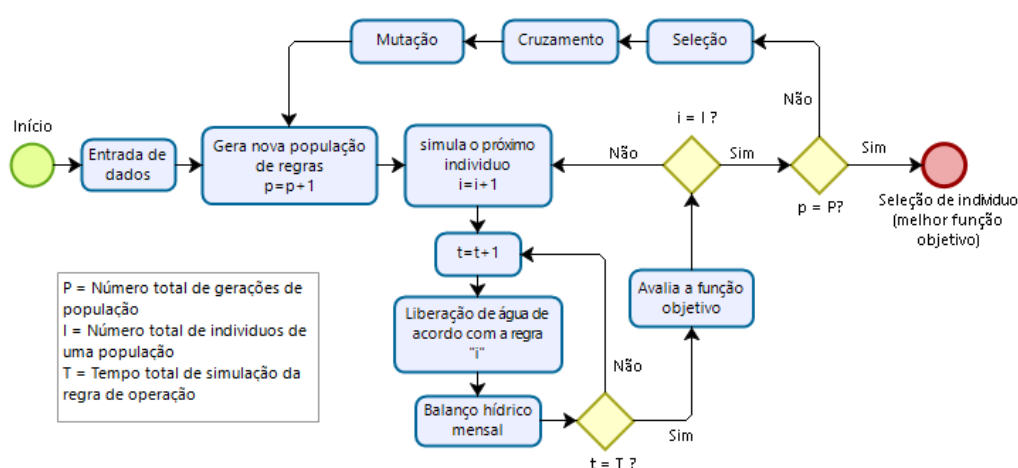
2.1. Delineamento da pesquisa

A seguir é apresentada a estrutura do desenvolvimento do trabalho, possibilitando a replicação deste experimento e, sobretudo, a instrução das etapas para a obtenção dos resultados.

- Levantamento dos dados de entrada do modelo, disponibilizados por instituições oficiais;
- Distinção entre o período de tempo dos dados históricos para a aplicação da otimização e o período para avaliação dos indicadores por simulação;
- Modelagem da simulação do balanço hídrico e otimização via algoritmo genético da regra de racionamento da operação (Figura 1). A otimização via algoritmo genético foi aplicada para HR e FHR;
- Obtenção do valor ótimo das variáveis que compõem as regras de racionamento da operação, tanto para HR como FHR;
- Cálculo de indicadores de performance por meio de simulação para avaliar a regra de operação padrão (SOP), regra de racionamento (HR) e a regra de racionamento *fuzzy* (FHR).

O modelo computacional de simulação do balanço hídrico de reservatório e a aplicação de otimização por algoritmo genético foi desenvolvido com programação em linguagem R (R CORE TEAM, 2018). O pseudocódigo apresentado na figura 1 mostra a dinâmica da otimização por algoritmo genético e como se inserem na simulação do balanço hídrico em busca de regras de operação para a decisão da alocação de água.

FIGURA 1 - Fluxograma do algoritmo de simulação e otimização de regras de racionamento da operação do reservatório.



Fonte: Autor, 2019.

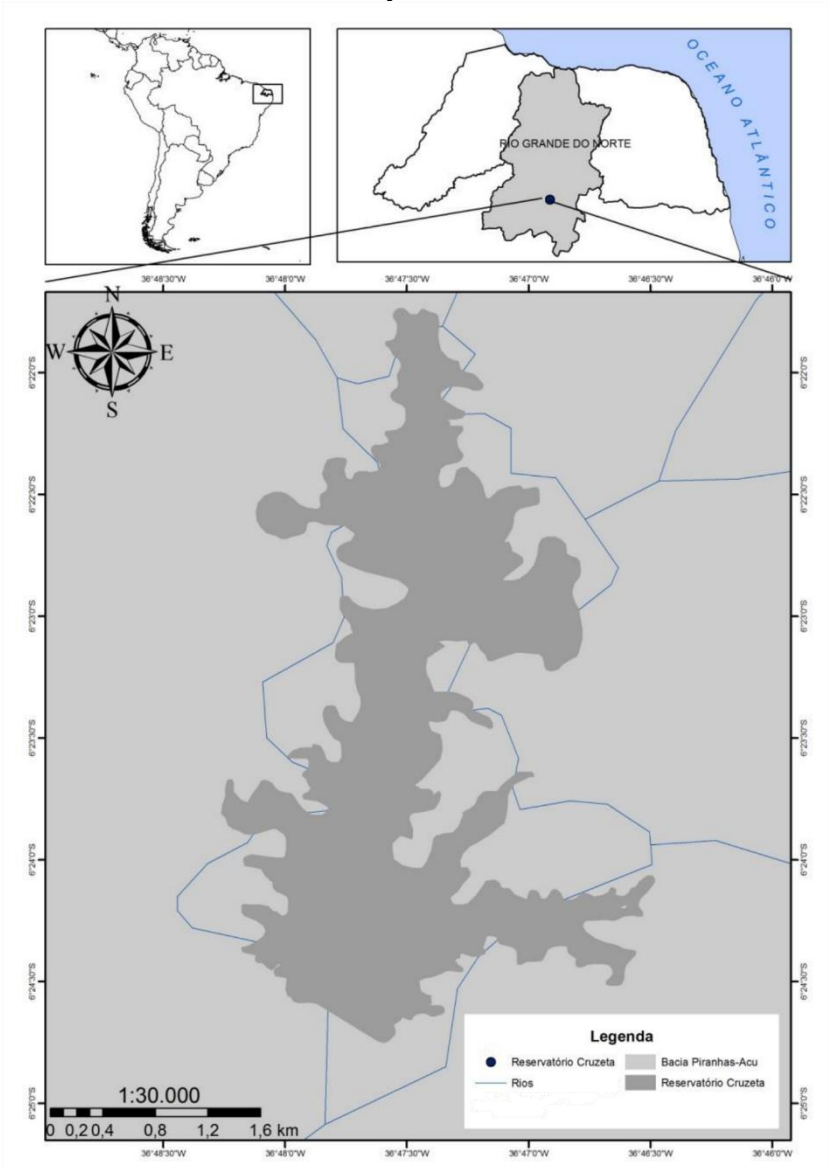
2.2. Caracterização da área de estudo

Um reservatório inserido no semiárido do Rio Grande do Norte é contemplada como a área de estudo desta pesquisa. A escolha foi feita com requisito de haver a necessidade de adequação da operação do reservatório, e para isso, avaliou-se a capacidade de atendimento das demandas e a evolução histórica do armazenamento do reservatório. Assim, torna-se pertinente comparar as demandas do açude frente à vazão possível de ser regularizada em 90% do tempo (Q_{90}), de acordo com o Plano de Recursos Hídricos (PRH) da Bacia em que o reservatório está inserido.

O reservatório estudado chama-se Cruzeta e está localizado no município de Cruzeta/RN, inserido na bacia hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu (Figura 2). Cruzeta possui uma bacia hidráulica com uma área de 616,11 ha, capacidade máxima de 23.545.745,33 m³ e volume morto no valor de 1.179.186,00 m³ (ANA; MMA, 2016). A bacia hidrográfica do Piancó-Piranhas-Açu fica totalmente inserida em território semiárido dos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. De junho de 2012 a junho de 2017 houve uma seca que resultou em perdas econômicas de mais de R\$ 3 bilhões impactando os diferentes setores usuários (ANA; MMA, 2017a).

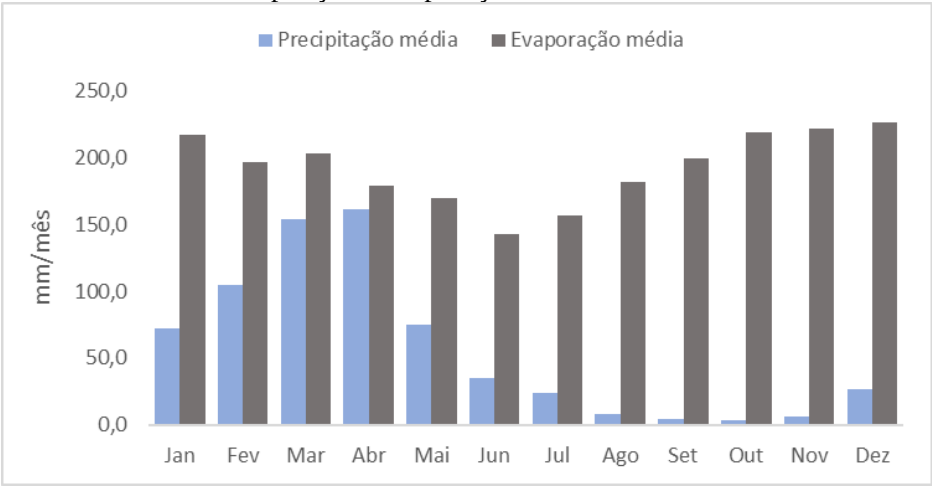
Os dados hidrológicos de vazão afluente, precipitação, evaporação e as demandas do reservatório Cruzeta nos indicam a condição de disponibilidade hídrica imposta. A figura 3 evidencia o desequilíbrio entre precipitação e evaporação, que tende ao déficit de disponibilidade na área em estudo. Na tabela 1, são apresentadas médias mensais das vazões afluentes, durante o período de 1913 a 2012, e que constata a concentração de vazões afluentes nos meses de março a junho. Então, as demandas são apresentadas na tabela 2 conforme PRH da bacia, no entanto, na execução do balanço hídrico do reservatório aplicou-se a variação mensal de demanda do perímetro irrigado, de acordo com outorgas de direito de uso (Figura 4) fornecidas no portal do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (ANA, 2019).

FIGURA 2 - Localização do reservatório cruzeta.



Fonte: Modificado de FERREIRA; BECKER; CUNHA (2015).

FIGURA 3 - Precipitação e evaporação média no reservatório cruzeta.



Fonte: ANA; MMA (2016).

Tabela 1: Vazão afluyente média mensal (m³/s) do reservatório Cruzeta

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
0,006	0,071	0,109	0,411	0,285	0,148	0,072	0,034	0,010	0,001	0,000	0,001	1,1472
0,5%	6,2%	9,5%	35,8%	24,8%	12,9%	6,2%	2,9%	0,9%	0,1%	0,0%	0,1%	100,0%

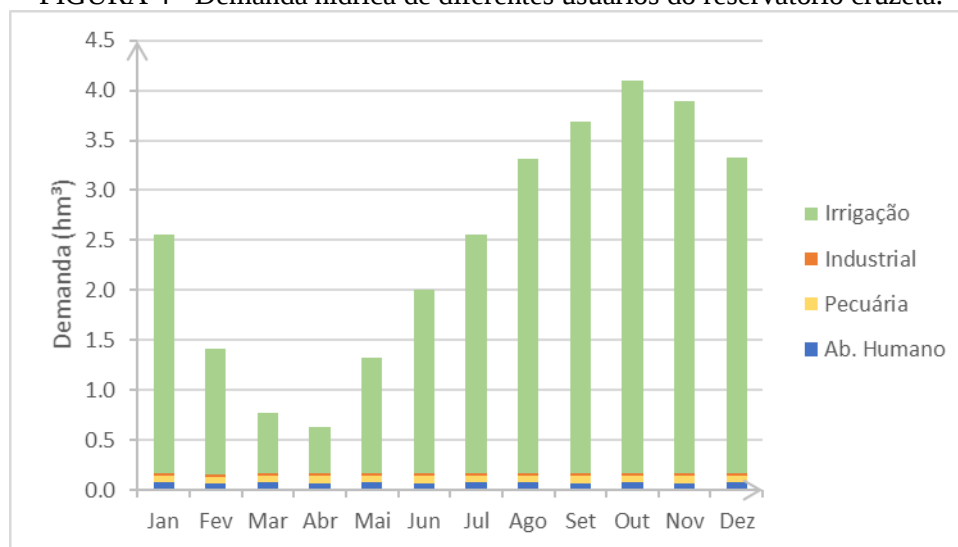
Fonte: ANA; MMA (2017b).

Tabela 2: Demandas hídricas associadas ao reservatório Cruzeta

UPH/Açudes	Estado	Demandas (m ³ /s)					Total
		Abastecimento Humano	Pecuária	Irrigação	Industrial	Aquicultura*	
Cruzeta	RN	0,028	0,026	0,874	0,010	0,000	0,938

Fonte: ANA; MMA (2016).

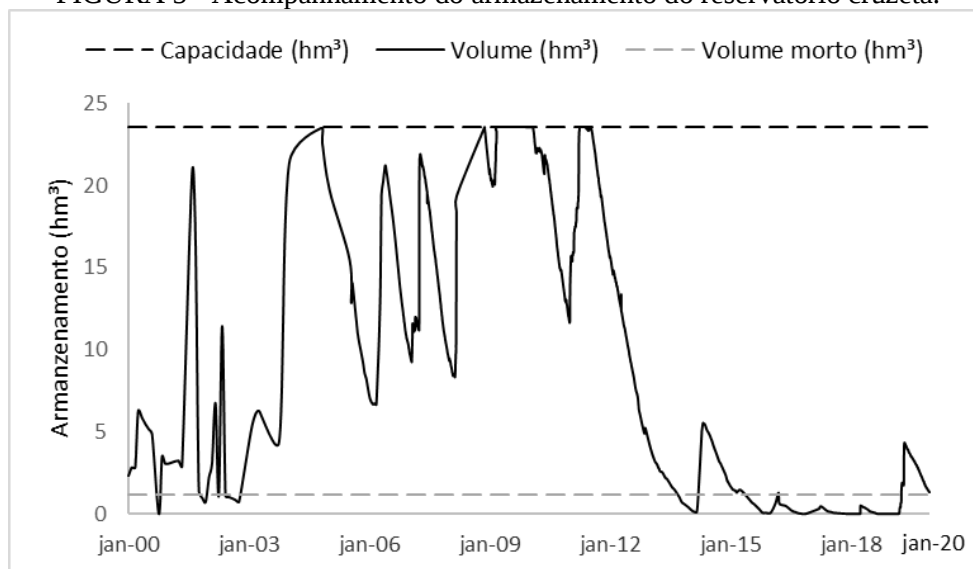
FIGURA 4 - Demanda hídrica de diferentes usuários do reservatório cruzeta.



Fonte: ANA (2019).

O estudo apresentado no Plano de Recursos Hídricos (ANA; MMA, 2016) desta bacia indica que o reservatório Cruzeta consegue atender a uma vazão de no máximo 0,265 m³/s com 90% de garantia, enquanto que sua demanda total é aproximadamente 0,940 m³/s. Percebe-se, através dos dados de monitoramento disponibilizados pela ANA (ANA, 2020), que no período a partir de 2012 até 2018 ocorreu uma estiagem severa, chegando ao colapso de abastecimento nesse reservatório (Figura 5). Portanto, essas informações apoiam a escolha da área de estudo pois evidenciam a necessidade de ações diante da dificuldade de atendimento das demandas impostas, assim como, o risco elevado de ocorrência de períodos de estiagem prolongada no reservatório Cruzeta.

FIGURA 5 - Acompanhamento do armazenamento do reservatório cruzeta.



Fonte: ANA (2020).

2.3. Dados de entrada do modelo

O problema impõe a necessidade de obter informações operacionais, físicas e climatológicas do local para a simulação do balanço hídrico do reservatório. Por isso, fez-se o levantamento das variáveis de entrada que devem ser utilizadas.

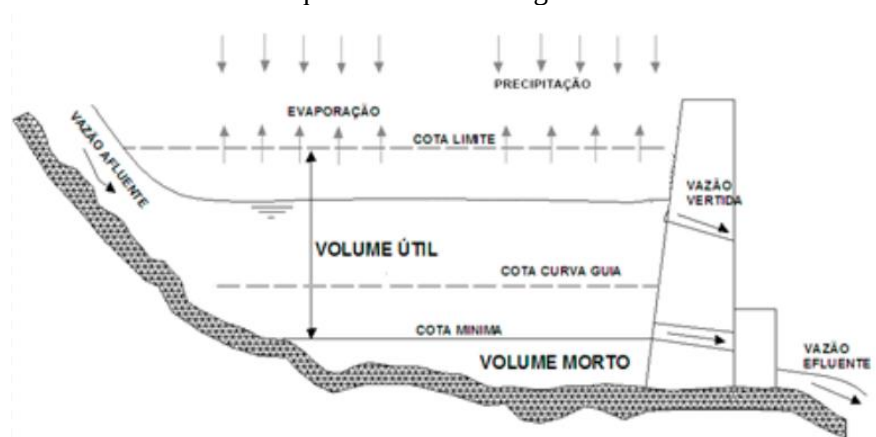
- Capacidade máxima ($S_{\max}$): disponibilizada pela Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do RN (SEMARH).
- Volume morto ($S_{\min}$): disponibilizado pela Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do RN (SEMARH).
- Relação Cota-área-volume (CAV): disponibilizada pela Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do RN (SEMARH).
- Vazões Afluentes (Q_t): disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas (ANA; MMA, 2017b).
 - Os dados históricos de vazões afluentes, iniciam em janeiro de 1913 e terminam em dezembro de 2012, totalizando um período de 100 anos de duração (1200 meses).
 - Os dados históricos selecionados para otimização foram de janeiro de 1913 e dezembro de 1982, totalizando um período de 70 anos (840 meses).
 - Os dados históricos selecionados para avaliação de performance foram de janeiro de 1983 e dezembro de 2012, totalizando um período de 30 anos (360 meses).

- Precipitação (P_t): disponibilizada no Plano de Recursos Hídricos da bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu (ANA; MMA, 2016).
- Evaporação (E_t): disponibilizada no Plano de Recursos Hídricos da bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu (ANA; MMA, 2016).
- Demanda (D_t): é composta pelas vazões outorgadas pela ANA para irrigação, abastecimento humano, dessedentação animal e usos industriais (tabela 2). Todas as demandas hídricas disponíveis no PRH (ANA; MMA, 2016) foram aplicadas constantemente durante o tempo de simulação com exceção da demanda por irrigação que assume valores variáveis conforme as outorgas emitidas pela ANA (figura 4).

2.4. Operação de reservatórios

O reservatório é um sistema com hidrodinâmica própria, composta por entradas de vazão natural afluente e precipitação direta, assim como saídas por evaporação, infiltração, vertimento e tomada de água (Figura 6). O esquema deste sistema nos revela que a variável de decisão com maior possibilidade de intervenção direta é a tomada de água (vazão efluente, Y_t) do reservatório, determinada por meio de uma regra de operação. Portanto, o comportamento do volume de água no reservatório foi analisado utilizando modelagem computacional de simulação do balanço hídrico mensal com distintas regras de operação. Na execução são adotadas equações de balanço hídrico de reservatório (TUCCI; SILVEIRA, 2015).

FIGURA 6 - Esquema de fluxo de água num reservatório.



Fonte: Modificado de BRAVO *et al.* (2008).

$$S_{tf} = S_t + Q_t + (P_t - E_t) * A_{medt} - Y_t - Sp_t \quad (1)$$

O intervalo de tempo entre iterações é mensal, de modo que, o indexador “t” indica o início do mês e “tf” indica o fim do mês. Assim, S_{tf} é o volume armazenado no final do intervalo (m^3); S_t é o volume armazenado no início do intervalo (m^3); Q_t é o volume afluente natural de entrada (m^3); P_t é a precipitação média ($m/mês$); E_t é a evaporação média ($m/mês$); A_{med_t} é a área média do reservatório (m^2); Y_t é o volume fornecido de água (m^3); e Sp_t é o volume vertido de água do reservatório (m^3).

$$A_{med_t} = \frac{(A_t + A_{tf})}{2} \quad (2)$$

No qual A_t e A_{tf} são respectivamente a área da lâmina de água do reservatório no início e no final do intervalo (m^2). A dependência da variável A_{tf} com S_{tf} provoca erro na estimativa de área média, visto que o processo se inicia considerando a área média como a área inicial do intervalo, então, corrige-se este cálculo por processo iterativo para minimizar tal erro (TUCCI; SILVEIRA, 2015).

A aplicação da modelagem exige o respeito aos limites das condições iniciais e de contorno. O volume contido no reservatório no início das simulações foi determinado como metade da capacidade máxima do reservatório. Então, os limites físicos e operacionais que se impõem para a liberação, armazenamento e volume vertido são:

$$0 \leq Y_t \leq D_t \quad (3)$$

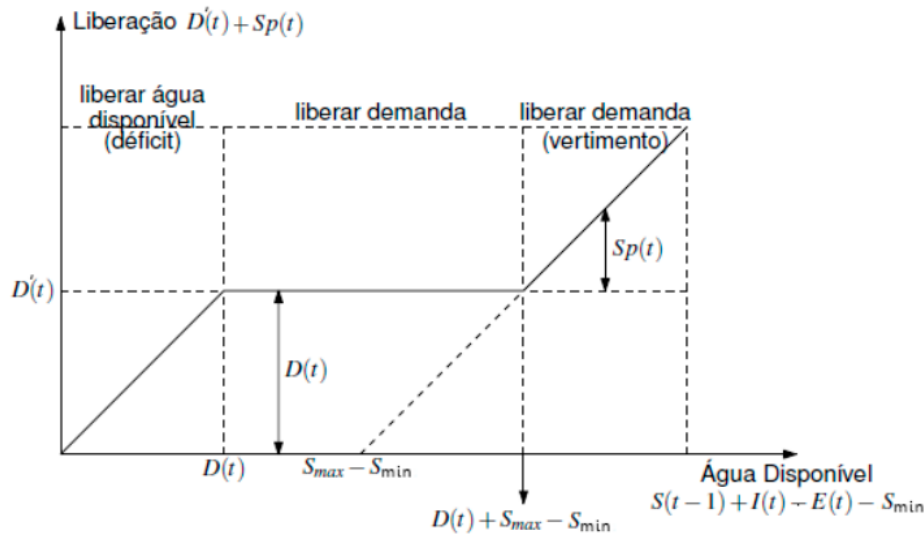
$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad (4)$$

$$Sp_t = \begin{cases} 0 & \rightarrow Se S_{tf} < S_{m\acute{a}x} \\ S_{tf} - S_{m\acute{a}x} & \rightarrow Se S_{tf} > S_{m\acute{a}x} \end{cases} \quad (5)$$

2.4.1. Regra de operação padrão

Para reservatórios de abastecimento, a chamada Regra de Operação Padrão (SOP) é a regra de operação mais simples. Segundo a SOP, a demanda deve ser satisfeita sempre que houver água suficiente, isto é, todo o armazenamento deve ser liberado para satisfazer as demandas o máximo possível (Figura 7). Em situações de água disponível inferior ao volume demandado no período, há ocorrência de falha (déficit). Quando houver maior disponibilidade de água do que demanda, o reservatório deve armazenar os excessos até sua capacidade máxima e vertimento.

FIGURA 7 - Liberação de água com a regra de operação padrão.



Fonte: CELESTE; HERBERT; CURI (2015).

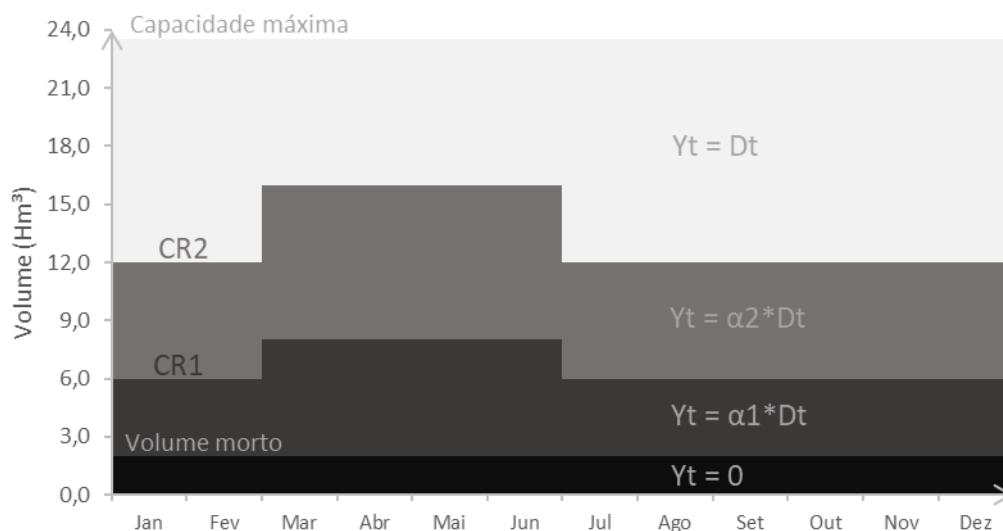
2.4.2. Regra de racionamento

Uma vez que a SOP não retém água para uso futuro, poderá causar maiores períodos de déficit durante as secas. Em tais casos, os operadores preferem restringir a liberação imediata de água, a fim de conservá-la e atenuar potenciais falhas futuras de abastecimento (CELESTE; HERBERT; CURI, 2015). Na ocorrência ou iminência de uma seca, os gestores de abastecimento de água esforçam-se para mitigar os impactos mesmo com informações escassas, de modo que, preferem utilizar restrições ou racionamento para reduzir o nível de demanda periodicamente e preservar o armazenamento para uso futuro (SHIH; REVELLE, 1995). Então, quando o reservatório de abastecimento de água estiver entrando em condições de estiagem torna-se necessário o conhecimento sobre a especificação de volumes armazenados para acionar e indicar o início e a extensão das restrições que devem ser utilizadas.

Então, a regra de racionamento consiste em curvas que delimitam zonas de armazenamento útil com restrição do fornecimento de água. A curva inferior (volume morto) define o nível de armazenamento mínimo para tomada d'água. As curvas críticas (CR1 e CR2), sob a regra de racionamento (figura 8), definem os níveis de volume armazenado que serão gatilho para aplicação do racionamento associado. As zonas de racionamento associam-se a fatores de racionamento, α_1 e α_2 , onde $0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq 1$ e

determinam o percentual de liberação de água (CHIAMSATHIT; ADELOYE; SOUDHARAJAN, 2014).

FIGURA 8 - Regra de operação com racionamento em dois períodos.



Fonte: Autor (2020).

2.4.3. Regra de racionamento utilizando a lógica fuzzy

A lógica *fuzzy* será aplicada na execução de uma inferência com o objetivo de determinar o fator de racionamento aplicado ao fornecimento de água às demandas. Semelhante à regra de racionamento, foram definidas curvas críticas (CR1 e CR2), para o período de estiagem e período úmido. Na regra de racionamento simples, os fatores de racionamento são alterados bruscamente quando o nível de armazenamento de água se move entre zonas. No entanto, na regra de racionamento utilizando lógica *fuzzy* os fatores de racionamento (α_1 e α_2) são alterados gradativamente quando o nível de armazenamento se move entre zonas.

A modelagem de um sistema *fuzzy* envolve basicamente a identificação de premissas e consequências, discretização do universo de discurso em conjuntos e identificação destes em termos linguísticos, onde cada conjunto seria associado a uma função de pertinência. Em geral, o sistema de inferência *fuzzy* é fundamentado em uma base de regras do tipo “se...então”, e tem seu funcionamento baseado em três etapas: (a) fuzzificação; (b) inferência; e (c) defuzzificação (YU *et al.*, 2005).

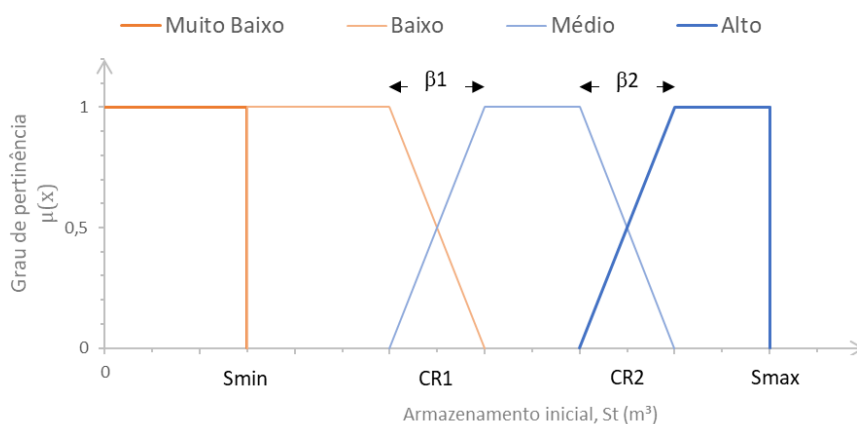
O processo se inicia com a identificação das variáveis de entrada precisas (do inglês *crisp*) com valores escalares. Então, a etapa de fuzzificação executa a decomposição da variável de entrada em conjuntos *fuzzy*, com a utilização de variáveis linguísticas e graus de pertinência correspondentes. Em sequência, a inferência *fuzzy* é responsável por avaliar a implicação de cada regra formulada e a agregação dos resultados para obter um conjunto *fuzzy* de saída. Uma vez obtido o conjunto de saída, o estágio de defuzzificação o associa a um valor numérico preciso (COX, 2005).

a. Fuzzificação

O processo de encontrar o grau de pertinência de um número escalar a um conjunto *fuzzy* é chamado de fuzzificação. Geralmente, a escolha das variáveis de entrada é realizada com base na disponibilidade de dados e em conhecimento de especialistas. Neste caso, a variável mais decisiva para a operação é o volume de água armazenado no reservatório, pois, tem relação direta com a disponibilidade para os usos das demandas. Portanto, optou-se como variável de entrada o volume de água disponível no final do mês anterior.

Desse modo, a entrada (S_t) é decomposta em graus de pertinência ($\mu(x)$) que se referem às variáveis linguísticas (Muito Baixo, Baixo, Médio e Alto), através de funções de pertinência (Figura 9). As variáveis de amplitudes (β_1 e β_2) referem-se às zonas de transição entre as classes de armazenamento e também são alvo da otimização junto com CR1, CR2, α_1 e α_2 . Sendo assim, se as funções de pertinência fossem retangulares ($\beta_1=0$ e $\beta_2=0$), como conjuntos clássicos (*crisp*) de uma lógica convencional, a inferência seria análoga a regra de racionamento (HR).

FIGURA 9 - Funções de pertinência trapezoidais para as zonas de armazenamento.

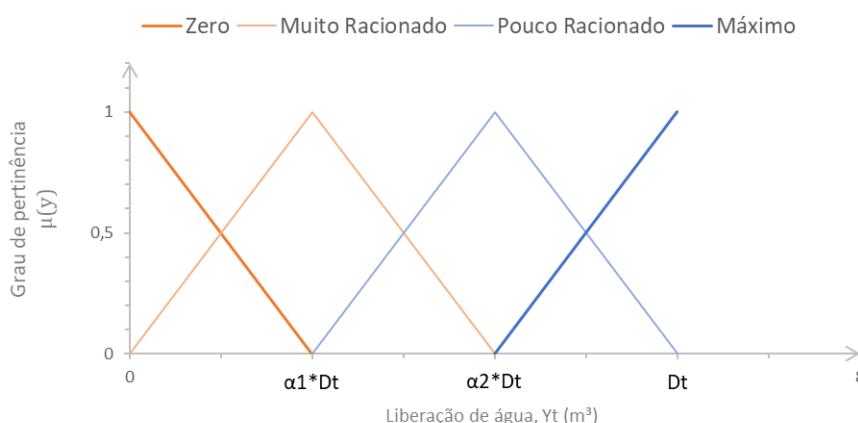


Fonte: Autor (2019).

Deve-se formular nessa etapa a função de pertinência que representa a implicação das regras e que está associada a variável de saída. Então, na etapa de inferência busca-se

determinar a liberação de água (Y_t) através de funções de pertinência (figura 10) e a implicação nos graus de pertinência ($\mu(y)$). Perceba que os fatores de racionamento (α_1 e α_2) são multiplicados a D_t para minorar o fornecimento de água às demandas e representar o valor associado a cada classe de suprimento de água (Zero, Muito Racionado, Pouco Racionado, Máximo).

FIGURA 10 - Funções de pertinência triangulares para o fornecimento de água.



Fonte: Autor (2020).

b. Inferência

Após a fuzzificação, é formulado a base de regras para execução da inferência para que se possa conhecer a implicação das regras, e então, proceder com a agregação do resultado de cada regra em um único conjunto *fuzzy*. Se a premissa de uma determinada regra tiver mais de uma variável de entrada, um operador *fuzzy* de implicação deverá ser aplicado para obter um número que represente a consequência de cada regra (CELESTE; HERBERT; CURI, 2015). Contudo, o modelo desenvolvido utilizará apenas uma variável de entrada, e assim, foi formulada a base de conhecimento contendo quatro regras expressas da seguinte forma:

- Regra 1: SE Armazenamento é Alto ENTÃO Suprimento é Máximo
- Regra 2: SE Armazenamento é Médio ENTÃO Suprimento é Pouco Racionado
- Regra 3: SE Armazenamento é Baixo ENTÃO Suprimento é Muito Racionado
- Regra 4: SE Armazenamento é Muito Baixo ENTÃO Suprimento é Zero

c. Defuzzificação

Nessa etapa, os resultados agregados da inferência servirão para obter um resultado final escalar. Várias abordagens podem ser tomadas para defuzzificar um conjunto *fuzzy*. O mais comum é o método centroide (ou centro de gravidade), que essencialmente computa a

média ponderada do conjunto *fuzzy* de saída e foi utilizado para determinação do valor preciso de suprimento de água (COX, 2005).

$$G = \frac{\sum y_i * \mu(y_i)}{\sum \mu(y_i)} \quad (6)$$

No qual o G é o valor de saída defuzzificado, y_i é o valor associado ao conjunto difuso de saída da i -ésima regra e $\mu(y_i)$ é o grau de pertinência ao conjunto de y_i . O processo de inferência *fuzzy* pode ser melhor entendido através de exemplo de aplicação (Apêndice A).

O sistema de inferência *fuzzy* baseado em regras (do inglês *Fuzzy Rule-Based System*) se tornou um método poderoso para lidar com vários problemas, como incerteza, imprecisão e não linearidade. Eles são comumente usados para tarefas de identificação, classificação e regressão. Dentre os pacotes disponíveis para uso em linguagem de programação R, o pacote “FRBS” (BERGMEIR; BEN, 2015) foi selecionado para formulação da regra de racionamento *fuzzy*.

2.5. Formulação da otimização

A pesquisa buscou otimizar as variáveis das regras de racionamento e de racionamento com aplicação de lógica *fuzzy*. O racionamento foi definido em dois níveis de curva crítica (CR1 e CR2), configurando duas zonas de racionamento e uma zona sem racionamento. Ademais, foi determinado os meses de estiagem no ano com o objetivo de amenizar os riscos característicos desse período no semiárido, ambas as regras de operação foram segmentadas em dois períodos, o período de estiagem e o período úmido. Portanto, os procedimentos adotados para definição dos meses secos foram os seguintes:

- Obtenção da série histórica de vazões afluentes naturais e cálculo das médias mensais (Tabela 1);
- Ordenação das vazões médias mensais em ordem crescente. Os meses considerados como secos ocorrem quando as vazões médias são inferiores ou iguais ao percentil de 25%.
- Foi categorizado como período seco os meses de julho até fevereiro; e como período úmido os meses de março até junho, quando ocorre em média 83% da recarga.

Portanto, a regra de racionamento (HR) foi otimizada através de seis variáveis de decisão, visto que, são quatro variáveis para determinação dos níveis críticos de racionamento (CR1.s e CR2.s, para o período seco; CR1.u e CR2.u, para o período úmido) e

dois coeficientes de racionamento (α_1 e α_2). Por fim, a regra de racionamento com aplicação da lógica *fuzzy* (FHR) foi otimizada através de oito variáveis de decisão, duas variáveis de amplitude das zonas de transição (β_1 e β_2) somadas as mesmas seis variáveis utilizadas na regra “HR”.

O pacote “GA” (SCRUCCA, 2013) foi utilizado na modelagem da otimização da regra de racionamento. “GA” é um pacote de algoritmo genético em linguagem R de uso geral para a implementação da busca de otimização tanto no caso contínuo quanto no discreto, restrito ou não. Os usuários podem facilmente definir sua própria função objetivo, dependendo do problema em questão. Vários operadores genéticos estão disponíveis e podem ser combinados para explorar as melhores configurações para a tarefa desejada (SCRUCCA, 2013). Assim sendo, foram estabelecidos a função objetivo, as restrições e os parâmetros de otimização.

Função objetivo

A função objetivo (FO) consistiu em maximizar a eficiência do atendimento as demandas em meses de estiagem (Equação 7). Optou-se pela FO como apresentada, uma vez que durante o período de estiagem há maior demanda hídrica (Figura 4) e menor disponibilidade de vazões afluentes, quando o reservatório se encontra sob maior estresse hídrico.

$$\text{Maximizar } R_{v.seco} = \frac{\sum_{s=1}^S Y_s}{\sum_{s=1}^S D_s} \quad (7)$$

No qual “ Y_s ” é o volume de água fornecido em um mês seco “ Δs ”, “ D_s ” é o volume de água demandado em um mês seco “ Δs ”, “ S ” é o total de meses secos simulados.

Restrições e limites

É de grande importância a correta formulação de restrições pois elas são imprescindíveis para a delimitação exata do problema, e obtenção do resultado otimizado dentro dos intervalos viáveis. Então, são aplicadas as restrições igualmente para os períodos secos e úmidos. As restrições operacionais, limites máximos e mínimos são:

$$\begin{aligned}
R1: \quad & S_{min} \leq CR1 \leq CR2 \leq S_{max} \\
R2: \quad & 0 \leq \alpha1 \leq \alpha2 \leq 1 \\
R3: \quad & 0 \leq \beta1 \leq (CR2 - CR1) \\
R4: \quad & \beta1/2 \leq (CR1 - S_{min}) \\
R5: \quad & 0 \leq \beta2 \leq (CR2 - CR1) \\
R6: \quad & \beta2/2 \leq (S_{max} - CR2) \\
R7: \quad & \sum Y_{prioritário} \geq 0,75 * \sum D_{prioritário}
\end{aligned}$$

As amplitudes " β " são submetidas às restrições (R3, R4, R5 e R6) para que não seja possível a superposição indesejada das zonas de transição entre curvas críticas, de um modo que não foi previsto na formulação da inferência *fuzzy*. A amplitude é uma zona simétrica entorno da curva crítica de volume armazenado, com metade da amplitude acima e metade abaixo da curva crítica. As restrições R3 e R5 delimitam o limite para que as zonas de transição gradual $\beta1$ e $\beta2$ não se sobreponham. Assim, a restrição R4 e R6 definem o limite para que metade das amplitudes $\beta1$ e $\beta2$ não ultrapassem S_{min} abaixo de CR1 e S_{max} acima de CR2, respectivamente.

A restrição R7 diz respeito a indicação apresentada pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) sobre a priorização em situações de estiagem, a qual " $Y_{prioritário}$ " é o volume fornecido para abastecimento humano e dessedentação animal e " $D_{prioritário}$ " o volume demandado. O somatório envolve o intervalo de tempo total na otimização da operação do reservatório. A restrição R7 foi calibrada em 75%, pois, o processo de otimização demonstrou dificuldade em evoluir quando restrito para garantir a eficiência prioritária recomendada de 90%, durante o período de 1913 a 1982 dos dados.

Parâmetros do algoritmo genético

Uma breve revisão dos valores de cada parâmetro principal também fornece uma lista de propriedades de controle necessárias em um algoritmo genético (COX, 2005). O funcionamento correto requer a configuração dos parâmetros, embora haja sugestão do desenvolvedor de valores padrão.

- Tamanho da população: O número de indivíduos, na população. Para a tarefa desejada se estabeleceu uma população de 100 indivíduos;

- Número máximo de gerações: o número de iterações a serem executadas antes que a pesquisa do “GA” seja interrompida. Ajustou-se este parâmetro para 3000 gerações;
- Taxa de retenção: o número de indivíduos com melhor condicionamento para sobreviver a cada geração. Por padrão, os 5% melhores indivíduos sobreviverão a cada iteração;
- Taxa de cruzamento: a probabilidade de cruzamento entre pares de indivíduos. Normalmente, esse é um valor grande e, por padrão, é definido como 0,8;
- Taxa de mutação: a probabilidade de ocorrer mutação no processo de cruzamento de indivíduos. Geralmente, a mutação ocorre com uma pequena probabilidade e, por padrão, é definida como 0,1.

2.6. Avaliação de performance

A avaliação de performance foi realizada utilizando os valores otimizados na etapa anterior, para a regra de racionamento e regra de racionamento com aplicação da lógica fuzzy, assim como, para a regra de operação padrão. O período utilizado para a avaliação na simulação é de 1983 a 2012. Para investigar a eficácia das regras de operação, foram escolhidos os indicadores de performance para avaliação por simulações do reservatório. As descrições, assim como a definição matemática dos indicadores (LONGOBARDI; MAUTONE; DE LUCA, 2015)(CHIAMASATHIT; ADELOYE; SOUDHARAJAN, 2014)(HASHIMOTO; STEDINGER; LOUCKS, 1982), são apresentadas a seguir:

- Vulnerabilidade (v)

$$v = \frac{\sum_{t=1}^T [D_t - Y_t]}{F_s} \quad (11)$$

É a gravidade ou o impacto das consequências de falhas. No presente estudo, entende-se vulnerabilidade como a média de déficit hídrico que ocorre durante períodos contínuos de falha. Onde, Y_t é o volume de água fornecido no intervalo “ Δt ”; D_t é o volume de água demandado no intervalo “ Δt ”; T é o total de meses simulados e F_s é a quantidade total de eventos contínuos de falha.

Então, uma falha é contabilizada sempre que o fornecimento de água não satisfaz a demanda completamente naquele mês, ou seja, quando $Y_t < D_t$ anterior “ $\Delta t-1$ ” ocorre falha e no mês atual “ Δt ” ocorre sucesso no atendimento às demandas.

- Número de meses no volume morto (T_{morto}):

O total de meses no volume morto revela a duração de tempo em que ocorre colapso no abastecimento. É contabilizado sempre que o volume disponível no reservatório for inferior ao volume morto ($S_t < S_{\text{min}}$).

- Confiabilidade (R_t):

$$R_t = 1 - \frac{F}{T} \quad (8)$$

É a probabilidade de um sistema manter-se em estado totalmente satisfatório. Sendo assim, as equações de avaliação de performance utilizam a variável F para o total de meses em que ocorre falha e T para o total de meses simulados.

- Eficiência ou Confiabilidade volumétrica (R_v)

$$R_v = \frac{\sum_{t=1}^T Y_t}{\sum_{t=1}^T D_t} \quad (9)$$

É a eficiência geral de atendimento em unidade de volume do fornecimento de água com relação a demanda. Onde, Y_t é o volume de água fornecido no intervalo “ Δt ”; D_t é o volume de água demandado no intervalo “ Δt ”; e T é o total de meses simulados.

- Eficiência prioritária e não prioritária:

Também é importante realizar a avaliação da eficiência do reservatório somente ao atendimento às demandas prioritárias em separação das demais demandas para tornar mais claro se as diferentes regras de operação atendem as recomendações da PNRH. Portanto, a eficiência prioritária ($R_v.\text{prior}$) é calculada sob a equação 9, a qual modifica-se “ D_t ” para o volume de demanda prioritária e “ Y_t ” para o volume fornecido apenas aos usos prioritários. De forma análoga, é realizada a modificação da equação 9 para eficiência não prioritária ($R_v.\text{nprior}$).

- Eficiência por período do ano:

A fim de analisar a eficiência do reservatório com foco nos períodos de estiagem, foram realizados os cálculos distinguindo dois períodos do ano, o período seco e o úmido. Portanto, a eficiência no período seco ($R_v.\text{seco}$) é calculada sob a equação 9, onde modifica-se o intervalo de tempo “ t ” para contabilizar apenas meses durante o

período seco (julho a fevereiro), o mesmo para a eficiência do período úmido (Rv.umido) durante esse período (março a junho).

- Resiliência (r)

$$r = \frac{F_s}{F} \quad (10)$$

É a rapidez com que se recupera de falhas. Onde, F_s é a quantidade total de eventos de falha continua e F é o total de meses em que ocorre falha.

- Proporção de fluxos de saída de água:

Percentual em que ocorrem diferentes saídas de água do reservatório. Podem ocorrer por fornecimento às demandas (%Suprido), perdas por vertimento (%Vertido) e perdas por evaporação (%Evaporado).

3. RESULTADOS

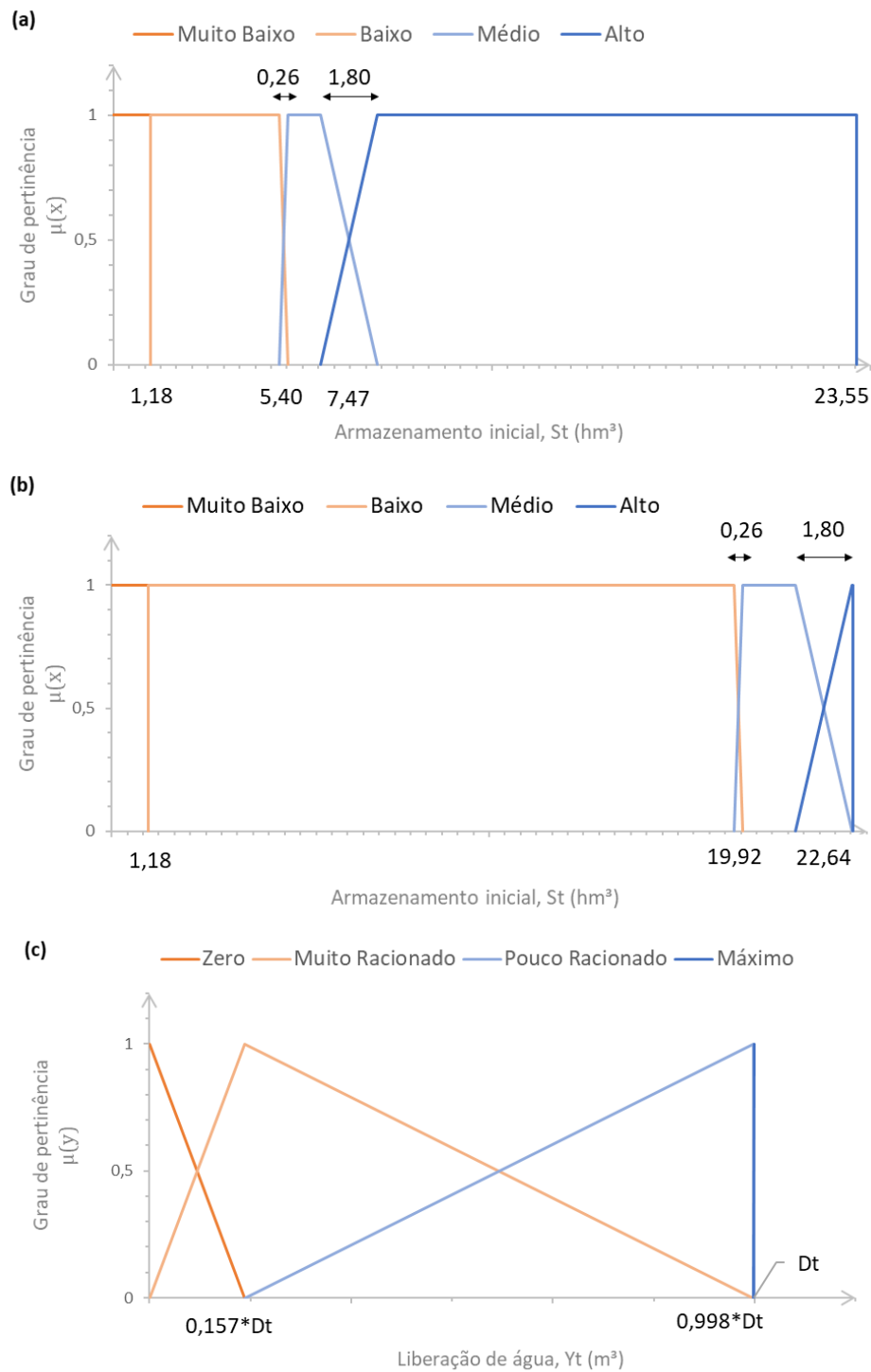
Inicialmente, foram obtidos os valores das variáveis submetidas ao processo de otimização por algoritmo genético (Tabela 3) pelo período de dados de 1913 a 1982 (840 meses). A composição dessas variáveis forma a regra de racionamento baseada em lógica *fuzzy* (FHR) e a regra de racionamento da operação (HR), com mudança entre período seco e úmido. A fim de visualizar e comparar as variáveis otimizadas das regras de racionamento do reservatório Cruzeta, a figura 12 apresenta a regra “FHR”, através de funções de pertinência da inferência *fuzzy*, e a figura 13 apresenta a regra “HR” através das zonas e fatores de racionamento ao longo do tempo. Nessas figuras indicou-se os níveis de armazenamento que definem as curvas críticas, para os dois períodos do ano, os fatores de racionamento e as amplitudes da inferência *fuzzy*, no caso da regra “FHR”.

Tabela 3: Variáveis das regras de racionamento (HR e FHR) resultantes da otimização.

	CR1.s (hm ³)	CR2.s (hm ³)	CR1.u (hm ³)	CR2.u (hm ³)	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\beta 1$ (hm ³)	$\beta 2$ (hm ³)
HR	5,24	5,38	20,31	22,40	14,85%	46,78%		
FHR	5,40	7,47	19,92	22,64	15,70%	99,83%	0,26	1,80

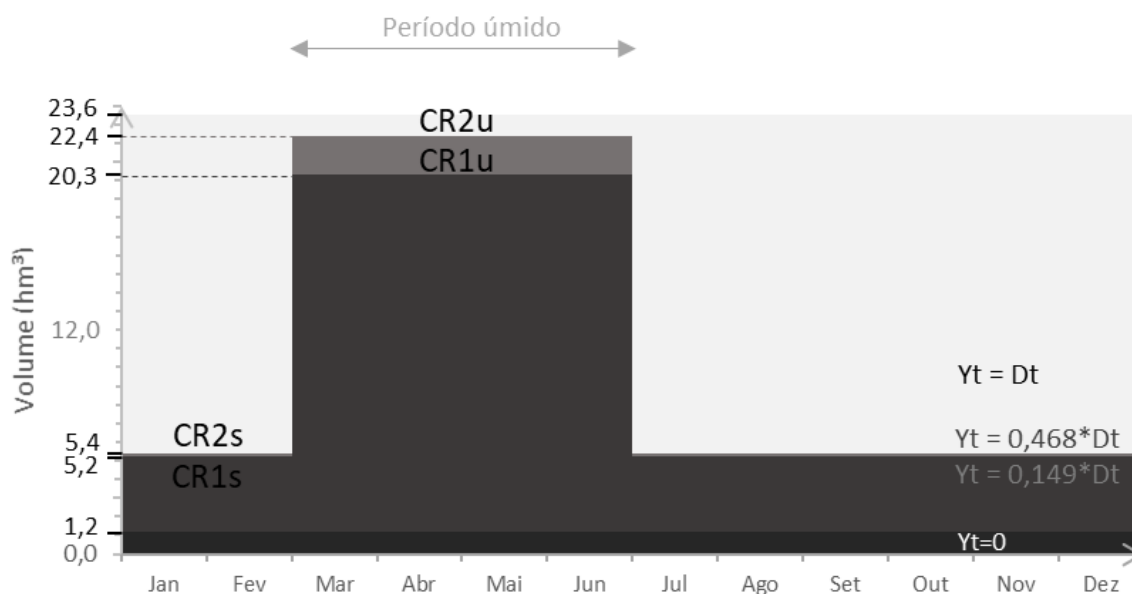
Fonte: Autor (2020).

FIGURA 11 - Regra de racionamento com aplicação de lógica *fuzzy* otimizada (FHR). (a) Funções de pertinência para as zonas de armazenamento no período seco; (b) Funções de pertinência para as zonas de armazenamento no período úmido; (c) Funções de pertinência para liberação de água.



Fonte: Autor (2020).

FIGURA 12 - Regra de racionamento otimizada (HR).

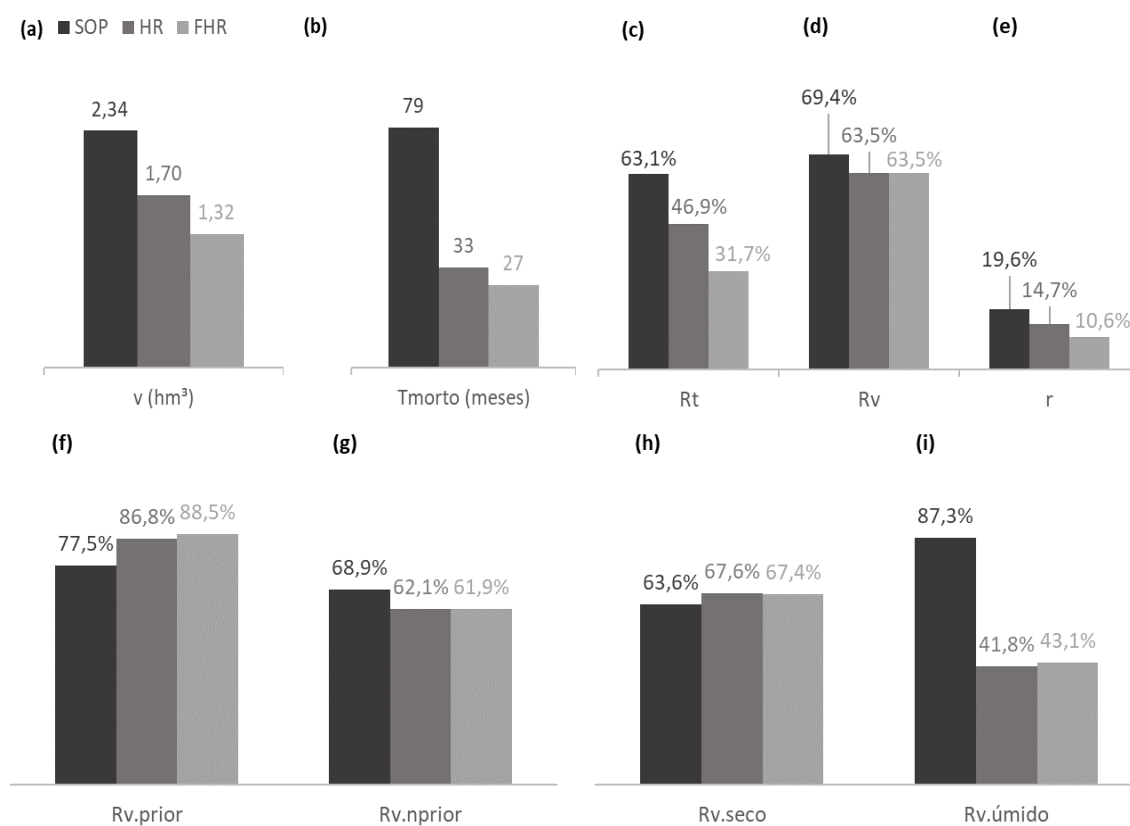


Fonte: Autor (2020).

Analisando a aplicação das regras de operação com valores ótimos para o período de dados de 1983 a 2012 (360 meses), temos como resposta a avaliação da performance do reservatório (figura 14) e a repartição do volume de saída em: vazão liberada para o atendimento da demanda, volume evaporado e volume vertido (figura 15). Os resultados dos indicadores de performance apresentam detalhes quanto ao efeito da escolha de diferentes regras de operação.

Essencialmente, o resultado apresentado na Figura 14 (a) mostra que o uso de regras de racionamento promove redução da vulnerabilidade do reservatório comparado a regra “SOP” ($v = 2,34 \text{ hm}^3$), -27,4% para “HR” e -43,6% para “FHR”. Da mesma maneira, ocorre redução no tempo em que o reservatório se encontra em colapso de abastecimento (Figura 14 (b)), 46 meses a menos para a regra de racionamento (HR) e 52 meses a menos para a regra de racionamento utilizando lógica *fuzzy* (FHR). Desta forma, períodos contínuos de falha teriam, em média, menor impacto sobre os usuários e haveria menor tempo total com o reservatório no volume morto.

FIGURA 13 - Indicadores de performance resultantes de simulação das regras de operação. (a) Vulnerabilidade; (b) Total de meses no volume morto; (c) Confiabilidade; (d) Eficiência; (e) Resiliência; (f) Eficiência no atendimento prioritário; (g) Eficiência no atendimento não prioritário; (h) Eficiência no período seco; e (i) Eficiência no período úmido.



Fonte: Autor (2020).

Percebe-se que os indicadores usualmente estudados, que são a confiabilidade (Figura 14(c)), eficiência volumétrica (Figura 14(d)) e a resiliência (Figura 14(e)), sofreram redução quando se faz a alteração da regra “SOP” para a regra “HR” e para a regra “FHR”. A deterioração significativa da confiabilidade ocorre em virtude da frequência em que é necessário fazer racionamentos para transferir água para o período de estiagem e de esses racionamentos gerarem falhas. Apesar disso, houve redução do volume de escassez por períodos contínuos, constatada pelos indicadores de vulnerabilidade e tempo no volume morto. Assim, em consequência de o volume de demanda ser parcialmente atendido com os racionamentos, a confiabilidade volumétrica do reservatório foi afetada em menor proporção que a confiabilidade baseada no tempo. Deve-se avaliar que o importante na operação do reservatório não é o número de ocasiões de falha, mas o déficit sustentado durante essas falhas (CHIAMSATHIT; ADELOYE; SOUDHARAJAN, 2014).

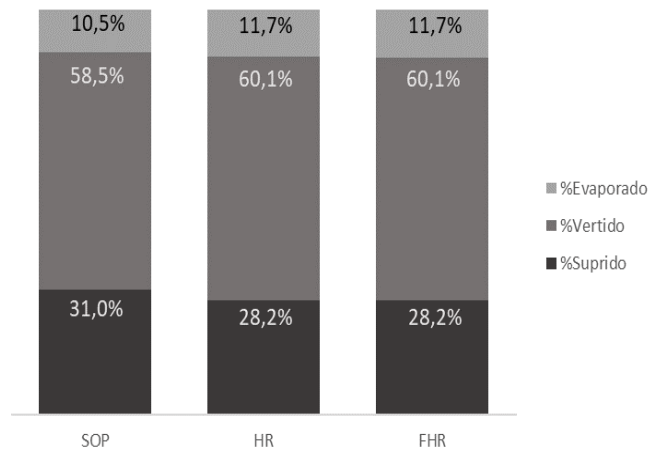
Então, constata-se que a eficiência de atendimento aos usos prioritários obteve melhora em relação a “SOP” (Figura 14 (f)), com +9,3% para “HR” e +11% para a “FHR”, enquanto que a eficiência de atendimento aos usos não prioritários (Figura 14 (g)) teve

redução, com -6,8% para “HR” e -7% para “FHR”. Esses resultados revelam que o uso das regras de racionamento tem potencial para aperfeiçoar a operação, uma vez que há aumento da garantia do abastecimento prioritário ao passo que as atividades econômicas não são excessivamente penalizadas. Também é possível alterar a formulação da otimização a fim de alcançar maior eficiência de atendimento aos usos prioritários e, desse modo, implicar em um racionamento mais restritivo.

Contudo, ao se analisar a eficiência volumétrica por período do ano de forma separada percebe-se que, em relação a “SOP”, ambas regras de racionamento elevam a eficiência de atendimento no período seco (Figura 14 (h)), em +4% para a regra “HR” e em +3,8% para a regra “FHR”. A eficiência no período seco é a função objetivo da otimização, mesmo assim o leve aperfeiçoamento desse indicador revela que o período seco impõe condições climatológicas adversas, como esperado. Em troca, ocorre uma relevante redução da eficiência no período chuvoso do ano (Figura 14 (i)), -45% para a “HR” e -44,2% para “FHR”. Nos meses úmidos ocorre maior precipitação direta na produção agrícola, quando há menor demanda por irrigação. Assim, essa redução na eficiência poderia ser contornada através da oferta de água por fontes alternativas disponíveis no período úmido, reuso de águas residuárias, técnicas para redução de desperdício, ou mesmo, do aproveitamento das perdas por vertimento.

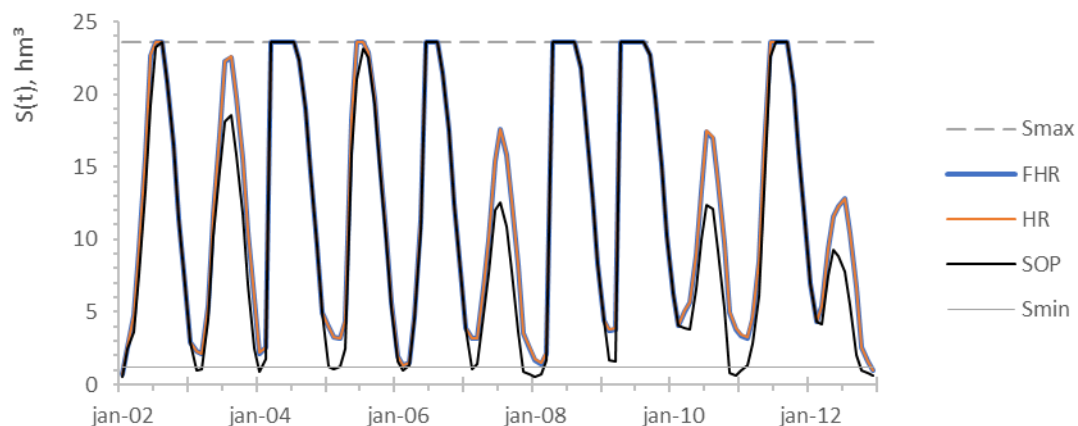
Aliás, os fluxos de saída de água do reservatório (Figura 15) mostram que a climatologia semiárida e as características desse reservatório induzem grandes perdas por vertimento, na ordem de 58,5% sob “SOP” e 60,1% sob as demais regras. Por evaporação se perdeu 10,5% do volume de saídas de água com a regra “SOP”, enquanto que sob “HR” e “FHR” evaporou 11,7%. Isso ocorre, pois, as chuvas na área em estudo são demasiadamente concentradas no período chuvoso do ano, confirmando a grande variabilidade interanual característica do semiárido. Assim, é recomendado avaliar a viabilidade de ampliação da capacidade de armazenamento através da construção de um sistema integrado de reserva complementar, o que permitiria otimizar a operação com o aproveitamento de perdas por vertimento no período úmido.

FIGURA 14 - Indicadores de proporção do fluxo de saída de água.



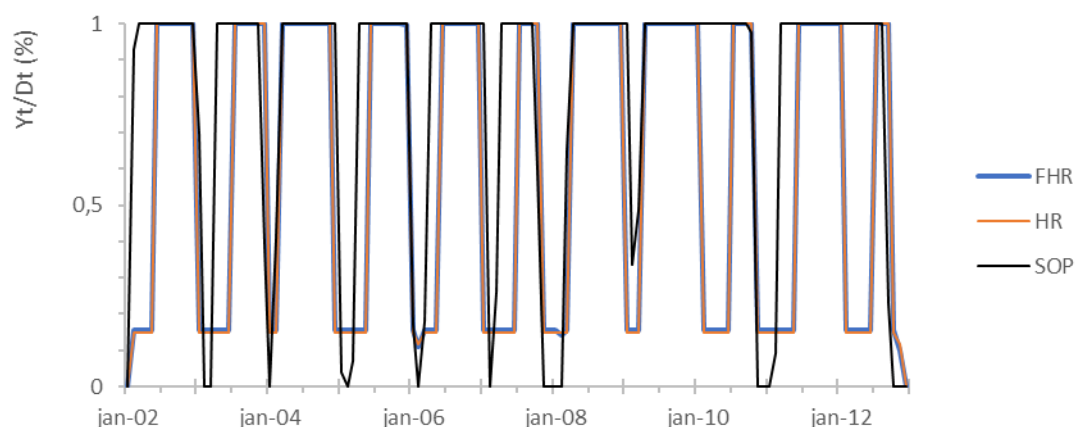
Fonte: Autor (2020).

Então, para que seja possível visualizar as respostas das simulações do balanço hídrico do reservatório foram gerados gráficos referentes ao acompanhamento do volume armazenado (Figura 16) e eficiência mensal no atendimento geral às demandas (Figura 17), no período de 2002 a 2012. Visualiza-se ao longo do tempo que a diferença entre as regras “HR” e “FHR” é discreta, tanto no armazenamento do reservatório quanto na liberação de água. Esse comportamento semelhante pode ter ocorrido em virtude do valor reduzido das amplitudes da inferência *fuzzy* ($\beta_1=0,26\text{hm}^3$ e $\beta_2=1,80\text{hm}^3$), da proximidade entre os valores de “ α_1 ”, assim como pela similaridade nos níveis das curvas críticas e tamanho reduzido da zona pouco racionada (CR2-CR1). Entretanto, o comportamento resultante da regra “SOP” teve maior diferença, constatado pela maior frequência de paradas no abastecimento.

FIGURA 15 - Armazenamento acumulado no tempo sob a regra de operação padrão (SOP), regra de racionamento (HR) e regra de racionamento utilizando *fuzzy* (FHR).

Fonte: Autor (2020).

FIGURA 16 - Eficiência mensal no atendimento a todas as demandas sob a regra de operação padrão (SOP), regra de racionamento (HR) e regra de racionamento utilizando *fuzzy* (FHR).



Fonte: Autor (2020).

Dessa forma, o aumento da frequência de racionamentos provocou a redução da resiliência, mostrando que o reservatório se recupera com menor rapidez dos eventos de falha contínua. É relevante ressaltar que as falhas por racionamento ocorrem de modo que a redução de fornecimento de água é aplicada primeiramente em demandas não prioritárias. Logo, a metodologia de análise dos indicadores por simulação pode embasar decisões na alocação negociada entre usuários e gestores, uma vez que se evidencia um balanço entre o uso benéfico máximo com maior vulnerabilidade ao colapso de abastecimento e o uso benéfico racionado com redução da vulnerabilidade e duração de colapso total no abastecimento.

O reservatório Cruzeta foi projetado em 1920, dentro de um contexto diferente de uso e ocupação do solo e de regime hidrológico. As mudanças desses fatores ao longo do tempo deterioraram a capacidade desse manancial em atender às demandas. A imposição de períodos de estiagem severa e o impacto dessa realidade sobre os usuários exigem a busca de melhores regras de operação do reservatório, políticas públicas de incentivo ao reuso de água, técnicas de uso racional, aproveitamento de águas pluviais urbanas e controle de desperdícios, ações que atuem na gestão da disponibilidade e da demanda.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta uma metodologia para otimização com algoritmo genético da regra de operação com aplicação da lógica *fuzzy* (FHR) de um reservatório isolado no semiárido, comparando sua performance com a regra de operação padrão (SOP) e regra de racionamento (HR), também otimizada por algoritmo genético. Dentre as regras avaliadas

para o reservatório Cruzeta, a regra “FHR” apresentou melhor desempenho na maioria dos indicadores avaliados. Isso pode ser constatado através da maior eficiência de atendimento às demandas prioritárias, assim como, relevante redução na vulnerabilidade e no tempo com armazenamento no volume morto. Além disso, a regra utilizando a lógica *fuzzy* resultou em uma melhoria de eficiência no período seco do ano, quando ocorre a maior demanda dos usuários por água.

Ressalta-se que a diferença de resultados foi pequena entre a regra de operação “FHR” e “HR”, contudo, pequenas diferenças percentuais dos indicadores podem representar valores relevantes em termos de volume de água. A regra “SOP” apresenta maior eficiência geral pois não impõe racionamento, no entanto, não é a regra mais indicada por ter menor eficiência em disponibilizar água para a demanda prioritária e no período de maior necessidade (período seco).

A otimização através do algoritmo genético foi crucial para a melhoria de desempenho das regras de operação. As regras de racionamento e a lógica *fuzzy* apenas garantem ganhos de eficiência na performance quando associadas a otimização. Assim, a simulação e otimização com uso de inferência *fuzzy* em problemas de operação de reservatórios mostrou benefícios e potencial para a busca por melhores opções de regras de operação. Quanto melhor formulado o processo de otimização melhor os resultados, logo, há uma gama de possibilidades para investigar variadas regras de racionamento *fuzzy*, como por exemplo; a incorporação de mais variáveis de entrada na inferência como precipitação ou vazão afluente no mês anterior ou previsão destes dados; otimização de variáveis de decisão mês a mês; ou ainda a calibração do modelo com variação na função objetivo e restrições. Contudo, o incremento de variáveis aumenta o tempo de processamento e exige maior capacidade de computação.

Portanto, o uso da lógica *fuzzy* e de otimização por algoritmo genético na definição de regras de operação de reservatórios no semiárido mostra ser promissor e apresentou a melhor performance com o objetivo de amenizar os impactos das secas. Os resultados da regra “HR” apresentaram performance levemente inferior a “FHR”, portanto, uma regra de operação com vantagens desejáveis na mitigação das estiagens. Logo, tanto a regra de racionamento (HR) quanto a regra de racionamento utilizando lógica *fuzzy* (FHR), uma vez otimizados por algoritmo genético, se mostraram boas alternativas para a gestão desse reservatório perante demandas acima da Q_{90} e sob eventos de estiagem severa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMADIANFAR, Iman; ADIB, Arash; TAGHIAN, Mehrdad. Optimization of multi-reservoir operation with a new hedging rule: application of fuzzy set theory and NSGA-II. **Applied Water Science**, [S. l.], v. 7, n. 6, p. 3075–3086, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0434-z>
- AKTER, Taslima; SIMONOVIC, Slobodan P. Modelling uncertainties in short-term reservoir operation using fuzzy sets and a genetic algorithm. **Hydrological Sciences Journal**, [S. l.], v. 49, n. 6, p. 1081–1098, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1623/hysj.49.6.1081.55722>
- ANA, Agência Nacional de Águas. **Portal do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos**. [s. l.], 2019. Disponível em: <http://portal1.snirh.gov.br/ana>. Acesso em: 1 set. 2019.
- ANA, Agência Nacional de Águas. **SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar0/Medicao>. Acesso em: 4 jun. 2020.
- ANA, Agência Nacional de Águas; MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Plano de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu (relatório técnico)**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <http://www.cbhpiancopiranhasacu.org.br/portal/prh-bacia-piranhas-acu/>.
- ANA, Agência Nacional de Águas; MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Conjuntura Recursos Hídricos do Brasil 2017: Relatório pleno.Ministério do Meio Ambiente (MMA)**. [S. l.: s. n.].
- ANA, Agência Nacional de Águas; MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Reservatórios do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação : Relatório Síntese.Ministério do Meio Ambiente (MMA)**. Brasília: [s. n.], 2017 b.
- BERGMEIR, Christoph; BEN, Manuel. frbs : Fuzzy Rule-Based Systems for Classification. **Journal of Statistical Software**, [S. l.], v. 65, n. 6, p. 1–30, 2015.
- BOLOURI-YAZDELI, Y. *et al.* Evaluation of real-time operation rules in reservoir systems operation. **Water Resources Management**, [S. l.], v. 28, n. 5, p. 715–729, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0510-1>
- BRAVO, Juan Martín *et al.* Otimização de Regras de Operação de Reservatórios com Incorporação da Previsão de Vazão. **RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 13, p. 181–196, 2008.
- CELESTE, A. B.; HERBERT, M. H. A.; CURI, H. F. Regras operacionais de reservatório derivadas por um sistema de inferência Neuro-Fuzzy adaptativo. **X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Fortaleza, Brazil, 2010.**, [S. l.], n. June, 2015.
- CHIAMSATHIT, Chuthamat; ADELOYE, A. J.; SOUDHARAJAN, B. Genetic algorithms optimization of hedging rules for operation of the multi-purpose Ubonratana Reservoir in Thailand. **Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water–Society Interactions Proceedings of ICWRS2014**, [S. l.], v. 364, n. June, p. 507–512, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/piahs-364-507-2014>
- COX, Earl. **Fuzzy Modeling and Genetic Algorithms for Data Mining and Exploration**. [S. l.]: Elsevier, 2005. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-194275-5.X5000-2>
- DRAPER, Andrew; LUND, Jay R. Optimal Hedging and Carryover Storage Value. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S. l.], v. 130, n. JULY, 2004. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:1\(83\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:1(83))
- EUM, Hyung-il; KIM, Young-oh; PALMER, Richard N. Dynamic Programming with a

- Hedging Rule. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S. l.], v. 137, n. January/February, p. 113–122, 2011. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000095](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000095) CE
- FERREIRA, Radmila Salviano; BECKER, Vanessa; CUNHA, Karina Patrícia Vieira da. **Qualidade da água de um reservatório e do solo da zona ripária sob diferentes usos na região semiárida do Rio Grande do Norte**. 2015. - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [s. l.], 2015.
- HASHIMOTO, Tsuyoshi; STEDINGER, Jery R.; LOUCKS, Daniel P. Reliability , Resiliency , Robustness , and Vulnerability Criteria for Water Resource Systems. **Water Resources Research**, [S. l.], 1982. Disponível em: <https://doi.org/DOI10.1016/j.pep.2010.08.003>
- LONGOBARDI, A.; MAUTONE, M.; DE LUCA, C. Reservoirs performances under climate variability: a case study. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, [S. l.], v. 364, n. June, p. 526–531, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/piahs-364-526-2014>
- MOORTHY, P. V. P.; SINGH, A. P.; AGNIVESH, P. Regulation of water resources systems using fuzzy logic: a case study of Amaravathi dam. **Applied Water Science**, [S. l.], v. 8:132, n. 132, p. 1–11, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0777-8>
- NUNES, Tereza Helena Costa; GALVÃO, Carlos de Oliveira; RÊGO, Janiro Costa. Rule curve for seasonal increasing of water concessions in reservoirs with low regularized discharges. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos Brazilian Journal of Water Resources**, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 493–501, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011615146>
- PANIGRAHI, D. P.; MUJUMDAR, P. P. Reservoir operation modelling with fuzzy logic. **Water Resources Management**, [S. l.], v. 14, n. 2, p. 89–109, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1008170632582>
- R CORE TEAM, 2018. **R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing**. Vienna, Austria: [s. n.], 2018. Disponível em: <https://www.r-project.org/>
- SCRUCCA, Luca. GA : A Package for Genetic Algorithms in R. **Journal of Statistical Software**, [S. l.], v. 53, n. 4, 2013.
- SHIH, Jhih Shyang; REVELLE, Charles. Water supply operations during drought: A discrete hedging rule. **European Journal of Operational Research**, [S. l.], v. 82, n. 1, p. 163–175, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)E0237-R](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)E0237-R)
- TU, Ming-Yen; HSU, Nien-Sheng; YEH, William W. G. Optimization of Reservoir Management and Operation with Hedging Rules. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S. l.], v. 129, n. 2, p. 86–97, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2003\)129:2\(86\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:2(86))
- TUCCI, Carlos E. M.; SILVEIRA, André L. L. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4.ed. ed. Porto Alegre: [s. n.], 2015. *E-book*.
- YU, Pao-shan *et al.* Updating Real-Time Flood Forecasting Using a Fuzzy Rule-Based Model. **Hydrological Sciences Journal**, [S. l.], v. 6667, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1623/hysj.50.2.265.61796>
- ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Journal of Information and control**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.

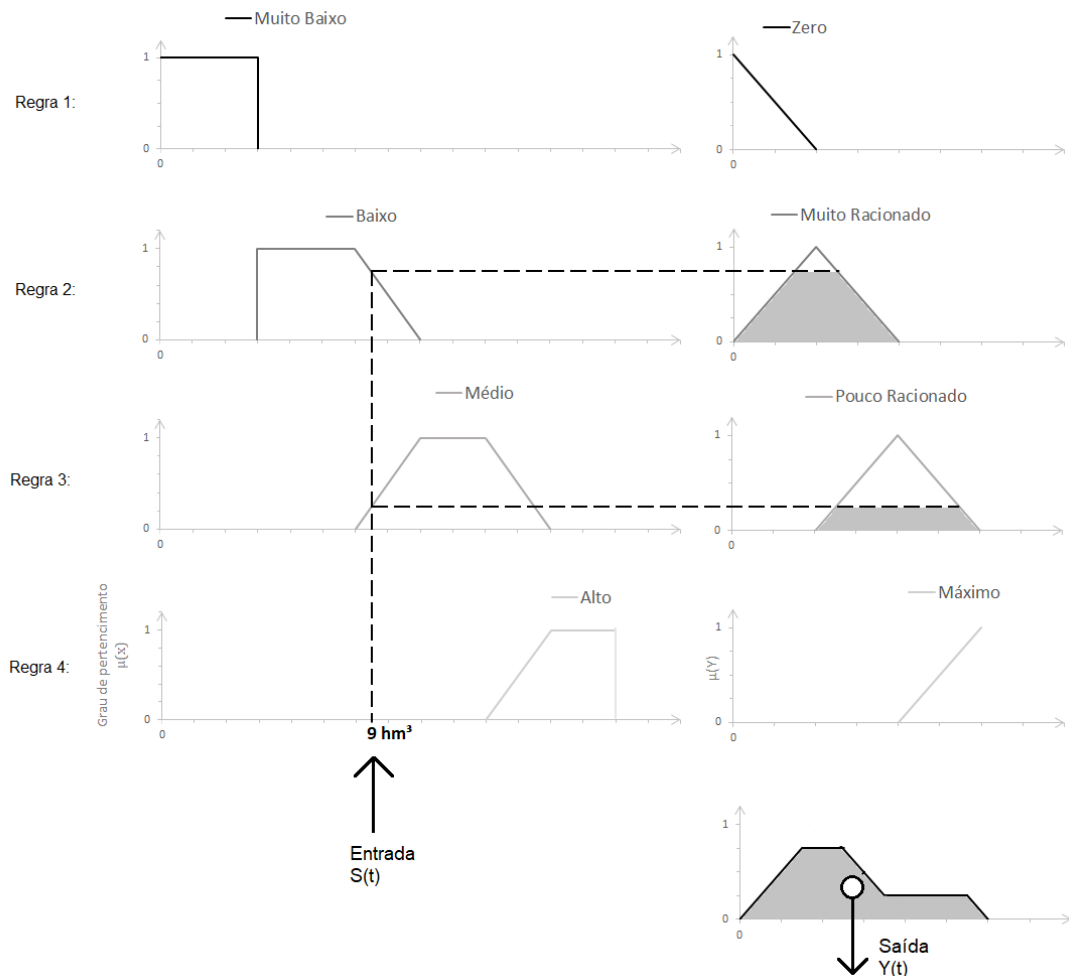
APÊNDICES

APÊNDICE A - Exemplo de aplicação da regra de racionamento *fuzzy*

No exemplo da Figura 11, um valor de armazenamento igual a 9 hm³ supostamente tem graus de pertinências de 0,0, 0,75, 0,25 e 0,0 para os conjuntos MUITO BAIXO, BAIXO, MÉDIO e ALTO, respectivamente. Podemos dizer, portanto, que um armazenamento de 9 hm³ é mais BAIXO do que MÉDIO, mas definitivamente não é ALTO. Quando o valor de armazenamento estiver na zona de transição, ou seja, pertencer parcialmente a dois conjuntos, a liberação de água deve ser proporcional ao fator de racionamento de cada conjunto e ponderado por seus respectivos graus de pertinência. Consta-se que, através da defuzzificação pela equação 6, o resultado para o exemplo apresentado seria:

$$Y_t = \frac{(0,0 * 0,0) + (0,75 * \alpha 1. D_t) + (0,25 * \alpha 2. D_t) + (0,0 * D_t)}{0,0 + 0,75 + 0,25 + 0,0}$$

FIGURA 17 - Exemplo gráfico do processo de inferência *fuzzy* baseada em regras.



Fonte: Autor (2019).