

Simulação de um Reservatório com Previsão de Vários Cenários de Demandas Hídricas em uma Bacia com Poucos Dados Hidrológicos

Ivanilto Andreolli

Universidade Santa Cecília - UNISANTA
Departamento de Pós Graduação, Santos -SP, Brasil
E-mail: ivanilto_andreolli@yahoo.com.br
Received january, 2013

Resumo

A variabilidade temporal das vazões nos rios tem como resultado visível a ocorrência de excessos hídricos nos períodos úmidos e a carência nos períodos secos. As causas dessa ocorrência se dão por variáveis estocásticas de difícil previsão e a observação das séries históricas de variáveis hidrológicas observadas tais como a vazão, a precipitação e a evaporação são necessárias para avaliar as demandas e a disponibilidade hídrica temporalmente que podem ser gerenciadas com o armazenamento através de reservatórios. Os reservatórios são alternativas para armazenar os excessos hídricos para disponibilizá-los nos períodos secos o que representa uma melhor distribuição hídrica temporalmente, filtrando a estocasticidade dos fenômenos climáticos. Em algumas bacias o reservatório já está em uso e atende à demanda hídrica, mas se necessita avaliar sua capacidade para atender a outras demandas que podem surgir com o desenvolvimento da região. Com esse motivo o estudo apresenta algumas análises de demandas hídricas realizadas em um reservatório construído na década de 50 em uma pequena bacia hidrográfica de aproximadamente 301km², situado na bacia do Rio Candiota, em Candiota no Rio Grande do Sul, Brasil. O reservatório foi construído para atender uma termoelétrica, mas recentemente novos projetos estão sendo estudados e que, se implementados, implicarão em uma forte demanda hídrica desse reservatório. Esse estudo apresenta: alguns cenários avaliados de demanda hídrica, a obtenção de séries sintéticas de vazões mensais, o ajuste de funções hidrológicas na bacia que possui poucos dados e a avaliação do risco de falha no atendimento das demandas hídricas. O estudo mostra que a disponibilidade hídrica do reservatório existente é insuficiente para atender alguns cenários avaliados, com probabilidade significativa de falha no atendimento. Além disso, verificou-se que o volume que o reservatório se propõe a regularizar, segundo os estudos da época de construção, se mostrou condizente com as análises numéricas realizadas nesse trabalho.

Palavras chave: simulação hidrológica, reservatórios, demandas hídricas, modelos hidrológicos.

Simulation of a Reservoir with Forecast of Some Scenes of Water Demands in a Basin with Few Hydrologic Data

Abstract

The variability of the outflows in the rivers as has resulted visible the occurrence of water excesses in the humid periods and the lack in the dry periods. The causes of this occurrence if give for varieties of difficult forecast and the comment of the historical series such as the outflow, the precipitation and the evaporation are necessary to secularly evaluate the demands and the availability of water that they can be stored by

the reservoirs. The reservoirs are alternative to store the water excesses to make use of these volumes in the dry periods and to distribute the water secularly, filtering the stochasticity of the climatic phenomena. This study it presents some analyses, of carried through hydric demands in a reservoir constructed in 1950 in a small hydrographical basin, of 301km² approximately situated in the basin of the River Candiota, in Candiota in the Rio Grande do Sul, Brasil. The reservoir was constructed to take care of a thermoelectrial one, but recently new projects are being studied and that, if implemented, they will imply in one strong hydric demand of this reservoir. This paper describes: some evaluated scenes of water demand, the attainment of synthetic series of monthly outflows, the adjustment of hydrological functions in the basin that possess few data and the evaluation of the risk of imperfection in the attendance of the water demands. The study sample that the hydric availability of the existing reservoir is insufficient to take care of some evaluated scenes, with significant probability fails in the attendance. Moreover, it was verified that the amount that the reservoir if considers to regularize, according to studies of the time of construction, if showed consistent with the carried through numerical analyses.

Keywords: hydrological simulation, reservoirs, water demands, hydrological models.

1. Introdução

Para diminuir a variabilidade temporal da oferta de água em um determinado exutório existe a necessidade de armazenar parte das vazões afluentes de forma a atender as demandas hídricas nesse local que são distribuídas temporalmente. O dimensionamento e a verificação dos volumes necessários do reservatório podem ser determinados através de simulações. Como a ocorrência das vazões é aleatória, o equacionamento do problema é feito através de simulações entre balanços de água distribuídos no tempo que entram e saem do reservatório através da utilização de modelos numéricos. Para as simulações são necessárias informações de séries históricas das principais variáveis hidrológicas intervenientes no processo. A qualidade e o tamanho das séries de dados são fundamentais para redução das incertezas nos resultados (Tucci, 1998, Benjamin & Cornell, 1970, Chow, 1994). Um problema típico de simulação numérica de reservatórios ocorre, quando, as demandas previstas na fase de projeto do reservatório, são modificadas. Nessas circunstâncias, através de simulação entre ofertas e as novas demandas, pode-se avaliar a distribuição temporal dos volumes ao longo de séries históricas e com essas informações avaliar o risco de não atendimento das novas demandas frente às condições de contorno impostas pelo reservatório. As simulações numéricas de reservatórios são realizadas através do uso da equação da continuidade na forma concentrada, que representa o balanço hídrico do reservatório integrada em cada intervalo de tempo (Lanna, 2001; Tucci, 1998; Chow, 1994; Maidment, 1993, Campos et al, 2003).

Para a utilização do método são necessárias informações hidrológicas tais como a série de vazões afluentes, fundamental e muitas vezes não disponível, ou então

curta, o que implica na necessidade de geração sintética da série afluente. Entre os métodos possíveis para obtenção da série de vazões estão: proporção entre áreas e modelos hidrológicos chuva-vazão (Tucci, 1998; Sokolov, 1974).

O método de proporção entre áreas considera que existindo postos vizinhos em bacias semelhantes à bacia de interesse quanto a condições físicas e climáticas é possível estimar a vazão afluente da bacia de interesse proporcionalmente a área entre as bacias e os autores não recomendam sua aplicação quando a diferença entre as áreas é significativa. O segundo método aplica-se quando existem séries curtas de vazões e séries longas de precipitação e evaporação no local. Nesse caso, é possível ajustar um modelo hidrológico chuva-vazão e utilizá-lo para estender a série de vazões a partir da série de precipitações. A eficiência do método vai depender, principalmente, do tamanho da série de ajuste e da qualidade dos dados hidrológicos (Tucci, 1998, Andreolli, 2003, Collischonn et. al, 2004, Lettenmaier & Wood, 1993). No presente estudo, a série de vazão era bastante curta e foi estendida através de um modelo chuva-vazão, por ser esse método mais confiável do que a simples proporção entre áreas. A série estendida foi utilizada para as simulações do balanço hídrico do reservatório de Candiota.

O objetivo desse estudo é avaliar a disponibilidade hídrica mensal no reservatório de Candiota para, possivelmente, atender a demandas futuras que constituem alguns cenários de demandas hídricas. Devido aos poucos dados hidrológicos existentes, os cenários e as rotinas foram desenvolvidos considerando as informações hidrológicas (vazão, precipitação, evaporação, índices físicos, entre outros) da bacia de Candiota e de outras bacias da região com características semelhantes, além da utilização de informações de imagens de satélite e modelos numéricos de terreno.

2. Metodologia

Para avaliar o risco das demandas não serem atendidas foi necessário simular exaustivamente, os fluxos temporais de água de entrada e saída do reservatório, através de séries de dados hidrológicos de longo período e cenários reais de demandas futuras, haja vista que as variáveis envolvidas são aleatórias. Essas simulações foram realizadas aplicando-se a equação da continuidade na forma concentrada para determinar o balanço hídrico do reservatório (equação 1) em cada intervalo de tempo ao longo das séries históricas de dados de 1949 a 2001. A figura 1 apresenta o fluxo do balanço hídrico, e uma listagem de demandas hídricas.

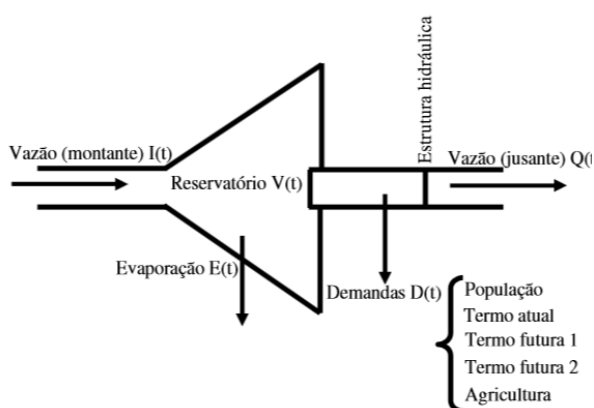


Figura 1: fluxo de demandas e ofertas hídricas no reservatório.

$$S(t+1) = S(t) + I(t) - D(t) - E(t) + P(t) - Q(t) \quad (1)$$

onde: $S(t)$ = armazenamento do reservatório no início do intervalo de tempo; $S(t+1)$ = armazenamento do reservatório no intervalo seguinte; $I(t)$ = vazão afluyente ao reservatório; $D(t)$ = demanda de vazão no intervalo de tempo t ; $E(t)$ = evaporação do reservatório no intervalo de tempo t ; $P(t)$ = chuva sobre a lâmina de água do reservatório durante o intervalo t ; $Q(t)$ = vazão efluente ao reservatório no intervalo de tempo t . Considerando que o reservatório tenha um volume dado por V_m , então o domínio físico da equação 1 é dado por: $0 \leq S(t+1) \leq V_m$. Se $S(t+1) < 0$, então houve falha de atendimento à demanda e adota-se um volume no tempo t igual a zero. Se $S(t+1) > V_m$, então $S(t+1) = V_m$, e a diferença $[S(t+1) - V_m]$, contribui para vazão de jusante.

O intervalo de tempo adotado para as simulações foi o intervalo mensal. A série de vazões existente de 1949 a 1957 por ser bastante curta, foi estendida com base nas séries históricas de precipitação e evaporação, disponíveis na bacia em períodos longos. Utilizou-se para a extensão um modelo hidrológico chuva-vazão

com intervalo de tempo mensal, IPHMEN (Tucci, 1994). Considerou-se o período de 1949 a 2001 (período com dados) e com base nas séries históricas das variáveis hidrológicas, da série sintética de vazões e de dados do reservatório aplicou-se a equação 1 em cada mês desse período. Com essa metodologia foi possível simular o balanço hídrico em cada intervalo de tempo e estimar os riscos do não atendimento das demandas hídricas. Além dos estudos de simulação, desenvolveu-se um estudo de previsão aplicável para épocas de estiagem através de uma modelagem de previsão de volumes que desconsidera a precipitação na bacia.

O estudo é interessante para o operador do sistema prever os volumes, em períodos de secas, nos próximos dias e melhor gerenciar os recursos hídricos em função das demandas no caso de escassez do recurso. O modelo se constitui de mais uma fonte de informação para auxiliar na tomada de decisão no dia a dia do operador do sistema.

2.1. A bacia Candiota até o posto Dario Lassance

A região que engloba a bacia do arroio Candiota, possui grandes jazidas de carvão mineral. Somente a jazida de Candiota possui 38% de todo o carvão mineral do Brasil sendo que o estado do RS possui 89,25% do total do carvão mineral do Brasil. Essa riqueza mineral caracteriza a região como sendo de forte potencial de geração de energia termoeleétrica.

A geração termoeleétrica, por sua vez, utiliza volumes significativos de água para as torres de resfriamento e, dessa forma, a bacia do arroio Candiota se destaca no cenário de possível ocorrência de conflitos hídricos no futuro. Com relação aos aspectos hidrológicos, a bacia do arroio Candiota é uma das áreas constituintes da bacia da Lagoa Mirim que se localiza na zona sul do estado do Rio Grande do Sul, entre os meridianos de $30^{\circ}15'W$, $34^{\circ}15'W$ de latitude e $52^{\circ}15'W$, $54^{\circ}15'W$ de longitude, na parte do lado brasileiro.

A bacia, até a seção do reservatório de Candiota, tem uma área de drenagem de 301 km^2 , tendo como córrego principal o arroio Candiota. O arroio Candiota é tributário do rio Jaguarão que desemboca na Lagoa Mirim. A figura 2 apresenta o contorno da bacia até a seção do reservatório de Candiota e a rede de drenagem obtida pelo MNT na resolução de 270 metros.

A bacia está localizada na região de campos do estado do Rio Grande do Sul. Essa região apresenta relevo pouco pronunciado com um desnível de 222m entre a cabeceira do Rio Candiota até o reservatório de Candiota. A litologia encontrada na bacia pode ser classificada em quatro grupos (Párraga, 1997), mas o grupo predominante é de arenitos de rochas sedimentares, correspondendo a 95,3% da bacia.

Quanto ao clima, a região, na classificação de Köppen, se enquadra na zona temperada moderada chuvosa por ter o mês mais frio uma temperatura compreendida entre 3°C a 18°C. Os regimes térmicos da região Sul do Brasil não é uniforme. Isso se deve a posição do sul do Brasil, compreendida nas latitudes médias, sendo atingido por várias massas de ar.

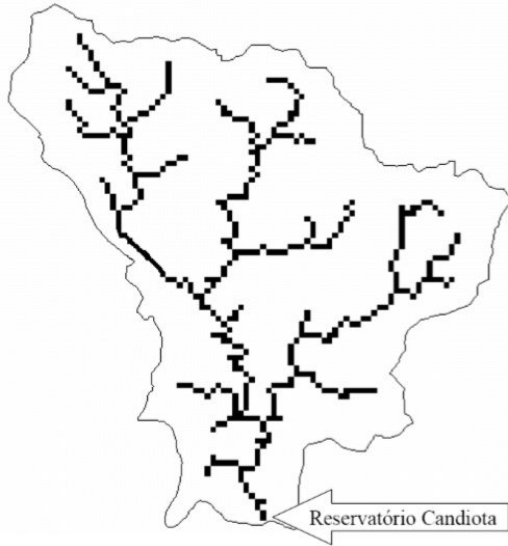


Figura 2: bacia do rio Candiota até o reservatório de Candiota (área de 301km²) e desnível médio do córrego principal de 222m.

A umidade relativa é maior no inverno, com valores mínimos em dezembro, em pleno verão, quando descem abaixo de 70%. Quanto ao regime pluviométrico, a área caracteriza-se por uma distribuição quase uniforme durante o ano, sem uma estação seca bem definida. A precipitação média anual é de aproximadamente 1215 mm, caracterizando a região de menor índice pluviométrico do estado. A cobertura vegetal da região é constituída principalmente de pastagens naturais com poucas matas, vegetação típica da região do estado.

2.2. Dados hidrológicos e do reservatório

A bacia em estudo faz parte da bacia da Lagoa Mirim, região do estado do RS bastante pobre em dados hidrológicos. Particularmente a bacia do rio Candiota até o reservatório de Candiota possui apenas um posto de vazão com série histórica de 1949 a 1957 (9 anos de dados) denominado Dario Lassance e numerado pela Agência Nacional de Águas como (88179000). Dados de precipitação são menos escassos na bacia existindo alguns postos na região interna ou próxima, com série histórica de longo período. A tabela 1 apresenta os postos de chuva utilizados no estudo.

A série de vazões existente na seção da usina de Candiota é bastante curta e não é suficiente para as simulações de cenários de demandas ao reservatório ao longo do tempo. Dentre os dados necessários ao estudo os mais importantes são os dados de vazões, porque representam os processos hidrológicos que ocorrem na bacia na forma integrada. Com base na série histórica de vazões curta um modelo hidrológico com intervalo mensal, IPHMEN foi ajustado para obtenção da série de vazões sintéticas até 2001.

Sub-bacia	Posto de chuva	Coordenadas geográfica		Período de dados	Município
		Latitude	Longitude		
Candiota	Candiota	31°33'S	53°40'W	01/49-12/94	Candiota
	Paraíso	31°13'S	53°51'W	04/58-12/94	Bagé
	Torrinhas	31°18'S	53°29'W	09/76-12/02	Pinh. Machado
	Piratini	31°26'S	53°06'W	09/35-12/70	Piratini
	Colina nova	31°42'S	54°04'W	09/66-05/81	Bagé

Tabela1: postos de chuva utilizados no estudo bacia

Estudos feitos por Tucci (1991) sobre regionalização de vazões no estado do Rio Grande do Sul e também estudo feitos por Párraga (1997) sobre a bacia da Lagoa Mirim foram fontes fundamentais para definição das simulações. Tais trabalhos sintetizam informações hidrológicas da região, de diversas entidades ligadas aos recursos hídricos no Brasil.

Essas informações são bastante preciosas por três motivos: i) constituem informações já consistidas; ii) informações muitas vezes difíceis de serem obtidas e inclusive algumas vezes já extintas nos órgãos oficiais; iii) são trabalhos focados na região em estudo. Existe também na bacia um posto de evaporação medida por evaporímetro de Piche. Os dados de evaporação são pouco confiáveis haja vista que os evaporímetros de Piche tendem a errar as medidas reais de evaporação não apresentando uma tendência de erro que se possa corrigir, mas na ausência de dados melhores essas informações foram utilizadas nas simulações. A série de evaporação é do posto Candiota e data de 1951 até 1995. De 1995 a 2001 a evaporação mensal foi obtida com base em dados climáticos e adotando-se o método aerodinâmico (Chow, 1994). Nos dois anos faltantes, 1949 e 1951 a evaporação foi estimada pela média da série histórica, e por isso, esses anos não foram utilizados para calibração do modelo IPHMEN. Os dados climáticos foram obtidos da estação “Vila Operária”, situada nas proximidades da Usina de Candiota. Os dados climáticos apresentaram algumas falhas sendo que, nesses pontos, a evaporação

foi estimada pela média da série histórica. Dados do reservatório também foram necessários para estimar os volumes e a evaporação em função do tempo. Esses dados foram obtidos a partir da documentação do projeto do reservatório (CEEE, 1971). Durante a simulação no instante t qualquer, é necessário a estimativa da evaporação (demanda) no instante $t-1$ e t . Esta demanda é função da área superficial da lâmina do lago no instante $t-1$ e t ou função do volume. Como o volume e a área da lâmina é função unicamente da cota, é possível obter uma relação biunívoca entre área da lâmina e volume do reservatório, conforme figura 3.

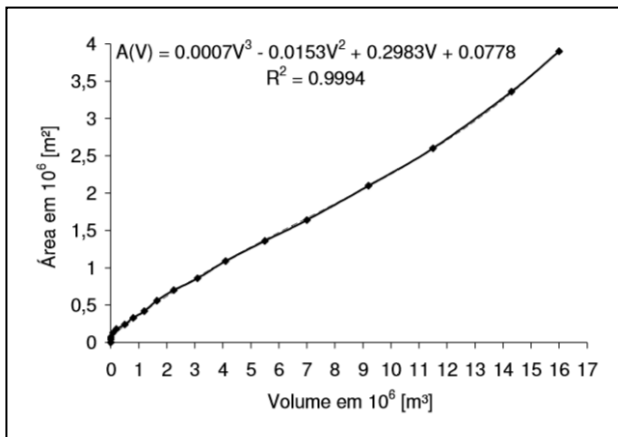


Figura 3: relação área superficial versus volume do reservatório, utilizada para simulações de evaporação do reservatório.

Relações entre cota-área superficial e cota-volume são normalmente determinados nas fases de projetos dos reservatórios através da cubagem da topografia e essas informações estavam disponíveis para o estudo. A figura 3 apresenta a relação (área-volume) determinada a partir da curva cota-área e cota-volume. Essa relação é utilizada pelo modelo para estimar a evaporação pela equação 2.

$$Ev = A(V) \cdot E(t) \cdot k \quad (2)$$

sendo, $A(V)$ a área da lâmina como função do volume; $E(t)$ a evaporação medida como função do tempo e k um fator de conversão de unidades para obter Ev em volume.

2.3. Ajuste, verificação e obtenção da série sintética

A única série histórica de vazões disponíveis para a bacia se refere ao posto Dario Lassance e por ser uma série relativamente curta (9 anos). Optou-se por estender a série através de um modelo chuva-vazão visto que sé-

ries históricas longas de chuva estavam disponíveis, conforme tabela 1.

O modelo chuva-vazão escolhido foi o IPHMEN (Tucci, 1994), que é um modelo de transformação da chuva em vazão desenvolvido para simulação em intervalos de tempo mensal. Utilizou-se para calibração do modelo os dados de 1952 a 1955 (4 anos) e para verificação o período de 1956 a 1957 (2 anos). Não foi utilizado o período de 1949 a 1951 devido às incertezas da série de evaporação desse período, estimada pela média do período de 1952 a 1995. A figura 4 apresenta a vazão observada e simulada pelo modelo nos período de dados observados. A tabela 2 apresenta as estatísticas do ajuste. Nota-se um bom ajuste do modelo. Já no período de verificação existe certa deterioração o que é esperado.

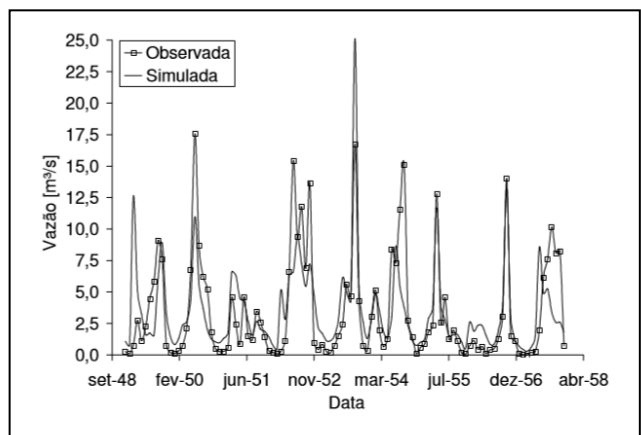


Figura 4: vazões de ajuste 1952-1955 e de verificação 1956-1957 versus vazões observadas.

A figura 5 apresenta o hidrograma sintético gerado pelo modelo IPHMEN de 1958 a 2001 incluindo na mesma figura o hidrograma observado de 1949 a 1957.

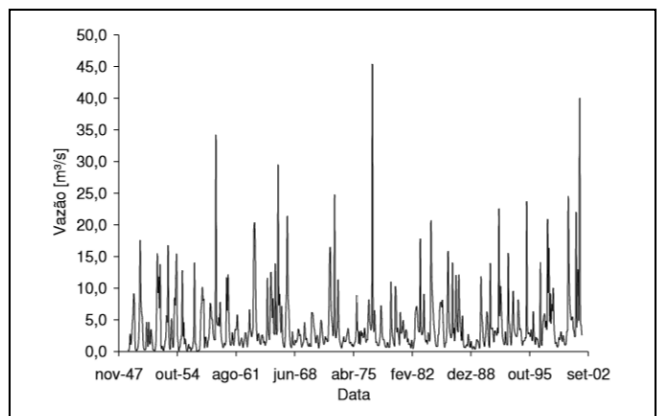


Figura 5: hidrograma observado (1948-1958) e hidrograma sintético de vazões (1959-2001).

A tabela 2 resume o ajuste do modelo IPHMEN. Observa-se que a vazão calculada, bem como o desvio padrão é maior para o período de extensão da série quando comparado ao período de dados. Isso se deve ao fato de que no período de obtenção da série sintética de vazões, choveu mais na bacia.

	\bar{Q}_o	\bar{Q}_c	R^2	σ_s
Ajuste 1952-1955	4,05	3,79	0,87	3,45
Verificação 1956-1957	2,86	2,50	0,79	3,24
Calculado 1958-2001		3,99		4,81

Tabela 2: estatísticas do ajuste, verificação e extensão da série de vazões.

Essa constatação pode ser feita analisando-se a figura 6 que apresenta a precipitação média mensal considerando os anos de 1949 a 1957 (existência de dados de vazão) e 1958 a 2001 (geração da série sintética). Também são apresentadas as respectivas linhas de tendência lineares onde pode-se observar que de 1958 a 2001 teve um tendência maior de chuva.

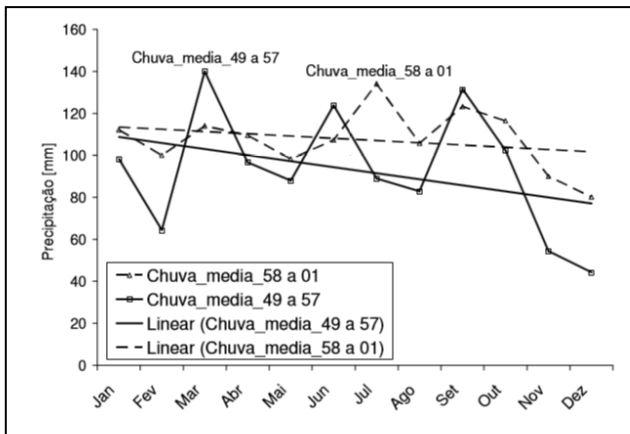


Figura 6: precipitação média na bacia de Candiota: 1949-1957, 1958-2001 e as respectivas linhas de tendências lineares.

3. Análises de Cenários

Para avaliar o risco das demandas atuais e futuras não serem atendidas pela disponibilidade hídrica regularizada pelo reservatório de Candiota, utilizou-se a equação 1 para simular continuamente as demandas e ofertas hídricas do sistema. As simulações foram feitas ao longo da série histórica de 1949 a 2001 (período com dados). O balanço entre demandas e ofertas de água ao longo do tempo fornece uma série de volumes excedentes, variando no intervalo $0m^3 \leq V \leq 15.000.000m^3$, sendo $15.000.000m^3$ o volume útil do reservatório. Conside-

rou-se falha no atendimento quando o volume do reservatório atingiu um valor inferior a 10% da capacidade útil do reservatório, o que corresponde ao volume de $1.500.000m^3$. Essa precaução se deve às incertezas na adoção do valor do volume útil do reservatório uma vez que sua construção foi feita na década de 1970 e nesse longo período de utilização pode ter havido acúmulo de sedimentos em seu interior reduzindo inclusive o volume útil. Para as simulações foram considerados 3 cenários de demandas, todos os cenários consideram sempre uma área mínima irrigável de 2% da área da bacia hidrográfica: cenário atual, cenário futuro 1 e cenário futuro 2. O cenário atual considera as demandas atuais na bacia que inclui uma termoeletrica que está em operação. O cenário futuro 1 considera as demandas atuais somadas da demanda de uma segunda termoeletrica. O cenário futuro 2 considera o cenário anterior e mais a demanda de uma terceira termoeletrica. Essas termoeletricas futuras estão em estudo e poderão ser implantadas na região. Além desses cenários, foi avaliada a demanda fixa de $1m^3/s$ no reservatório, demanda essa que, segundo a documentação do projeto, o reservatório regulariza. Esse cenário serve como uma verificação da metodologia adotada e da própria consistência dos dados hidrológicos. Com essas considerações, foram gerados 4 grupos de simulações: i) cenário atual, ii) cenário reservatório, iii) cenário futuro 1 e iv) cenário futuro 2. Os cenários possuem demandas assim definidas, além da evaporação: Cenário atual: i) demanda para atender a população local (A); ii) demanda para atender a Usina termoeletrica em operação (termo atual) (B); iii) demanda para manter a vazão mínima de jusante (C); iv) demanda de irrigação (D). Cenário reservatório: Considera uma demanda de $1m^3/s$ constante no tempo. Cenário futuro 1: Considera as demandas atuais e ainda uma segunda termoeletrica (termo futura 1). Cenário futuro 2: Considera as demandas do cenário futuro 1 e ainda uma terceira termoeletrica (termo futura 2).

Com base nesses cenários e das informações disponibilizadas pelos diversos órgãos ligados aos recursos hídricos e do projeto da usina e reservatório foi possível estimar as diversas demandas hídricas. Apesar de não haver informações que comprove a utilização de água da bacia hidrográfica em estudo, para usos “clandestinos” tais como a irrigação, considerou-se esta possibilidade de captação de água. A demanda relacionada à irrigação e de outras captações difusas são as de maiores incertezas. Essa demanda foi considerada a partir de frações de área irrigável e foi assim quantificada: para o cenário atual, diversas frações de área irrigável variando-se de 0% a 6% da área da bacia para avaliar a sensibilidade do sistema em relação à demanda de irrigação. Para os cenários futuros 1 e 2 considerou-se uma fração fixa de área irrigável de 2% da área da bacia. Considerou-se sempre área irrigável com cultura de arroz, cultura típica da região. O

consumo de água adotado foi de 1,75 l/s.ha, dado extraído de estudos na região feitos por Villanueva (1997). Além disso, considerou-se que a irrigação da lavoura ocorre apenas nos meses de setembro a janeiro (Villanueva, 1997). De posse das informações de demandas e ofertas foram feitas simulações de balanço hídrico e avaliado o risco de não atendimento dessas demandas. Constituem-se como demandas: evaporação, vazão de jusante, população local, termoelétricas e irrigação. Constituem-se como ofertas: vazões sintéticas afluentes obtidas por simulação.

3.1. Modelo de previsão

Considerando a previsão de volumes em épocas de estiagem, a precipitação pode ser desprezada. Essa hipótese é aceitável em períodos de secas (Andreolli, 2003; Collischonn et. al, 2004). Além disso, considerando apenas os aspectos de risco de não atendimento de uma determinada demanda, o operador do sistema está interessado nesses períodos (períodos de recessão). A rotina desenvolvida para previsão de volumes do reservatório de Candiota está baseada na hipótese de que não haverá chuva no tempo de previsão, ou que a chuva seja desprezível, ou seja, o modelo não é aplicável em períodos chuvosos. O problema de previsão consiste em determinar o tempo T_F , solução da equação 3.

$$V_i - E_v(t) \cdot T_F - D \cdot T_F + k \cdot \int_0^{T_F} Q(t) \cdot dt = 0 \quad (3)$$

onde: V_i , volume em $t = 0$; $E_v(t)$, demanda de evaporação diária que depende do tempo; T_F , tempo futuro em dias em que ocorre falha de atendimento; D , demanda total de água por dia; $Q(t)$ hidrograma de entrada ao reservatório (hidrograma de recessão); k , coeficiente de balanço de unidades. Das variáveis da equação 3 no início da previsão ($t = 0$), V_i é conhecido a partir da curva cota-volume do reservatório, D também é conhecido e é constante em todos os dias. A evaporação mensal é conhecida e através dela pode-se estimar a evaporação diária através de uma função linear. O modelo considera que a evaporação é função do mês e do volume do reservatório que por sua vez varia a cada intervalo de simulação. Resta ainda determinar o hidrograma de recessão para estimar o volume de afluência através da integral definida. O hidrograma de recessão pode ser determinado através de dados observados ajustando uma curva exponencial como dada pela equação 4 (Tucci, 2001, Singh, 1992).

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad (4)$$

onde: $Q(t)$ é o hidrograma de recessão; Q_0 , vazão de base em $t = 0$; e , número Neperiano; α , coeficiente de recessão; t , tempo. O coeficiente de recessão foi determinado através da seleção de hidrogramas de recessão da série de Candiota de 1949 a 1957 e a utilização da equação 4.

As estimativas iniciais foram feitas através do método dos mínimos quadrados. Após exaustivas tentativas chegou-se aproximadamente $\alpha = -0.0421 \text{ dias}^{-1}$. A vazão de base foi estimada em função do número de dias sem chuva até o instante inicial de previsão. Assim, para executar o modelo de previsão é necessário fornecer as seguintes informações: volume inicial do reservatório no tempo zero, vazão de demanda total, evaporação mensal e vazão base de recessão. Um ábaco baseado nas informações hidrológicas utilizadas no estudo foi construído como valores padrões que podem ser utilizados para a previsão e auxiliar o operador do sistema. A vazão de base, por exemplo, é função do número de dias sem chuva. O modelo de previsão determina a solução da equação 3 através de uma rotina de cálculo que simula os volumes a cada dia futuro até encontrar falha no atendimento da demanda X , através de um passo de cálculo diário. O “Lag” máximo de previsão é de 154 dias.

3.2. Resultados

Cenário atual: Considerando o cenário atual, a tabela 3 apresenta as demandas mensais A (população), B (termoelétrica), C (irrigação), D (vazão jusante), T (A+B+C+D) e Q (demanda T, mas transformada em vazão média mensal). Exceto Q, as demais demandas estão em $\text{m}^3/10000$. A área de agricultura considerada nessa simulação foi de 2% da área da bacia.

	A	B	C	D	T	Q (m³/s)
Jan	5,43	76,17	282,17	60,10	423,87	1,58
Fev	4,90	68,80	0,00	54,29	127,99	0,53
Mar	5,43	76,17	0,00	60,10	141,70	0,53
Abr	5,25	73,72	0,00	58,16	137,13	0,53
Mai	5,43	76,17	0,00	60,10	141,70	0,53
Jun	5,25	73,72	0,00	58,16	137,13	0,53
Jul	5,43	76,17	0,00	60,10	141,70	0,53
Ago	5,43	76,17	0,00	60,10	141,70	0,53
Set	5,25	73,72	273,07	58,16	410,20	1,58
Out	5,43	76,17	282,17	60,10	423,87	1,58
Nov	5,25	73,72	273,07	58,16	410,20	1,58
Dez	5,43	76,17	282,17	60,10	423,87	1,58

Tabela 3: demandas para o cenário atual considerando 2% de área irrigável: A- demanda população, B- demanda termo atual, C- demanda irrigação e D- vazão de jusante.

Além das demandas da tabela 3 foram computadas as demandas de evaporação, sendo essas, variáveis em cada intervalo de simulação, conforme equação 2.

A figura 7 apresenta as simulações em forma gráfica com base nas demandas da tabela 3. A linha tracejada indica o volume mínimo de 1,5hm³ como volume a partir do qual considera-se falha no atendimento. Nota-se que para esse cenário não houve falha.

Simulações análogas às apresentadas pela figura 7 com as demandas da tabela 3, mas variando-se a demanda de irrigação foram realizadas. Frações de área irrigável de até 6% da área da bacia foram consideradas para avaliar a probabilidade de não atendimento dessas demandas.

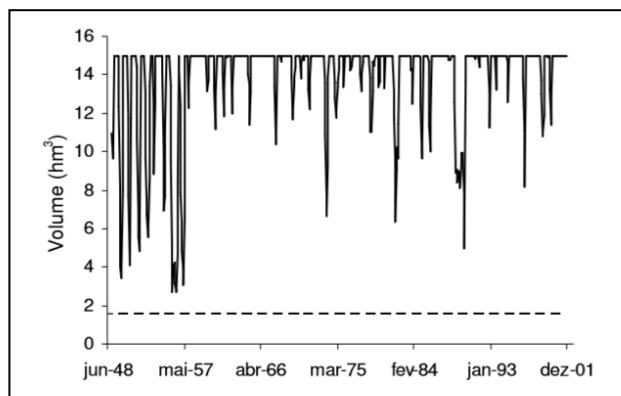


Figura 7: cenário atual, volumes mensais simulados de 1948 a 2001 considerando o balanço hídrico entre ofertas (série sintética obtida pelo IPHMEN) e demandas do reservatório de Candiota (tabela 3).

A figura 8 apresenta os resultados. Nota-se que para demandas de até 2% de área irrigável não existe probabilidade de falha. A partir de 4% de área irrigada, a probabilidade aumenta muito e o mês mais crítico é janeiro. Isso se deve ao fato de janeiro ser um dos meses mais secos e se constituir do último mês da demanda de irrigação, ou seja, mês de acúmulo da demanda de irrigação.

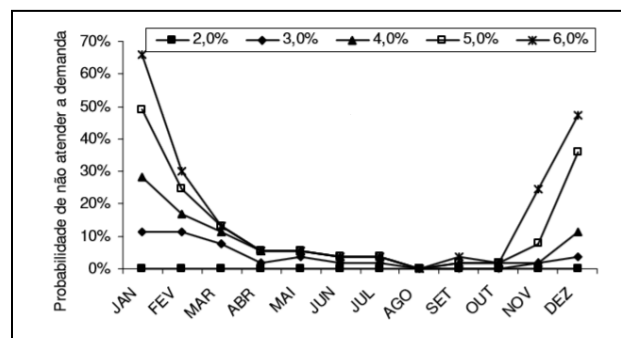


Figura 8: cenário atual, probabilidade de não atendimento da demanda em função da área irrigada, variando de 2% a 6% da área da bacia de Candiota.

Cenário Reservatório: Uma simulação complementar foi realizada considerando uma demanda constante no tempo de 1m³/s. Essa demanda é, de acordo com a documentação do projeto do reservatório de Candiota, a demanda regularizada. A figura 9 apresenta os resultados da simulação onde nota-se que não houve falha no atendimento. Para essa simulação o volume de falha é zero e não 1,5 hm³. Abaixo do volume zero ainda existe o volume morto que não foi considerado nesse estudo. A inexistência de falhas e os volumes próximos de zero que o reservatório atingiu na demanda de 1m³/s, mostra, de certa forma, que a metodologia adotada está consistente.

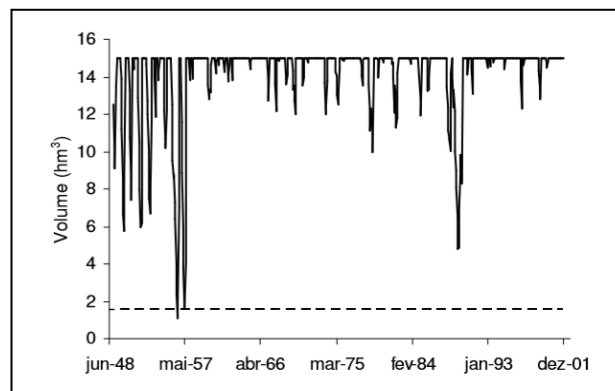


Figura 9: cenário reservatório, volumes mensais simulados de 1948 a 2001 considerando o balanço hídrico entre ofertas (série sintética obtida pelo IPHMEN) e demandas do reservatório de Candiota.

Cenário futuro 1: Considerando o cenário futuro 1, a tabela 4 apresenta as demandas mensais A (população), B (termoelétrica), C (agricultura), D (vazão jusante), E (termoelétrica futura 1), T (A+B+C+D+E) e Q (demanda T, mas transformada em vazão média mensal). Exceto Q, as demais demandas estão em m³/10000.

	A	B	C	D	E	T	Q
Jan	5,43	76,17	282,17	60,1	123,74	547,61	2,05
Fev	4,9	68,8	0	54,29	111,77	239,76	0,99
Mar	5,43	76,17	0	60,1	123,74	265,44	0,99
Abr	5,25	73,72	0	58,16	119,75	256,88	0,99
Mai	5,43	76,17	0	60,1	123,74	265,44	0,99
Jun	5,25	73,72	0	58,16	119,75	256,88	0,99
Jul	5,43	76,17	0	60,1	123,74	265,44	0,99
Ago	5,43	76,17	0	60,1	123,74	265,44	0,99
Set	5,25	73,72	273,07	58,16	119,75	529,95	2,05
Out	5,43	76,17	282,17	60,1	123,74	547,61	2,05
Nov	5,25	73,72	273,07	58,16	119,75	529,95	2,05
Dez	5,43	76,17	282,17	60,1	123,74	547,61	2,05

Tabela 4: demandas hídricas para o cenário futuro 1 considerando 2% de área irrigável: A- demanda população, B- demanda termo atual, C- demanda irrigação, D- vazão de jusante e E- demanda termo futura 1.

A área de agricultura considerada nessa simulação foi de 2% da área da bacia. A figura 10 apresenta as simulações de demandas e ofertas considerando 2% de área irrigada na bacia, segundo as demandas da tabela 4. Nota-se nesse cenário que existem diversas falhas ao longo do período de simulação.

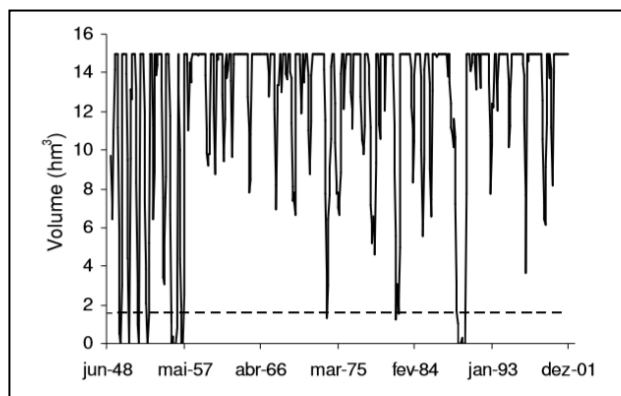


Figura 10: cenário futuro 1, volumes mensais simulados de 1948 a 2001 considerando o balanço hídrico entre ofertas (série sintética obtida pelo IPHMEN) e demandas do reservatório de Candiota (tabela 4).

A figura 11 apresenta a probabilidade de não atendimento das demandas da tabela 4 e também desconsiderando-se a demanda de irrigação. Nota-se que desconsiderando-se a demanda de irrigação, a probabilidade de não atendimento das demandas praticamente são nulas. Já quando se considera a irrigação, a probabilidade de não atendimento se aproxima de um máximo próximo de 12% em janeiro e março.

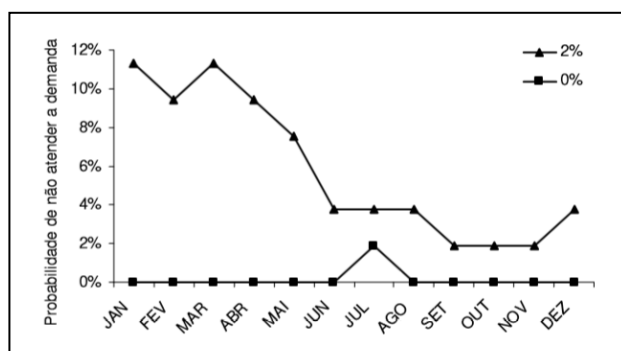


Figura 11: cenário futuro 1, probabilidade de não atendimento da demanda considerando-se 0% e 2% da área irrigada da bacia de Candiota.

Cenário futuro 2: Considerando o cenário futuro 2, a tabela 5 apresenta as demandas mensais A (população), B (termo 1), C (agricultura), D (vazão jusante), E

(termo futura 1), F (termo futura 2), T (A+B+C+D+E+F) e Q (demanda T, mas transformada em vazão média mensal). Exceto Q, as demais demandas estão em m³/10000. A área de agricultura considerada nessa simulação foi de 2% da área da bacia.

A figura 12 apresenta a simulações de demandas e ofertas considerando 2% de área irrigada na bacia, segundo as demandas da tabela 5. Nota-se a alta frequência de falhas para esse cenário de simulação.

	A	B	C	D	E	F	T	Q
Jan	5,43	76,17	282,17	60,1	123,74	93,75	641,37	2,40
Fev	4,9	68,8	0	54,29	111,77	84,68	324,44	1,34
Mar	5,43	76,17	0	60,1	123,74	93,75	359,2	1,34
Abr	5,25	73,72	0	58,16	119,75	90,73	347,61	1,34
Mai	5,43	76,17	0	60,1	123,74	93,75	359,2	1,34
Jun	5,25	73,72	0	58,16	119,75	90,73	347,61	1,34
Jul	5,43	76,17	0	60,1	123,74	93,75	359,2	1,34
Ago	5,43	76,17	0	60,1	123,74	93,75	359,2	1,34
Set	5,25	73,72	273,07	58,16	119,75	90,73	620,68	2,40
Out	5,43	76,17	282,17	60,1	123,74	93,75	641,37	2,40
Nov	5,25	73,72	273,07	58,16	119,75	90,73	620,68	2,40
Dez	5,43	76,17	282,17	60,1	123,74	93,75	641,37	2,40

Tabela 5: demandas hídricas para o cenário futuro 2 considerando 2% de área irrigável: A- demanda população, B- demanda termo atual, C- demanda irrigação, D- vazão de jusante, E- demanda termo futura 1 e F demanda termo futura 2.

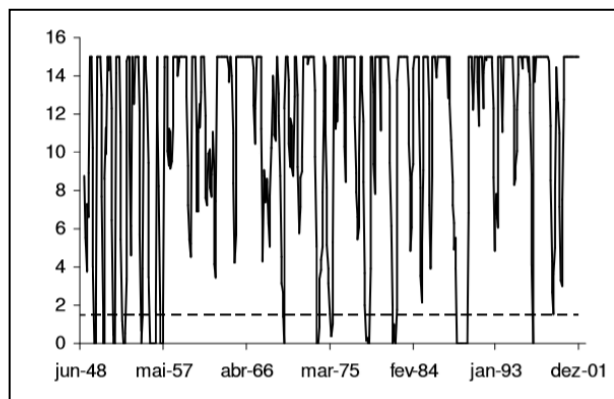


Figura 12: cenário futuro 2, volumes mensais simulados de 1948 a 2001 considerando o balanço hídrico entre ofertas (série sintética obtida pelo IPHMEN) e demandas do reservatório de Candiota (tabela 5).

A figura 13 apresenta a probabilidade de não atendimento das demandas da tabela 5 e também desconsiderando-se a demanda de irrigação. Nota-se que, mesmo desconsiderando-se a demanda de irrigação

existe uma probabilidade de em torno 5% de falha. Já com a demanda de 2% de área irrigada a probabilidade atinge 20% no mês de janeiro.

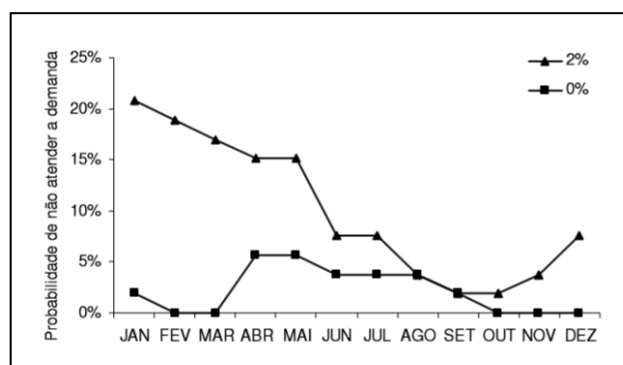


Figura 13: cenário futuro 2, probabilidade de não atendimento da demanda considerando-se 0% e 2% da área irrigada da bacia de Candiota.

Previsão: O modelo de previsão desenvolvido foi testado para os seguintes cenários teóricos: demandas, vazões de estiagem e potencial de evaporação. Na figura 14 são apresentados alguns cenários que foram testados.

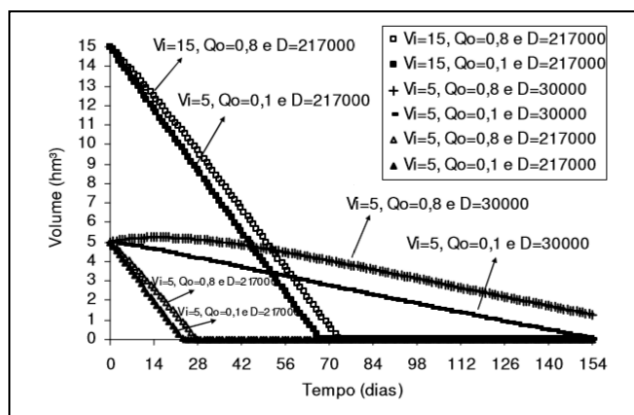


Figura 14: 3 pares de curvas: sendo 2 pares com volume inicial do reservatório de 5hm³ (Vi), variando-se a demanda e a vazão de base e 1 par com Vi de 15hm³, variando-se a vazão de base.

Na figura 14 são apresentados 3 pares de curvas, onde cada par é constituído por uma mesma demanda e mesmo volume inicial de reservatório, variando-se apenas a vazão de recessão Qo. Para o volume inicial do reservatório de 15hm³ a demanda considerada foi de 217000m³/d ainda soma-se a essa demanda a vazão em

torno de 17000m³/d para atender a população local e vazão de jusante.

Nesse cenário são apresentadas as curvas com Qo de 0,1m³/s e Qo de 0,8m³/s que são as vazões extremas de recessão que o modelo permite utilizar e são baseadas na interpretação da série histórica de vazões de Candiota.

A análise dessas 2 curvas indica que o sistema é pouco sensível a vazão de base mostrando que o mais significativo é o volume do reservatório no instante inicial de previsão. A mesma análise foi feita com volume inicial de 5hm³ do reservatório e incluindo ainda a variação da demanda. Nota-se que o sistema é mais sensível, nesse caso, à vazão de base (quando a demanda é menor). Para a demanda de 30000m³/d, Qo de 0,1m³/s e Vi de 5hm³ nota-se que inicialmente o reservatório até acumula volume de água. Em todos os cenários foi considerado a demanda de evaporação.

4. Conclusão e Recomendações

No presente estudo apresentou-se um conjunto de simulações do reservatório de Candiota considerando diversos cenários de demandas de água possíveis de ocorrerem, além da consideração da captação clandestina de água como para o uso da irrigação. As simulações foram realizadas considerando o intervalo de tempo mensal e foram baseadas no balanço entre ofertas e demandas de águas do reservatório ao longo de 53 anos (1949 a 2001). Além disso, um modelo, baseado numa metodologia bastante simples foi apresentado e que pode ser útil em algumas aplicações. Algumas inconsistências nos resultados poderão existir, devido principalmente a dois motivos: i) A série de vazões utilizada foi gerada por um modelo matemático e o período observado de dados é relativamente curto frente à série estendida; ii) A série de evaporação, apesar de ser longa, é de fonte pouco confiável conforme aponta diversos trabalhos na literatura. Pelas limitações de dados hidrológicos a metodologia utilizada se mostrou adequada aos objetivos do estudo. As principais conclusões do estudo são: i) Considerando-se os resultados das simulações obtidos observa-se que a vazão de 1m³/s constante no tempo é regularizada pelo reservatório e está de acordo com a documentação de projeto da construção do reservatório que data de 1971. Considerando este fato, se conclui que não existe risco de não atendimento das demandas atuais de Candiota (termo atual, vazão de jusante e população local). Mesmo quando considerada a retirada de água para irrigação nos meses de setembro a janeiro, para atender a 2% de área irrigada da área total da bacia, não ocorre falha no atendimento.

ii) Considerando os cenários futuros observou-se que só ocorre falha no atendimento para o cenário em que operem as 3 termoeletricas. O risco de falha para este cenário é relativamente baixo, 5,66% ocorrendo nos meses de abril e maio.

iii) Nos cenários futuros, quando considerada a retirada de água de 2% de área da bacia irrigada com cultura de arroz, observam-se falhas de atendimento com probabilidades de falhas acima 20% para o cenário que operem as 3 termoeletricas. Pelos resultados obtidos fica evidente que a retirada de água para irrigação pode gerar problemas de escassez de água para novas usinas que venham a demandar água da bacia em estudo.

O controle da captação clandestina de água se torna crucial caso o cenário de operação das 3 termoeletricas se concretize. Devido ao potencial termoeletrico da região e a já observância escassez hídrica recomenda-se que essa região tenha um melhor monitoramento hidrológico. A região apresenta os menores índices pluviométricos do estado e um grande potencial de demandas hídricas pela riqueza carbonífera. É, então, fundamental que os recursos hídricos sejam eficientemente controlados e para isso é fundamental o monitoramento das variáveis hidrológicas.

5. Referências

- ANDREOLLI, I. **Previsão de vazão em tempo real no rio Uruguai com base na previsão meteorológica**. Dissertação de mestrado, IPH/UFRGS, Porto Alegre-RS, 2003.
- ANDREOLLI, I; COLLISCHONN, W; TUCCI, C. E. M. **Análise da rede de Postos de Chuva na Previsão em Tempo Real na Bacia do Rio Uruguay**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos- RBRH, 2006, n°. 2 Vol. 11
- COLLISCHONN, W; HASS, R; ANDREOLLI, I; TUCCI, C. E. M. **Forecasting River Uruguay Flow Using Rainfall Forecasting from a Regional Weather Prediction Model**. Journal of Hydrologic, EUA, 2004, n°. 1-4, Vol. 305
- BENJAMIM, J. R; CORNELL, C. A. **Probability, Statistical and Decision for Civil Engineers**. New York. McGraw-Hill, 1970.
- CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., MAYS, L. W. **Hidrología Aplicada**. Bogotá, Colômbia: McGraw-Hill, 1994.
- CAMPOS, J. N. B., STUDART, T. M. C., MARTINZ, D. D. G., NASCIMENTO, L. S. V. **Contribuições ao Debate sobre as Eficiências de Pequenos e Grandes reservatórios**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos- RBRH, 2003, n°. 2 Vol. 8.
- LANNA, A. E. **Regularização de Vazões em Reservatórios**. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia, Ciência e Aplicação. 20 edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001.
- LETTENMAIER, D. P; WOOD, E. F. **Hydrologic Forecasting**. In: David R. Maidment. Handbook of Hydrology, ed. 1993, Editora: McGRAW – Hill.
- MAIDMENT, D. R. Handbook of Hydrology . New York. McGraw-Hill, 1993.
- SINGH, V. P. **Elementary Hydrology**. New Jersey: Prentice- Hall, 1992.
- COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA – CEEE. **Memorial Técnico CGTEE** . Fevereiro de 1971.
- PÁRRAGA, E. O. **Regionalização de Funções Hidrológicas com Dados Escassos : Bacia Contribuinte à Lagoa Mirim-RS** . Porto Alegre: Dissertação de mestrado, IPH/UFRGS, Porto Alegre– RS, 1997.
- TUCCI, C. E. M. **Regionalização de Vazões do Rio Grande do Sul**. IPH/UFRGS, Volume, 1,2 3 e 4. Porto Alegre, 1991. _____
- TUCCI, C. E. M., IPHMEN. 1994. Disponível em: <<http://www.iph.ufrgs.br/downloads/iphmen.txt>>. Acesso em 28/11/2008.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2º edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998. TUCCI, C. E. M. Hidrologia, Ciência e Aplicação. 2º edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001.
- SOKOLOV, A. A; CHAPMAN, T. G. **Métodos para Cálculo do Balanço Hídrico- um Guia Internacional para Pesquisas e Práticas**. Tradução Unesco, Eletrobrás, 1978.
- VILLANUEVA, A. O. N. **Simulação de Áreas de Inundações Dinâmicas: Canais Compostos e Wetlands**. Porto Alegre : UFRGS, 1997. Tese de doutorado, IPH/UFRGS, Porto Alegre– RS, 1997.