

## ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE ASSOCIADO À OPERAÇÃO DE AÇUDES NO SEMI-ÁRIDO – O AÇUDE FIGUEIREDO COMO ESTUDO DE CASO

**Thereza Christina Citó  
César Rêgo**

Departamento de Engenharia  
Hidráulica e Ambiental,  
UFC, Bloco 713, C.P. 6018,  
CEP 60.451-970, Fortaleza,  
Ce, Tel. (85) 3288.9623, fax  
(85) 3288.9627, e-mail  
therego@uol.com.br.

**Vicente P. P. B.Vieira**

Departamento de Engenharia  
Hidráulica e Ambiental,  
UFC, Bloco 713, C.P. 6018,  
CEP 60.451-970, Fortaleza,  
Ce, Tel. (85) 3288.9767, fax  
(85) 3288.9627, e-mail  
vpvieira@ufc.br.

### Resumo

O açude Figueiredo será executado na bacia hidrográfica do médio Jaguaribe, com o objetivo de atender às demandas hídricas da região, priorizando o abastecimento humano. Segundo seu projeto executivo contará com uma capacidade de acumulação de 519,6 hm<sup>3</sup>, regularizando com 90% de garantia uma vazão de 4,4 m<sup>3</sup>/s. O índice de sustentabilidade do açude Figueiredo busca avaliar sua capacidade em manter, ao longo de um período pré-determinado, as demandas as quais ele objetiva suprir, sendo determinado em função da confiabilidade, vulnerabilidade e resiliência. Utilizando-se o SIMRES, software para dimensionamento e operação de reservatórios, simulam-se séries de vazões regularizadas mensais, que possibilitam a determinação das falhas, dos déficits e dos períodos regulares de fornecimento.

*Palavras-chave: sustentabilidade, açude, operação, vazões, garantia.*

### Abstract

The Figueiredo dam will be executed in the medium Jaguaribe basin, seeking to assist the regional hídric demands, with priority to the human provisioning. According to the executive project the accumulation capacity is 519.6 hm<sup>3</sup>, and the regular flow with 90% of warranty equal to 4.4 m<sup>3</sup>/s. The dam sustainability index valuation intends to indicate its capacity in maintaining the demands which aims to supply along a period. The index is determined in function of the reliability, vulnerability and resilience. The SIMRES software of reservoirs management is used to simulate monthly flows indicating the flaws, the deficits and the times of regular supplies.

*Keywords: sustainability, dam, management, flows, warranty.*

## 1 Introdução

No estado do Ceará, os açudes constituem-se nas principais fontes capazes de ofertar água com garantia para a sobrevivência e desenvolvimento das diversas atividades da sociedade. Ao longo de sua história, o estado vem implementando uma diversificada rede de reservatórios de pequeno, médio e grande porte

O açude Figueiredo, com projeto e previsão de execução a cargo da SRH-CE, Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará e PROÁGUA Semi-Árido, localiza-se no médio Jaguaribe, mais precisamente no município de Alto Santo. Barrando o rio Figueiredo, destina-se ao atendimento das demandas dos municípios de Alto Santo, Ererê, Iracema, Pereiro e Potiretama, possibilitando também a irrigação do vale a jusante.

Com o objetivo de avaliar o índice de sustentabilidade da barragem Figueiredo em suprir as populações a serem beneficiadas com sua construção, determinam-se os índices de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade através do comportamento de seus volumes regularizáveis com horizonte de simulação de 5.000 anos.

As características técnicas e operacionais do reservatório, segundo o Relatório Geral do Projeto Executivo e os Estudos Hidrológicos da Barragem Figueiredo, são discriminadas abaixo:

- Tipo de barragem – enrocamento com núcleo argiloso;
- Tomada d'água – em galeria sob o corpo da barragem;
- Vertedouro – em canal com soleira frontal em concreto;
- Área da bacia hidráulica (cota 99) – 4.985,7 ha;
- Área da bacia hidrográfica – 1.621 km<sup>2</sup>;
- Volume acumulado (cota 99) – 519,6 hm<sup>3</sup>;
- Volume morto do reservatório - 2,2 hm<sup>3</sup>;
- Volume de alerta - 98,7 hm<sup>3</sup>;
- Vazão regularizada com 90% de garantia anual – 4,4 m<sup>3</sup>/s.

A metodologia utilizada no projeto, para a simulação do reservatório baseia-se na equação do balanço volumétrico e na utilização do mecanismo de volume de alerta, garantindo em 100% do tempo, o suprimento mínimo de 50% da vazão regularizada.

As demandas existentes na região equivalem a:

- Abastecimento humano – 0,105 m<sup>3</sup>/s (3,31 hm<sup>3</sup>/ano)
- Indústria – 0,02 m<sup>3</sup>/s (0,63 hm<sup>3</sup>/ano)
- Irrigação (Chapada do Atanásio) – 1,48 m<sup>3</sup>/s (46,67 hm<sup>3</sup>/ano)
- Irrigação Alto e Médio Jaguaribe – 4,1 m<sup>3</sup>/s (129,3 hm<sup>3</sup>/ano)
- Irrigação Baixo Jaguaribe – 3,8 m<sup>3</sup>/s (119,84 hm<sup>3</sup>/ano)
- Demanda total – 9,51 m<sup>3</sup>/s (299,91 hm<sup>3</sup>/ano)

## 2 Metodologia

### 2.1 Sustentabilidade

A determinação do índice de sustentabilidade de um dado empreendimento tem como objetivo avaliar, dentre as alternativas propostas de finalidade de sua implementação, qual a mais sustentável, auxiliando assim, a tomada de decisão. Durante alguns períodos, eventos indesejáveis podem ocorrer e acarretar o não cumprimento das funções para as quais o sistema se propôs, configurando assim uma situação de falha.

A sustentabilidade, segundo a ASCE - American Society of Civil Engineers (1998), relaciona-se com os indicadores de desempenho eficiência, confiabilidade e vulnerabilidade, conforme a equação abaixo, sendo as variáveis analisadas em termos de séries temporais:

$$S = C.R.(1 - VRT) \quad (1)$$

em que:

C – Confiabilidade;

R – Resiliência;

VRT – Vulnerabilidade relativa total.

A confiabilidade equivale à fração de períodos satisfatórios. A vulnerabilidade indica a fração de déficit máximo no atendimento ao objetivo proposto, e a resiliência, a capacidade de recuperação do sistema. As equações abaixo, adimensionais, permitem o cálculo desses índices, onde se calcula a vulnerabilidade em função do volume correspondente a duas vezes a capacidade do reservatório:

$$C = \frac{\text{número períodos satisfatórios}}{\text{total de períodos}} \quad (2)$$

$$R = \frac{\text{número de vezes período satisfatório segue período insatisfatório}}{\text{número períodos insatisfatórios}} \quad (3)$$

$$VTR = \frac{\text{déficit máximo no fornecimento}}{2 \times (\text{capacidade do reservatório})} \quad (4)$$

Para a barragem Figueiredo, que possui seu projeto já concluído, será avaliada a sustentabilidade no fornecimento das vazões demandadas, sendo portanto necessário a geração de séries alternativas de vazões hidrológicas regularizadas (correspondendo às hipóteses de demanda).

## 2.2 Vazões regularizadas

As vazões regularizadas do reservatório são determinadas para as garantias de 80% e 90% anuais e para um valor pré-fixado de retirada, por um período de 5.000 anos, utilizando-se o SIMRES (Campos et al., 1999). Esse software baseia-se no método de Monte Carlo, que admite que os deflúvios naturais obedecem a uma determinada lei de probabilidade e no método do Diagrama Triangular de Regularização (Campos, 1996), que permite o cálculo do balanço hídrico do reservatório. As vazões sintéticas são simuladas, levando-se em conta as condições naturais e os critérios de operação do reservatório.

Dos Estudos Hidrológicos da Barragem Figueiredo (SRH, 2001), obtém-se a curva cota – área – volume, a evaporação líquida e a série de 89 anos de vazões afluentes determinada pelo MODHAC (Lanna, 1987), calibrada com parâmetros do posto de Suassurana (SRH, 2001) e precipitação mensal obtida a partir da composição dos postos Ema e Pereiro. A evaporação líquida da barragem é determinada usando-se a referida precipitação mensal e a evaporação média mensal em tanque classe "A", medida no posto de Morada Nova. Os dados de evaporação líquida e precipitações médias mensais são apresentados na Tab. (1).

As vazões anuais são então geradas, segundo a distribuição de probabilidade Gama II, a partir da média e do coeficiente de variação da série de vazões afluentes, que correspondem a 231,77 hm<sup>3</sup>/ano e 0,89, respectivamente. A série de vazões afluentes mensais, serve de padrão para que o software desfragmente a série anual gerada, em série mensal, concluindo a simulação. Os resultados fornecidos pelo SIMRES apresentam-se em anexo.

Tabela 1. Evaporação líquida e precipitação no reservatório da barragem Figueiredo

Mês	Precipitação média (mm)	Evaporação líquida (mm)
1	69	88
2	133	-9
3	239	-153
4	204	-130
5	115	-29
6	49	56
7	24	112
8	7	176
9	5	209
10	4	193
11	6	184
12	23	161
<b>Total</b>	<b>878</b>	<b>858</b>

Fonte: SRH, 2001

### 3 Resultados

A operação do reservatório para uma retirada pré-fixada de 14,2 hm<sup>3</sup>/mês (170.45 hm<sup>3</sup>/ano), somatório das demandas de abastecimento humano, irrigação da chapada do Atanásio e do baixo Jaguaribe, resulta em uma regularização de vazões anuais com garantia de 67%. É importante observar que a demanda é considerada constante ao longo do período avaliado. Os resultados podem ser observados na Tab. (2), que apresenta ainda, os resultados da simulação de operação do reservatório para as garantias de 80% e 90%. É determinado o número de períodos identificados como falhos, sejam esses equivalentes a um único mês ou a vários meses. Esse valor, por consequência, possibilita a determinação da resiliência do sistema em atender a vazão esperada.

Os valores apresentados possibilitam a determinação da vulnerabilidade, resiliência e confiabilidade e posteriormente do índice de sustentabilidade, conforme se apresentam na Tab. (3).

Tabela 2. Resultado da simulação da operação da barragem Figueredo para as garantias de 67%, 80% e 90%

PARÂMETROS OBSERVADOS	GARANTIA ANUAL		
	67%	80%	90%
Vazão regularizada (hm <sup>3</sup> /mês)	14,2	12,2	10,3
Número meses falhos	7.742	4.409	2.017
Volume fornecido nos meses falhos (hm <sup>3</sup> )	15.090	7.727	2.844
Déficit nos meses falhos (hm <sup>3</sup> )	94.846	46.062	17.930
Períodos não falhos seguintes a períodos falhos	1.231	716	342
Período máximo de falhas (mês)	43	41	34
Déficit máximo (hm <sup>3</sup> )	595,5	478,4	328,8
Déficit médio (hm <sup>3</sup> /falha)	12,25	10,45	8,89

Tabela 3. Indicadores de desempenho e índice de sustentabilidade da barragem Figueredo.

ÍNDICES	GARANTIA ANUAL		
	67%	80%	90%
Resiliência	0,159	0,162	0,170
Confiabilidade	0,871	0,927	0,966
Vulnerabilidade relativa	0,57	0,46	0,32
Sustentabilidade	0,06	0,08	0,11

#### 4 Conclusão

Analisando-se os resultados obtidos, verifica-se que a persistência de longos períodos falhos influi diretamente no cálculo da resiliência, a qual juntamente com elevadas vulnerabilidades, resultam em um índice de sustentabilidade bem pequeno, mas que reflete a deficiência hídrica dos reservatórios, no atendimento às demandas em épocas de seca .

Paixão (2003) avaliou os índices de desempenho, confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade dos reservatórios Pentecostes (395,6 hm<sup>3</sup>), General Sampaio (322,2 hm<sup>3</sup>) e Caxitoré (202 hm<sup>3</sup>), na bacia do rio Curu, no estado do Ceará, para diversos cenários e níveis de garantia de 20% a 70%. Os resultados obtidos no cenário, no qual todos os reservatórios estão em operação, regularizando uma vazão com 70% de garantia, foram os seguintes: confiabilidade – 0,972, resiliência – 0,21 e vulnerabilidade média – 25.32 hm<sup>3</sup>. Valores esses similares aos determinados para a barragem Figueiredo com regularização de 67% de garantia, que também resultam num baixo índice de sustentabilidade.

O coeficiente de variação dos deflúvios anuais (CV) é um fator determinante na distribuição e persistência das falhas. Os açudes General Sampaio, Pentecostes, Caxitoré e Figueiredo possuem coeficientes de variação iguais a 1,6, 1,2, 1,2 e 0,9, respectivamente. Analisando-se a regularização (garantia de 70%) apenas do açude General Sampaio, que apresenta o maior coeficiente de variação, encontra-se uma resiliência de 0,14, inferior a determinada para o açude Figueiredo, igual a 0,16, de coeficiente de variação, 0,9.

É interessante avaliar o índice de sustentabilidade na elaboração de projetos de infra-estrutura hídrica, para que se possa, dentro das alternativas existentes, contar com mais um parâmetro balizador para a tomada de decisão.

#### 5 Referências

- ASCE and Working Group UNESCO/IHP.IV Project M-4.3. “Sustainability Criteria for Water Resource Systems”, Task Committee on Sustainability Criteria, Water Resources Planning and Management Divisions, ASCE - American Society of Civil Engineers. Reston, Virginia, 1998.
- CAMPOS, N., “Dimensionamento de Reservatórios – O Método do Diagrama Triangular de Regularização”. Edições UFC, Fortaleza”, 1996.
- CAMPOS, N., STUDART, T. “SIMRES – Simulação de Reservatórios”. UFC, Fortaleza, 1999
- LANNA, A.E.L., “MODACH”, IPH, Porto Alegre, 1987.
- MATLAB, The MathWorks Inc, Natick, MA, 2001-2002.
- SRH/Ce - Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, “Relatório Final da Avaliação Econômica e Financeira da Barragem Figueiredo”, Fortaleza, 2001.
- SRH/Ce - - Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, “Estudos Hidrológicos da barragem Figueiredo”, Fortaleza, 2001.

**ANEXO A : SIMRES – Resultado da Simulação – Garantia 67%**

Deflúvio médio (hm <sup>3</sup> )		231,773			
Coef. de variação dos deflúvios (hm <sup>3</sup> /ano)		0,895			
Capacidade do reservatório (hm <sup>3</sup> )		519,600			
Ret. abastecimento anual hm <sup>3</sup>		170,45			
1 Falha	2 Falhas	3 Falhas	Total	Máximo	Anos Falhos
156	132	943	7.742	43	1.632
Volume de alerta (hm <sup>3</sup> )		98,700			
Retirada no buffer (hm <sup>3</sup> /ano)		0,000			
Média das sangrias (hm <sup>3</sup> /ano)		47,605			
Média das evaporações (hm <sup>3</sup> /ano)		32,684			
Anos abaixo do mínimo	1.632	Frequência (%)	32,64		
Anos abaixo do vol. alerta	0	Frequência (%)	0,00		
Meses abaixo do mínimo	7.751	Frequência (%)	12,92		

**ANEXO B : SIMRES – Resultado Da Simulação – Garantia 80%**

Deflúvio médio (hm <sup>3</sup> )		231,773			
Coef. de variação dos deflúvios (hm <sup>3</sup> /ano)		0,895			
Capacidade do reservatório (hm <sup>3</sup> )		519,600			
Ret. abastecimento anual hm <sup>3</sup>		146,234			
1 Falha	2 Falhas	3 Falhas	Total	Máximo	Anos Falhos
98	76	546	4.409	41	1.000
Volume de alerta (hm <sup>3</sup> )		98,700			
Retirada no buffer (hm <sup>3</sup> /ano)		0,000			
Média das sangrias (hm <sup>3</sup> /ano)		59,435			
Média das evaporações (hm <sup>3</sup> /ano)		35,342			
Anos abaixo do mínimo	1.000	Frequência (%)	20,00		
Anos abaixo do vol. alerta	0	Frequência (%)	0,00		
Meses abaixo do mínimo	4.414	Frequência (%)	7,36		

**ANEXO C : SIMRES – Resultado Da Simulação – Garantia 90%**

Capacidade do reservatório (hm <sup>3</sup> )		519,600			
Ret. abastecimento anual hm <sup>3</sup>		123,636			
1 Falha	2 Falhas	3 Falhas	Total	Máximo	Anos Falhos
40	42	263	2.017	34	500
Volume de alerta (hm <sup>3</sup> )		98,700			
Retirada no buffer (hm <sup>3</sup> /ano)		0,000			
Média das sangrias (hm <sup>3</sup> /ano)		73,672			
Média das evaporações (hm <sup>3</sup> /ano)		38,075			
Anos abaixo do mínimo	500	Frequência (%)		10,00	
Anos abaixo do vol. alerta	0	Frequência (%)		0,00	
Meses abaixo do mínimo	2.021	Frequência (%)		3,37	

**SOBRE OS AUTORES**

**Thereza Christina Citó César Rêgo**

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Ceará em 1988, M.Sc. Eng. Civil, área de concentração em Recursos Hídricos pelo Departamento de Hidráulica e Saneamento Ambiental da UFC em 2001, Doutoranda em Recursos Hídricos no Departamento de Hidráulica e Saneamento Ambiental da UFC. Bolsista FUNCAP – Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

**Vicente P. P. B.Vieira**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará em 1961, M.Sc. em Hidrologia Aplicada pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS em 1970, PhD. pela Colorado State University – CSU, em 1978. Atualmente ocupa o posto de professor titular junto ao Departamento de Hidráulica e Saneamento Ambiental da UFC, onde atua em nível de pós graduação.