

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS NA OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE RESERVATÓRIOS

Fernando Duarte Barbalho¹ & Klebber Teodomiro Martins Formiga².

RESUMO --- Atualmente é evidente a necessidade de ferramentas para auxiliar os gestores dos sistemas de recursos hídricos, em especial os sistemas de reservatório, na busca por soluções ideais e seguras acerca do uso da água. Das diversas ferramentas que vem sendo estudadas é possível dar destaque aos modelos de simulação e de otimização. A otimização por Algoritmos Genéticos (AG) tem sido aplicada a problemas de recursos hídricos com desempenho interessante. O AG, permitindo fazer uso de funções do tipo “caixa preta”, pode trabalhar em conjunto com um sistema de simulação, adicionando flexibilidade na transposição de sistemas reais para plataformas computacionais. Assim, este trabalho buscou avaliar a aplicação conjunta do AG a um modelo de simulação como ferramenta de otimização na operação de reservatórios de múltiplos usos. Para tanto se buscou minimizar o déficit entre demanda e abastecimento do sistema simulado aplicando otimização em suas regras operacionais. Ambos os modelos foram desenvolvidos na plataforma Matlab® 2007. A área de aplicação foi uma situação hipotética baseada na Usina Hidrelétrica de Itumbiara. Os resultados foram satisfatórios, tendo o simulador apresentando flexibilidade e o otimizador alcançando soluções realmente melhores aos problemas propostos, atingindo no caso avaliado uma redução maior que 13% no déficit do sistema.

ABSTRACT --- Nowadays is clear the need of tools to help the water resources system's managers, especially the reservoir systems, searching ideal and secure solutions about the water uses. From the general tools that have been studied it's possible to give some feature to the simulation and optimization models. The optimization by Genetic Algorithms (GA) has been applied in water resources problems with an interesting performance. The GA, allowing the use of “black-box” functions, can work together with a simulation system, adding flexibility on transposition of real systems to computational platforms. So, this work searched to assess the together applying of GA with a simulation model as an optimization tool in multiple uses reservoirs operation. So it tried to minimize the deficit between demand and supply in a simulated system applying operation rules optimization. Both models were developed on Matlab® 2007 platform. The application area was a hypothetical situation based on Itumbiara's power plant. The results were satisfactory, with the simulator presenting flexibility and the optimization tool reaching greater solutions for the proposed problems actually, getting in the analyzed case an over 13% reduction in the system's deficit.

Palavras-chave: Algoritmos genéticos, modelos de simulação, sistemas de reservação.

¹ Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Engenheiro Civil da Saneamento de Goiás. Endereço⁽¹⁾: Rua R-34, Qd-33, Lt-23 – Conjunto Itatiaia - Goiânia - GO - CEP: 74690-590 - Brasil - Tel: (62) 3622-3271 - e-mail: fd.baralho@gmail.com.

² Engenheiro Civil pela UFCG, Mestre em Recursos Hídricos pela UFCG Doutor em Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP, Professor Adjunto da EEC/UFG.

1. INTRODUÇÃO

A Engenharia de Recursos Hídricos é aquela que envolve as decisões entorno da infraestrutura hídrica. Neste campo de atuação é inegável a preocupação crescente entorno do gerenciamento dos recursos hídricos de forma a melhor prover as diversas demandas tanto em quantidade quanto em qualidade. Isso se deve principalmente ao aumento substancial da demanda d'água vivido pela sociedade devido ao seu desenvolvimento e crescimento nos últimos séculos frente a uma disponibilidade hídrica que pouco se alterou.

Uma das soluções usuais para atender as demandas de uma região, de maneira estável no tempo, é amenizar a incompatibilidade entre a disponibilidade natural e a necessidade existente, através da implantação de sistemas de reservatórios. Tais sistemas visam acumular as águas de cheias para os períodos de escassez. Entretanto o desempenho deste procedimento depende consideravelmente do planejamento estratégico da operação dos reservatórios.

Existem períodos dentro de um sistema que é impossível atender todas as demandas mesmo com o acúmulo de águas, e assim surge a necessidade de avaliar dentro das prioridades do sistema qual a melhor estratégia de operação do sistema de forma a minimizar os danos considerados. Esta estratégia se resume na redução de água disponibilizada a cada tipo de consumidor.

Tal decisão é complexa e necessita de uma análise de seu impacto no tempo, pois a decisão menos danosa avaliando apenas uma determinada época pode não ser eficiente quando avaliado seu impacto em momentos futuros. É possível tornar o problema mais complicado quando se analisa não apenas um sistema, mas uma série de reservatórios interligados com prioridades de usos que variam no tempo.

De forma a facilitar a busca por melhores soluções, o desenvolvimento de ferramentas de otimização aplicadas a gerenciamento de recursos hídricos tem sido estimulado (Porto, 1997). A otimização constitui na aplicação de metodologias matemáticas a fim de maximizar ou minimizar um objetivo que pode ser equacionado como função de variáveis que representam elementos reais do problema. Problemas típicos em que a otimização é aplicada são a alocação de recursos na produção ou a definição de rotas em sistemas de logística. Existem diversas técnicas, destacando-se a Programação Linear, a Programação Não-Linear e a Programação Dinâmica com aplicação em problemas reais (Porto, 1997).

No entanto os problemas de recursos hídricos possuem frequentemente características não-lineares e são difíceis de modelar em um sistema bem equacionado de forma direta permitindo flexibilidade para aplicação em casos diferentes, tornando a otimização uma tarefa árdua e complexa. Porém, existe também a possibilidade de emprego de outro grupo de métodos

denominados Heurísticos, ao qual pertencem os Algoritmos Genéticos, técnica baseada na seleção natural que vem sendo aplicada a problemas práticos desde 1980 (Formiga, 2005). Uma das vantagens desse método é a possibilidade do uso de funções do tipo “caixa preta” para avaliação das variáveis a serem otimizadas, já que não avaliam diretamente o problema e sim trabalham com análise de grupos de soluções por meio de testes.

Este trabalho objetiva aplicar os Algoritmos Genéticos (AG) na otimização de sistemas de reservatórios. Após a aplicação do AG na determinação das regras de operação do sistema, é feita breve avaliação dos seus resultados em comparação com soluções iniciais propostas. Para tanto foi desenvolvida uma plataforma de simulação que pudesse ser inserida como função objetivo, esta foi desenvolvida em ambiente MATLAB na plataforma *Simulink*.

A simulação permite a inserção de vários aspectos complexos de um sistema, inclusive as inter-relações existentes e também permite a observação de sua variação no tempo. A técnica consiste em aplicar diretamente as variáveis de entrada em uma rede de processos e operações computacionais que representem o comportamento do sistema real e verificar o estado do mesmo após um intervalo de tempo (Azevedo, 1997). Dados os valores de entrada de água em cada reservatório de um sistema de Recursos Hídricos, e conhecendo-se as perdas e demandas a serem atendidas (conforme as regras operacionais), com uso do balanço hídrico e seguindo a seqüência de fluxo da água, podemos obter os volumes finais de cada reservatório bem como as vazões efluentes do sistema.

Particularmente, os modelos de simulação, também chamados descritivos, são atrativos devido a sua capacidade de retornar informações a respeito da eficiência do sistema bem como os resultados frente à estratégia de operação do sistema adotada (Labadie, 1998). Além do mais, podem fornecer resultados para diversos dados de entrada e regras de decisão fornecidas o que permite ao decisor avaliar diversos cenários e suas conseqüências para um sistema já existente bem como de sistemas a serem implantados, isso permite inclusive seu emprego em estudos de viabilidade (Yeh, 1985). Daí a sua aplicação neste estudo como função caixa preta da otimização por AG.

2. METODOLOGIA

A dinâmica de um sistema de reservatórios pode ser descrita pela utilização de vários tipos de equações matemáticas (Porto, 1997). Dentre estas se destaca a equação básica do balanço hídrico (equações de 1 a 3) de um reservatório que diz respeito à conservação de massa.

$$I - O = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

$$I = P + Q \quad (2)$$

$$O = E + Q_o \quad (3)$$

Onde: I é o “Input” ou entrada do sistema; O é o “Output” ou saída do sistema; V é o volume do reservatório; P é a precipitação sobre o reservatório; E é a evaporação do reservatório; Q_i representa as vazões afluentes ao reservatório, sendo a princípio variáveis aleatórias, e Q_o representa as vazões efluentes do reservatório.

No caso de um reservatório, é possível aplicar usualmente a seguinte restrição física (equações 4 e 5):

$$V_{\min} \leq V(t) \leq V_{\max} \quad (4)$$

Sendo: V_{\min} igual ao volume mínimo, que se refere ao volume morto e V_{\max} igual ao volume máximo operacional.

É possível também a aplicação de restrições operacionais do tipo

$$Q(t) \geq Q_{\min} \quad (5)$$

em que Q_{\min} representa a vazão efluente mínima a ser atendida para o período.

Como descrito anteriormente, neste trabalho, optou-se pelo desenvolvimento do modelo de simulação a ser empregado como função objetivo do otimizador. De forma sucinta o modelo é descrito a seguir:

2.1. Modelo de Simulação

O simulador em questão é um conjunto de unidades de processamento seqüencial de dados. Cada unidade de processamento é chamada “bloco”, e incorpora ao modelo dados ou realiza o processamento dos mesmos bem como podem exportar dados (THE MATHWORKS, 2007). Os blocos devem ser posicionados e ligados de maneira a formar um fluxograma que representa o sistema que se deseja simular. Para todo o período a ser simulado devem ser informados os dados requeridos, alguns destes sendo constantes. A maneira de disposição dos dados ao sistema é feita por meio de tabelas e valores informados nas máscaras dos blocos dentro da própria plataforma de simulação.

O simulador, de posse dos dados do sistema, compara em cada intervalo de tempo as demandas existentes em determinado reservatório com o volume disponível, e daí libera um determinado volume para suprimento das mesmas conforme as regras de operação do sistema.

Outro aspecto importante é a possibilidade da criação de sistema de reservatórios em série ou paralelo, devido ao sistema de *link* da plataforma utilizada.

Para a simulação, são necessários dados dos reservatórios e séries históricas previstas quanto a evaporação e precipitação sobre o mesmo, séries das vazões previstas para o período nos álveos que alimentam o sistema, estimativas das demandas de abastecimento, irrigação, geração de energia e vazão mínima (onde se incorporariam também os tipos de usos não habilitados no modelo) para todo o período e as regras de operação que se deseja avaliar. Além disso, há no caso de sistemas em série a possibilidade, por meio de regras, que um reservatório em situação crítica envie um dado de demanda para o reservatório à montante, situação que não foi empregada nas simulações aqui utilizadas.

Assim sendo, o presente simulador foi desenvolvido baseado na seguinte lógica de processos (equações 6 a 26):

2.1.1. *Leitura dos dados iniciais*

Os principais dados são a precipitação (P), evaporação (E), demandas e consuntividade de cada tipo, vazão de montante ($V_{z,m}$), regras de operação para cada tipo de demanda em cada reservatório, que podem ou não variar no tempo, e outros coeficientes informados nos blocos do sistema. Tais dados, informados em arquivo externo, devem ser lidos anteriormente à simulação, de forma que fiquem disponíveis ao Simulink®, onde as rotinas de inicialização de cada bloco se encarregam de gerir os mesmos. As Demandas podem ser do tipo, com seus respectivos coeficientes de retorno:

- Abastecimento – D_{abst} , C_{abst} ;
- Irrigação – D_{irrig} , C_{irrig} ;
- Geração Hidrelétrica – D_{ger} , C_{ger} ;
- Vazão Mínima – D_{min} , C_{min} ;
- Reservatório de Jusante – D_{jus} , C_{jus} ;

2.1.2. *Cálculo do Volume Efetivo para abastecimento (Vol_e)*

O volume dito efetivo, representa o volume disponível para atender as demandas, após a avaliação do Input e Output natural do sistema. Para cada instante dentro do período total tem-se que:

$$Vol_e = Prec - Evap + Vol_{ant} + Vol_{vaz} \quad (6)$$

Onde: Vol_e é o Volume Efetivo; $Prec$ é o Volume Precipitado sobre o Reservatório, obtido com os dados de precipitação e a área do espelho do reservatório estimada com auxílio da curva área-volume; $Evap$ é o Volume Evaporado do Reservatório, obtido com os dados de evaporação e a área do espelho do reservatório estimada com auxílio da curva área-volume; Vol_{ant} é o Volume do Reservatório no fim do instante anterior, volume inicial e Vol_{vaz} é o Volume Escoado de montante para o Reservatório.

2.1.3. Comparação com a Demanda

Esta é a série de procedimentos realizados no reservatório que verifica a situação do sistema quanto às possibilidades de atendimento da demanda em dado instante. As constantes aqui utilizadas são informadas nos blocos do sistema.

$$CASO I: \quad Vol_e - D > Vol_{m\acute{a}x} \quad (7)$$

$$CASO II: \quad Vol_{m\acute{i}n} \leq Vol_e - D < Vol_{m\acute{a}x} \quad (8)$$

$$CASO III: \quad Vol_{m\acute{i}n} > Vol_e - D \quad (9)$$

Onde: $Vol_{m\acute{a}x}$ é Volume Máximo do Reservatório; $Vol_{m\acute{i}n}$ é o Volume Mínimo estimado como limite de para sinalização de situação de emergência, a partir do qual são aplicadas as regras de operação; D é a Demanda Total do sistema, soma total dos diversos tipos de demanda para o período em unidade de volume (já que o intervalo de tempo é a unidade).

Pode-se verificar que a diferença “ $Vol_{m\acute{a}x} - D$ ” representa o volume que restaria no reservatório caso a demanda existente fosse totalmente abastecida. Daí:

- Caso I: situação de extravasão;
- Caso II: situação de operação normal;
- Caso III: situação considerada emergencial sujeita a redução da demanda a ser atendida conforme as regras operacionais e o volume disponível no reservatório;

Conforme os casos seguem-se as seguintes operações:

CASO I: Para a situação de extravasamento, seguem-se as seguintes considerações:

$$\text{Volume Reduzido do Reservatório:} \quad Red = Vol_e - Vol_{m\acute{a}x} \quad (10)$$

$$\text{Demanda Abastecida:} \quad DA = D \quad (11)$$

$$\text{Vazão a Jusante:} \quad V_{esc} = (Vol_e - Vol_{m\acute{a}x}) - D_{nc} \quad (12)$$

Onde: D_{nc} a parcela não consuntiva da demanda total.

CASO II: No caso de operação normal, segue que:

$$\text{Volume Reduzido do Reservatório:} \quad \text{Re } d = D \quad (13)$$

$$\text{Demanda Abastecida:} \quad DA = D \quad (14)$$

$$\text{Volume Escoado a Jusante:} \quad V_{esc} = D_{nc} \quad (15)$$

CASO III: Estando o sistema em situação crítica, conforme o volume mínimo indicado pelo usuário existem duas possibilidades: que a demanda reduzida conforme as regras seja possível de atender plenamente ou não. As regras são coeficientes que determinam a porcentagem da demanda de cada tipo que deve ser abastecida em determinada situação de emergência do reservatório em questão. Daí segue:

Sendo

$$Vol_e - D_{reg} \geq Vol_{morto} \quad (16)$$

$$\text{Volume Reduzido do Reservatório:} \quad \text{Re } d = D_{reg} \quad (17)$$

$$\text{Demanda Abastecida:} \quad DA = D_{reg} \quad (18)$$

$$\text{Déficit do Sistema:} \quad Def = D_{reg} \quad (19)$$

$$\text{Volume Escoado a Jusante:} \quad V_{esc} = D_{ncreg} \quad (20)$$

Onde D_{reg} representa a demanda total após a aplicação de redução devido as regras de operação e D_{ncreg} é a parte não consuntiva da mesma.

Sendo

$$Vol_e - D_{reg} < Vol_{morto} \quad (21)$$

$$\text{Volume reduzido do Reservatório:} \quad \text{Re } d = Vol_e - Vol_{morto} \quad (22)$$

$$\text{Demanda Abastecida:} \quad DA = D_{reg} - Vol_{morto} \quad (23)$$

$$\text{Déficit do Sistema:} \quad Def = D - D_{reg} - Vol_{morto} \quad (24)$$

$$\text{Volume escoado a Jusante:} \quad \text{Re } d = Pcr \quad (25)$$

Onde: Pcr , chamada proporção crítica e fornecida pelo usuário, é um valor que determina para esta situação crítica, a parcela do volume disponível (acima do volume morto) que atenderá os usos não consuntivos, sendo o restante direcionado aos usos consuntivos.

2.1.4. Operações finais de simulação para o referido instante

Realizada a etapa de operações, o reservatório tem reduzido o seu volume de toda a demanda que foi abastecida no período, liberando para jusante o volume excedente à sua capacidade somado das parcelas não consuntivas das demandas. Em caso especial de o mesmo se verificar em situação de emergência, quando o volume é menor que o mínimo desejável estabelecido, o reservatório envia um sinal de demanda ao reservatório de montante (quando houver) com um atraso de tempo de uma unidade de tempo, de maneira que o volume requerido é igual à:

$$D_{reserv} = (Vol_{mín} - Vol_{morto}) \times Coef_{emerg} \quad (26)$$

onde: D_{reserv} é a demanda do reservatório em questão que será requerida para montante na forma de D_{jus} na próxima unidade de tempo a ser simulada, e $Coef_{emerg}$ é o coeficiente emergencial informado pelo usuário do modelo.

Neste contexto, o simulador desenvolvido permite duas opções de regras: coeficientes de redução ao abastecimento dos diversos tipos de demandas que sejam fixos no tempo de simulação, ou variáveis no tempo. Somente a primeira situação foi aplicada para avaliação da otimização por AG.

No caso específico de aplicação para avaliação do AG em otimizar as regras de operação do sistema e assim sua operação, o simulador funciona como função objetivo do sistema, onde os dados de entrada são as regras de operação e o dado de saída para análise é o déficit total do sistema em relação a demanda prevista. Quanto menor for o déficit gerado por determinada regra de operação, considera-se melhor seu desempenho. No entanto este trabalho não incorporou à simulação e otimização aspectos de prioridade de usos nem os custos, que poderiam vir a compor uma função objetivo mais complexa. Maiores detalhes do AG e sua aplicação neste estudo estão a seguir.

2.2. Otimização das Regras de Operação por meio de AG

Seja um sistema de reservatórios, interligados ou independentes, sujeitos ao balanço hídrico já descrito e a restrições quanto ao volume, em que atuam diversas demandas, em uma situação onde o completo abastecimento destas pode ser impossível ou condicionar o sistema a um volume preocupante, é possível aplicar um conjunto de regras operacionais tais que (equações 27 a 30):

$$D_{total} = \sum_{i=1}^n D_i \quad (27)$$

$$D_{abastecida} = \sum_{i=1}^n D_i \times reg_i \quad (28)$$

$$Vol_{morto} \leq Vol - D_{abastecida} \quad (29)$$

$$Def = D_{total} - D_{abastecida} \quad (30)$$

Onde: D_i representa uma demanda do tipo i para um intervalo de tempo; reg_i é um coeficiente de minoração a ser aplicada a demanda do tipo i como regra de operação; Vol indica o volume do reservatório no momento da decisão, antes do abastecimento das demandas; Vol_{morto} indica o volume morto do reservatório; Def é a deficiência do sistema no período em questão, que indica o déficit do abastecimento em relação a demanda total requerida.

Desta maneira, também é possível buscar o melhor conjunto de regras operacionais reg que aperfeiçoem o sistema de forma a minimizar o déficit do sistema em uma série de períodos. Daí se tem que a função objetivo (FO) do problema é (equações 31 a 34):

$$Min \left\{ \sum_{i=1}^t Def_i \right\}, \text{ sujeito a} \quad (31)$$

$$reg_i \leq 1, \quad i = 1, 2, 3, \dots n \quad (32)$$

$$reg_i > 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots n \quad (33)$$

$$lb_i \leq reg_i \leq lu_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots n \quad (34)$$

Onde: lb_i e lu_i representam limites operacionais para as n regras estabelecidas pelo gestor em função das necessidades do sistema; e t representa cada instante do período.

Assim sendo, foi criada uma rotina na plataforma MATLAB, que utilizou da ferramenta de algoritmos genéticos contido neste programa de forma a buscar uma otimização das regras de usando como função “caixa preta” a aplicação direta destas regras por meio de simulação. Dois aspectos devem ser observados: primeiro, o AG é uma ferramenta de busca refinada que aplica diversas soluções em busca de gerar uma solução ótima, daí muitos dos valores de regras gerados nas tentativas de otimização, não serão de fato utilizados no sistema, já que a rotina gerada trabalha com um número fixo de regras e dentro do simulador é que é feito ou não aplicação destes valores para cada intervalo de tempo; segundo os valores limites para as regras geradas pelo AG variam de 0 a 1. A tabela 1, a seguir, ilustra os parâmetros utilizados pelo AG:

Tabela 1 - Parâmetros adotados para o AG no Matlab®.

CONFIGURAÇÃO DO GATOOOL			
OPÇÃO	VALOR UTILIZADO	OPÇÃO	VALOR UTILIZADO
Creation Fcn	@gacreationuniform	Mutation Fcn	@mutationgaussian
Crossover Fcn	@crossovercattered	Output Fcns	[]
Crossover Fraction	0.8	Pareto Fraction	35
Display	Final	Penalty Factor	100
Distance Measure Fcn	@distancecrowding,'phenotype'	Plot Fcns	@gaplotbestf
Elite Count	2	Plot Interval	1
Fitness Limit	-Inf	Pop Init Rage	[0;1]
Fitness Scaling Fcn	@fitscalingrank	Population Size	igual ao tamanho da população
Generations	igual ao número máx. de iterações	Population Type	'doubleVector'
Hybrid Fcn	[]	Selection Fcn	@selectionstochunif
Initial Penalty	10	Stall Gen Limit	igual ao número máx. de iterações
Initial Population	[]	Stall Time Limit	Inf
Initial Scores	[]	Time Limit	Inf
Migration Direction	'forward'	Tol Com	1.00E-06
Migration Fraction	0.2	Tol Fun	1.00E-06
Migration Interval	20	Vectorized	'off'

3. ÁREA DE ESTUDOS

Para avaliação do modelo, foi escolhido o sistema da Usina Hidroelétrica de Itumbiara, pertencente ao Sistema Furnas Centrais Elétricas S.A. que está localizada no Rio Paranaíba, entre os municípios de Itumbiara - GO e Araporã – MG. Tal reservatório drena uma área de aproximadamente 95000 km², possui uma vazão média de longo termo de 1528 m³/s e comporta um volume máximo de 17027 hm³ (ELETROBRÁS, 2004). A aplicação em um reservatório real serve para permitir uma quantificação mais realística dos parâmetros envolvidos em um sistema de reservação.

O modelo foi aplicado usando regras de operação constantes no tempo com simulação de 852 meses (1931 a 2001), que constituem o total de dados disponíveis pelo Sistema de Informações do Potencial Hidroelétrico Brasileiro (SIPOT) (ELETROBRÁS, 2004). A usina de Itumbiara está em operação desde 1981. Os dados de interesse do reservatório podem ser verificados nas tabelas abaixo (tabelas 2, 3 e 4) e foram também obtidos através do SIPOT (ELETROBRÁS, 2004).

Tabela 2 - Dados do Reservatório (adaptada de ELETROBRÁS, 2004).

SITUAÇÃO	COTA (m)	ÁREA (km ²)	Volume (hm ³)
NA MÁX	520	798	17027
	517	706.8	14824
	511	558	11079
	500	349	6127
NA MÍN	495	274	4573

Tabela 3 - Evaporação Média ao longo do ano em Itumbiara (adaptada de ELETROBRÁS, 2004).

Evaporação Média (mm)											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
22	20	29	39	51	57	76	57	59	33	15	27

Tabela 4 - Série Estimada de Vazões Naturais do Paranaíba em Itumbiara (adaptada de ELETROBRÁS, 2004).

VAZÕES (m³/s)													
Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Méd
1931	2932.77	5171.98	5191.79	3804.67	2050.96	1347.49	1218.68	1040.34	1020.52	990.80	1010.62	1367.30	2243.52
1932	1169.14	3041.76	2348.20	1585.28	1099.79	1050.25	864.97	639.07	467.66	774.81	1010.62	2308.56	1353.22
1933	3864.12	3190.38	2308.56	2120.31	1377.21	1060.16	781.74	685.63	622.22	761.93	896.67	1793.35	1613.86
1934	2179.76	1714.08	1704.18	1327.67	935.32	521.16	425.05	339.84	405.24	553.86	484.50	761.93	942.60
1935	3041.76	3685.78	2169.85	3269.64	1991.51	1238.50	883.79	774.81	429.02	711.39	794.62	1337.58	1680.51
1936	1387.12	915.50	2714.79	1872.61	1159.24	749.04	652.94	497.38	431.00	444.87	659.87	1040.34	1046.05
1937	2259.02	935.32	1228.59	1436.66	1010.62	845.15	594.48	438.92	386.41	451.80	1079.97	2150.04	1070.61
1938	2467.09	1694.27	1704.18	1377.21	813.45	678.70	633.12	397.31	307.15	280.40	593.49	1803.26	1060.82
1939	2675.16	2784.15	1218.68	1030.43	877.85	730.22	527.11	463.69	341.83	375.51	736.16	1040.34	1056.56
1940	1872.61	3339.00	2912.95	1456.48	1119.60	839.21	628.17	354.71	361.64	431.99	1347.49	1169.14	1306.30
1941	2318.47	1525.83	1297.95	1565.46	787.69	622.22	519.18	394.34	388.39	495.40	761.93	1446.57	1007.97
1942	1644.73	2001.42	3319.18	1981.60	1159.24	1733.90	1070.06	570.70	517.20	498.37	1089.88	1674.45	1434.95
1943	4369.43	4022.65	3547.06	1981.60	1248.41	1119.60	896.67	620.24	558.81	903.61	1555.56	1525.83	1850.82
1944	1446.57	2318.47	2199.58	1545.65	1179.05	781.74	652.94	503.33	403.26	431.00	1149.33	1238.50	1146.57
1945	1803.26	3685.78	4111.82	4230.72	2110.40	1347.49	1109.70	820.38	475.58	826.33	1436.66	3398.44	2102.75
1946	4319.89	2982.31	3834.40	2407.64	1605.10	1188.96	1079.97	820.38	711.39	665.82	928.38	1585.28	1840.64
1947	2150.04	2655.34	4716.21	3269.64	1694.27	1198.87	979.90	813.45	685.63	685.63	652.94	1842.89	1775.11
1948	2803.96	2635.53	3071.48	2150.04	1079.97	1139.42	755.98	637.08	540.98	539.99	524.13	2070.77	1490.87
1949	2516.63	4666.67	3259.73	1892.43	1337.58	1071.78	937.46	740.57	576.08	780.85	1024.56	1729.39	1693.10
1950	1866.22	2634.11	2401.25	1785.42	1136.86	833.49	662.97	488.62	379.94	655.81	1798.57	2261.90	1400.99
1951	3126.45	3159.24	2851.58	2322.76	1407.25	1059.56	838.06	676.20	509.64	557.43	564.06	1016.62	1498.14
1952	1881.56	2763.65	5891.55	2382.87	1472.77	1117.23	860.14	668.15	599.63	654.82	1089.19	1685.00	1752.28
1953	1272.00	1185.42	2266.06	2283.79	1301.47	882.57	701.04	530.49	519.58	980.63	1037.64	2130.70	1259.05
1954	1424.20	2454.00	1312.01	1112.97	901.86	615.78	444.17	332.26	280.10	256.78	851.13	1492.85	946.85
1955	2095.31	1666.07	1386.60	1695.92	851.54	636.66	452.89	336.23	263.75	586.14	848.45	2262.02	1087.99
1956	2309.53	1493.96	2345.64	1311.82	1299.48	1234.80	862.41	721.85	546.56	510.13	1400.69	3026.42	1424.62
1957	3734.67	4286.98	4119.17	3497.52	2331.58	1758.01	1255.12	960.76	828.90	769.82	1081.53	2188.39	2222.35
1958	2324.86	2780.61	2328.70	1846.85	1393.51	1059.33	932.44	684.51	660.20	825.34	656.60	994.48	1365.88
1959	3214.67	1926.04	3239.27	1978.30	1174.26	908.14	709.93	564.21	410.49	517.26	1259.28	1288.52	1452.40
1960	2343.08	2815.58	2969.20	1954.85	1427.07	1006.98	786.35	589.08	421.85	543.25	1238.13	2346.92	1530.53
1961	3768.87	4593.77	3882.34	2069.78	1760.42	1209.44	946.18	712.33	544.57	509.33	809.22	1290.73	1826.28
1962	3039.20	3230.24	3193.25	1823.40	1286.98	1027.56	771.10	624.08	562.98	792.43	1086.24	4184.15	1804.38
1963	3443.92	2930.10	1919.95	1311.40	980.40	773.84	648.40	519.98	408.60	464.04	625.28	509.60	1201.89
1964	2378.07	3137.57	1574.13	1269.45	957.37	623.41	529.82	423.79	323.55	937.77	1196.89	2032.42	1271.47
1965	3232.88	4031.85	5227.27	2891.15	1702.25	1223.64	1012.31	825.81	642.21	1125.90	1688.65	2424.90	2159.87
1966	3927.40	5056.26	3701.76	2554.61	1732.30	1296.54	1004.33	790.44	672.45	1018.02	1517.37	2686.66	2146.56
1967	3344.43	4218.33	3203.48	2321.44	1524.87	1149.33	849.02	692.15	609.81	531.10	1233.77	2630.42	1845.43
1968	2711.92	3141.52	3548.66	1914.89	1282.61	955.28	773.78	639.16	588.02	806.08	941.89	2077.80	1608.23
1969	1588.16	1872.21	1628.48	1215.83	919.96	676.79	404.61	448.59	396.65	658.15	2101.17	2313.55	1180.66
1970	3833.80	3278.40	2902.61	1909.71	1248.78	909.79	745.45	601.31	638.91	838.10	999.52	884.48	1556.78
1971	738.58	820.92	971.27	837.06	515.40	457.38	342.79	305.64	321.68	585.98	1226.51	2606.12	811.79
1972	1722.02	2030.66	1938.46	1635.57	972.41	719.97	656.19	501.24	434.19	1122.85	2371.27	2111.31	1363.41
1973	2575.55	2718.46	2834.55	2980.36	1674.95	1186.02	964.62	719.77	613.16	989.11	1778.10	1949.94	1741.94
1974	2181.76	1550.05	3210.49	2853.17	1767.97	1269.55	980.36	790.80	578.57	902.06	779.46	1442.43	1527.06
1975	2210.20	1845.30	1240.40	1482.99	1009.95	682.89	610.45	455.72	392.98	529.66	1181.58	1380.13	1080.58
1976	1362.85	1422.91	1705.68	1216.51	885.48	621.45	525.96	403.01	531.61	642.33	1383.29	3235.40	1161.67
1977	3145.91	2534.40	1448.96	1633.44	1088.66	871.52	628.99	473.92	452.48	564.02	1197.09	2215.64	1348.35
1978	3555.19	2388.70	2799.88	1939.37	1414.90	1232.86	897.76	702.00	612.31	868.92	1421.65	2790.18	1171.71
1979	3814.38	4680.03	2945.35	2304.48	1630.42	1354.31	1083.42	916.34	922.32	795.15	1368.71	1681.10	1940.78
1980	3918.54	4374.36	2590.59	2480.19	1688.30	1328.96	1096.35	843.17	726.11	680.73	1329.91	2456.76	1945.05
1981	3446.70	2157.70	2101.67	2084.72	1389.70	1143.47	882.76	702.94	527.89	1094.23	2608.33	3011.98	1761.31
1982	4440.83	3282.42	4288.42	3230.64	2165.15	1667.00	1287.23	1035.05	876.35	1119.22	1113.61	1610.36	2172.25
1983	4145.33	5682.42	3997.76	3279.50	2240.16	1779.32	1417.51	1098.19	1070.79	1537.70	2232.48	3482.94	2645.14
1984	2774.08	2046.22	1883.09	2225.86	1386.02	1002.55	779.45	672.74	814.86	695.00	731.69	1728.48	1391.86
1985	3622.72	2928.18	2866.36	2108.70	1443.58	1082.41	882.01	709.01	627.69	670.14	926.52	1650.73	1620.63
1986	2937.16	2540.81	2042.02	1322.00	1044.43	766.36	655.14	647.57	499.92	504.59	534.93	1540.60	1247.55
1987	2094.65	1836.61	1842.92	1855.91	1263.31	887.86	670.49	522.07	478.93	587.77	1151.13	2743.86	1326.35
1988	2327.11	2881.17	3048.92	2146.27	1394.41	1109.78	827.59	638.91	484.05	774.48	1226.76	1885.10	1554.71
1989	2014.87	2313.84	2161.61	1325.80	946.87	760.88	604.26	550.70	534.86	561.49	1229.69	3937.62	1409.38
1990	3060.57	1905.69	1809.25	1400.46	1194.12	849.06	764.30	554.75	595.24	654.54	649.50	749.54	1179.69
1991	1879.66	2435.37	3751.02	3398.77	1774.27	1266.65	1000.67	743.50	597.82	771.06	1151.80	1851.23	1713.85
1992	3194.09	4957.27	2853.12	2465.97	1896.33	1422.32	1126.42	921.18	987.97	1491.38	2625.36	3033.14	2229.69
1993	2390.92	3327.16	2564.64	2311.84	1474.16	1227.84	925.62	800.46	675.74	792.86	798.12	1914.45	1589.93
1994	3604.29	2141.04	3477.83	2278.39	1574.89	1212.21	996.14	756.45	569.80	626.82	982.59	1972.40	1683.60
1995	1886.82	3271.85	2107.15	1886.54	1525.21	1047.52	822.20	615.30	514.94	568.23	876.11	1525.91	1375.18
1996	1780.15	1244.06	1696.91	1144.28	814.01	608.40	486.33	412.26	442.35	447.24	1126.67	1572.71	980.77
1997	3697.77	2037.38	2246.27	2280.45	1483.00	1230.20	867.56	640.84	532.53	603.17	781.58	2370.40	1564.30
1998	1955.80	2303.36	1766.61	1219.64	1061.89	815.14	573.92	537.94	397.20	463.47	881.97	1465.47	1113.67
1999	1633.00	1170.00	2593.00	1110.00	729.00	594.00	423.00	319.00	350.00	366.00	796.00	1123.00	934.32
2000	2202.00	2989.00	3281.00	1722.00	1024.00	781.00	646.00	505.00	762.00	427.00	1113.00	1962.00	1442.44
2001	1498.54	1044.31	1456.30	1057.35	736.50	551.90	404.95	306.01	353.29	543.30	977.73	1652.59	882.17
Mínima	738.58	820.92	971.27	837.06	515.40	457.38	342.79	305.64	263.75	256.78	484.50	509.60	256.78
Média	2618.24	2744.28	2679.91	2013.78	1323.10	1010.60	792.01	622.30	545.32	691.88	1131.21	1941.79	1503.05
Máxima	4440.83	5682.42	5891.55	4230.72	2331.58	1779.32	1417.51	1098.1					

Quanto aos dados de precipitação, os mesmos foram obtidos no sítio eletrônico da Agência Nacional das Águas, o HIDROWEB (ANA, 2006). Entretanto, apesar de serem listados três postos de medição circunvizinhos ao reservatório, os mesmos estão repletos de falhas e descontinuidades nas séries, portanto foi escolhido aquele que possuía a série mais longa, o Posto de Itumbiara (código ANA: 1849004) situado nas coordenadas de Latitude -18.42° e Longitude -49.20° , bem próximo à usina. Sua série histórica, apesar de ter um número considerável de falhas, abrange o período de 1945 a 1971. Como as medidas de evaporação disponíveis no SIPOT, são apenas as médias estimadas para cada um dos doze meses do ano, o mesmo foi realizado com os dados de precipitação. Os meses que possuíam dados com falhas foram descartados, então para cada mês se tirou a média entre os valores observados, chegando a seguinte estimativa (tabela 5):

Tabela 5 - Precipitação Média ao longo do ano estimada para o Reservatório (adaptada de ANA, 2006).

ITUMBIARA - MÉDIA MENSAL	
MÊS	PRECIPITAÇÃO (mm)
Janeiro	222.62
Fevereiro	191.74
Março	133.89
Abril	54.81
Mai	25.88
Junho	7.71
Julho	6.8
Agosto	2.11
Setembro	51.11
Outubro	103.54
Novembro	133.61
Dezembro	177.32

As demandas usadas neste estudo foram estimadas (tabela 6), de maneira que todos os tipos de demandas aplicáveis ao modelo com apenas um reservatório pudessem ser trabalhados, para que fosse gerado um cenário fictício onde fosse observada a ocorrência de situações emergenciais.

Tabela 6 - Demandas Estimadas Adotadas para Simulação.

Década	Mês	ANO									
		1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939	1940
1	jan	635.1537	632.0983	629.0428	625.9874	622.932	619.8765	616.8211	613.7656	610.7102	607.6548
	fev	706.4043	704.644	702.8836	701.1233	699.363	697.6027	695.8423	694.082	692.3217	690.5614
	mar	955.4128	956.7263	958.0398	959.3533	960.6668	961.9803	963.2937	964.6072	965.9207	967.2342
	abr	1096.499	1092.031	1087.564	1083.097	1078.629	1074.162	1069.695	1065.228	1060.76	1056.293
	mai	1586.324	1596.569	1606.813	1617.058	1627.303	1637.547	1647.792	1658.036	1668.281	1678.526
	jun	1884.204	1900.998	1917.792	1934.586	1951.38	1968.174	1984.968	2001.762	2018.556	2035.35
	jul	2097.996	2109.961	2121.925	2133.89	2145.855	2157.819	2169.784	2181.749	2193.713	2205.678
	ago	2076.394	2059.602	2042.809	2026.016	2009.224	1992.431	1975.639	1958.846	1942.053	1925.261
	set	1218.64	1234.392	1250.144	1265.896	1281.648	1297.4	1313.152	1328.904	1344.656	1360.408
	out	980.2029	987.065	993.9272	1000.789	1007.652	1014.514	1021.376	1028.238	1035.1	1041.962
	nov	851.3393	855.8628	860.3863	864.9098	869.4333	873.9568	878.4803	883.0038	887.5273	892.0508
	dez	736.4756	735.7582	735.0408	734.3234	733.606	732.8886	732.1713	731.4539	730.7365	730.0191

Tabela 6 – Continuação.

Década	Mês	ANO									
		1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949	1950
2	jan	604.5993	602.2229	599.8464	597.47	595.0935	596.1954	600.7758	605.3561	609.9364	614.5167
	fev	688.801	687.4319	686.0627	684.6936	683.3245	685.0259	689.7978	694.5697	699.3416	704.1135
	mar	968.5477	969.5693	970.5909	971.6125	972.6341	979.2415	991.4346	1003.628	1015.821	1028.014
	abr	1051.826	1048.351	1044.877	1041.402	1037.928	1041.415	1051.864	1062.313	1072.762	1083.211
	mai	1688.77	1696.738	1704.706	1712.674	1720.642	1721.087	1714.01	1706.932	1699.854	1692.776
	jun	2052.144	2065.206	2078.268	2091.33	2104.393	2102.925	2086.928	2070.932	2054.935	2038.938
	jul	2217.643	2226.949	2236.255	2245.56	2254.866	2259.53	2259.551	2259.573	2259.594	2259.615
	ago	1908.468	1895.407	1882.346	1869.285	1856.224	1854.543	1864.242	1873.941	1883.64	1893.339
	set	1376.16	1388.412	1400.663	1412.915	1425.166	1438.801	1453.819	1468.836	1483.854	1498.872
	out	1048.825	1054.162	1059.499	1064.836	1070.173	1074.914	1079.058	1083.202	1087.346	1091.49
	nov	896.5743	900.0926	903.6109	907.1292	910.6475	912.6939	913.2686	913.8432	914.4178	914.9925
	dez	729.3017	728.7437	728.1857	727.6278	727.0698	728.8597	732.9975	737.1354	741.2732	745.411

Década	Mês	ANO									
		1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960
3	jan	619.0971	622.6595	626.222	629.7845	633.347	634.5943	633.5265	632.4586	631.3908	630.323
	fev	708.8855	712.597	716.3085	720.02	723.7315	736.6536	758.7865	780.9193	803.0521	825.185
	mar	1040.207	1049.691	1059.175	1068.658	1078.142	1078.231	1068.925	1059.62	1050.314	1041.009
	abr	1093.659	1101.786	1109.913	1118.04	1126.167	1127.209	1121.167	1115.124	1109.081	1103.038
	mai	1685.699	1680.194	1674.689	1669.184	1663.679	1657.579	1650.884	1644.188	1637.493	1630.797
	jun	2022.941	2010.499	1998.058	1985.616	1973.174	1990.723	2038.264	2085.805	2133.346	2180.887
	jul	2259.637	2259.653	2259.67	2259.686	2259.703	2286.661	2340.562	2394.462	2448.362	2502.263
	ago	1903.038	1910.581	1918.125	1925.668	1933.212	1965.106	2021.351	2077.596	2133.842	2190.087
	set	1513.889	1525.57	1537.25	1548.931	1560.611	1565.721	1564.26	1562.799	1561.338	1559.877
	out	1095.634	1098.857	1102.081	1105.304	1108.527	1118.411	1134.955	1151.5	1168.045	1184.589
	nov	915.5671	916.0141	916.461	916.9079	917.3549	914.3342	907.8458	901.3574	894.869	888.3807
	dez	749.5488	752.7672	755.9855	759.2038	762.4221	763.5755	762.664	761.7525	760.841	759.9295

Década	Mês	ANO									
		1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970
4	jan	629.2552	628.4246	627.5941	626.7636	625.933	635.5121	655.5008	675.4895	695.4782	715.4669
	fev	847.3178	864.5323	881.7467	898.9611	916.1756	930.5426	942.0624	953.5821	965.1019	976.6216
	mar	1031.703	1024.465	1017.228	1009.99	1002.752	1010.404	1032.944	1055.485	1078.026	1100.566
	abr	1096.995	1092.296	1087.596	1082.896	1078.196	1090.838	1120.822	1150.806	1180.79	1210.774
	mai	1624.102	1618.894	1613.687	1608.479	1603.272	1623.675	1669.688	1715.701	1761.714	1807.726
	jun	2228.428	2265.404	2302.38	2339.356	2376.333	2381.825	2355.832	2329.84	2303.847	2277.855
	jul	2556.163	2598.085	2640.008	2681.93	2723.853	2715.995	2658.356	2600.718	2543.079	2485.441
	ago	2246.332	2290.078	2333.824	2377.57	2421.316	2419.818	2373.076	2326.334	2279.592	2232.85
	set	1558.416	1557.28	1556.143	1555.007	1553.871	1570.571	1605.106	1639.642	1674.178	1708.714
	out	1201.134	1214.002	1226.87	1239.738	1252.606	1275.946	1309.758	1343.57	1377.382	1411.194
	nov	881.8923	876.8458	871.7993	866.7528	861.7063	869.3764	889.7633	910.1501	930.5369	950.9238
	dez	759.0181	758.3091	757.6002	756.8913	756.1823	762.7982	776.7389	790.6796	804.6203	818.561

Década	Mês	ANO									
		1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
5	jan	735.4557	751.0024	766.5492	782.096	797.6427	807.5108	811.7001	815.8895	820.0788	824.2681
	fev	988.1414	997.1012	1006.061	1015.021	1023.981	1026.099	1021.375	1016.652	1011.928	1007.205
	mar	1123.107	1140.638	1158.17	1175.702	1193.233	1203.355	1206.066	1208.778	1211.49	1214.202
	abr	1240.759	1264.08	1287.401	1310.722	1334.043	1339.612	1327.43	1315.249	1303.067	1290.885
	mai	1853.739	1889.527	1925.315	1961.103	1996.891	2005.663	1987.42	1969.177	1950.934	1932.692
	jun	2251.862	2231.646	2211.43	2191.213	2170.997	2162.842	2166.747	2170.653	2174.558	2178.464
	jul	2427.802	2382.972	2338.142	2293.312	2248.482	2239.583	2266.614	2293.645	2320.676	2347.707
	ago	2186.108	2149.753	2113.399	2077.044	2040.689	2030.841	2047.501	2064.161	2080.821	2097.481
	set	1743.249	1770.111	1796.972	1823.833	1850.694	1862.001	1857.753	1853.505	1849.257	1845.009
	out	1445.006	1471.304	1497.602	1523.9	1550.198	1552.99	1532.275	1511.56	1490.846	1470.131
	nov	971.3106	987.1671	1003.023	1018.88	1034.736	1043.332	1044.667	1046.003	1047.338	1048.673
	dez	832.5017	843.3445	854.1872	865.03	875.8728	883.6436	888.3426	893.0416	897.7406	902.4395

Década	Mês	ANO									
		1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
6	jan	828.4574	831.7158	834.9742	838.2326	841.4909	843.0634	842.95	842.8366	842.7231	842.6097
	fev	1002.481	998.8074	995.1336	991.4597	987.7859	981.0571	971.2732	961.4894	951.7055	941.9216
	mar	1216.913	1219.023	1221.132	1223.241	1225.35	1228.03	1231.28	1234.53	1237.78	1241.03
	abr	1278.703	1269.228	1259.753	1250.279	1240.804	1237.743	1241.097	1244.451	1247.805	1251.159
	mai	1914.449	1900.26	1886.071	1871.882	1857.693	1849.029	1845.89	1842.751	1839.613	1836.474
	jun	2182.369	2185.407	2188.444	2191.482	2194.519	2200.395	2209.108	2217.821	2226.534	2235.247
	jul	2374.738	2395.762	2416.786	2437.81	2458.834	2461.478	2445.741	2430.004	2414.266	2398.529
	ago	2114.14	2127.098	2140.056	2153.013	2165.971	2177.516	2187.648	2197.779	2207.911	2218.043
	set	1840.761	1837.458	1834.154	1830.85	1827.546	1828.387	1833.373	1838.359	1843.346	1848.332
	out	1449.416	1433.305	1417.194	1401.082	1384.971	1378.957	1383.042	1387.126	1391.211	1395.295
	nov	1050.008	1051.047	1052.085	1053.124	1054.162	1054.207	1053.257	1052.307	1051.358	1050.408
	dez	907.1385	910.7933	914.448	918.1028	921.7576	921.8898	918.4995	915.1092	911.7189	908.3286

Tabela 6 – Continuação.

Década	Mês	ANO										
		1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
7	jan	842.4963	842.4081	842.3199	842.2317	842.1434	842.0552	841.967	841.8788	841.7906	841.7024	841.6142
	fev	932.1378	924.5281	916.9185	909.3088	901.6991	894.0895	886.4798	878.8701	871.2605	863.6508	856.0411
	mar	1244.281	1246.809	1249.336	1251.864	1254.392	1256.92	1259.448	1261.976	1264.504	1267.032	1269.56
	abr	1254.513	1257.122	1259.73	1262.339	1264.948	1267.556	1270.165	1272.773	1275.382	1277.991	1280.599
	mai	1833.335	1830.894	1828.452	1826.011	1823.57	1821.129	1818.687	1816.246	1813.805	1811.364	1808.922
	jun	2243.961	2250.737	2257.514	2264.291	2271.068	2277.845	2284.622	2291.399	2298.176	2304.953	2311.73
	jul	2382.792	2370.552	2358.312	2346.072	2333.832	2321.592	2309.352	2297.112	2284.872	2272.632	2260.392
	ago	2228.175	2236.055	2243.935	2251.816	2259.696	2267.576	2275.457	2283.337	2291.217	2299.097	2306.978
	set	1853.318	1857.196	1861.074	1864.952	1868.83	1872.708	1876.586	1880.464	1884.343	1888.221	1892.099
	out	1399.38	1402.557	1405.734	1408.911	1412.087	1415.264	1418.441	1421.618	1424.795	1427.972	1431.149
	nov	1049.458	1048.72	1047.981	1047.242	1046.504	1045.765	1045.026	1044.288	1043.549	1042.811	1042.072
	dez	904.9383	902.3014	899.6645	897.0275	894.3906	891.7537	889.1168	886.4799	883.843	881.2061	878.5692

De forma a facilitar a comparação entre a demanda total e a disponibilidade hídrica adotada na simulação, é ilustrado abaixo (figura 1) um gráfico onde é apresentado o valor médio de demanda (Dadot) e vazão (Qmed) aplicado para o período avaliado:

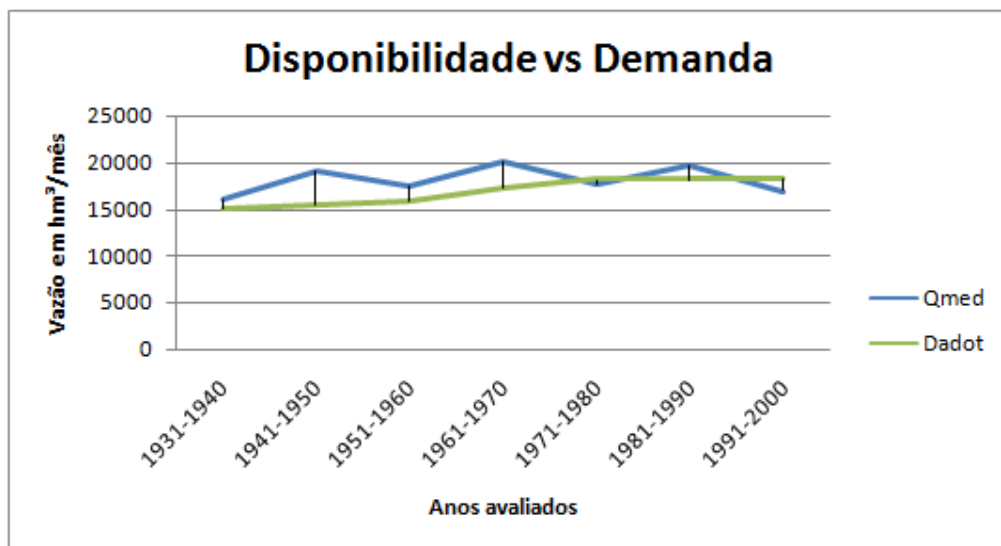


Figura 1 – Comparação em Disponibilidade e Demanda.

4. APLICAÇÃO

A situação prevista de aplicação pretende avaliar o software com apenas uma regra de operação para cada tipo de demanda ao longo do tempo. Será então realizada a otimização por algoritmos genéticos três vezes para comparação de resultados. A tabela a seguir (tabela 7) mostra os dados adotados para a situação indicada, não constam os dados de vazão, demanda, evaporação ou precipitação, pois serão adotados os dados indicados anteriormente.

Tabela 7 - Dados empregados na Simulação.

DADOS DA SIMULAÇÃO		
DADOS	VALOR	Observação
Número Identificador:	1	Só existe um
REGRAS	Abastecimento	0.5
	Irrigação	0.5
	Geração	0.7
	Vazão Mínima	0.7
	Reservatório Jusante	0
Volume Máximo	17027	
Volume Mínimo	6000	
Volume Morto	4573	
Coefficiente de Emergência	0	Não é possível
Proporção Crítica	50.00%	
Volume Inicial do Reservatório	15000	Arbitrado
Períodos de Simulação	852	1931 a 2001
Demais		Já definidos anteriormente

Definiu-se também que o valor mínimo da regra para todos os tipos de demanda e em todos os períodos fosse de 0,2, exceto para a geração de energia, com valor de 0,4, isso significa que o otimizador buscará sempre valores maiores que 0,2 para as regras de operação. Após a etapa de preparo dos dados, seguiu a configuração de algumas opções do Simulink® para que a simulação trabalhe-se com dados discretos e produzi-se como saída de dados apenas os requeridos para avaliação e otimização. Finalmente o caso foi simulado uma vez para verificação do modelo simulador e otimizado três vezes, sendo que em cada um dos três cenários variou-se: o número de iterações e o número de regras a ser testado por iteração. Será avaliado o período de 1931 a 2001. Cabe ainda reiterar que as unidades usadas são de hm^3 para volume e mês para intervalo de tempo.

5. RESULTADOS

Após a simulação do sistema segundo as condições expressas e valores adotados, foi realizada a otimização por Algoritmos Genéticos, já descrita anteriormente. O uso de três cenários de aplicação visou apenas verificar a variabilidade de resultados em função dos parâmetros do AG e não a busca por uma análise profunda dos mesmos. Os parâmetros que diferenciam cada otimização dizem respeito apenas a quantidade de cálculos que será efetuada, sendo possível então avaliar a variação de resposta do AG conforme as possibilidades computacionais. Além disso, uma avaliação pode ser feita também pela própria ferramenta gráfica contida no mesmo.

Os resultados das três otimizações são mostrados a seguir. Os parâmetros de otimização adotados bem como os resultados de cada procedimento de otimização são expostos nas tabelas a seguir (tabelas 8, 9 e 10). É possível observar que os limites impostos foram obedecidos.

Tabela 8 - Resultados para otimização de regras no Cenário 1.

Primeira Otimização		
Número de máximo de Iterações:		60
Tamanho da População:		20
Número necessário de Iterações:		43
Regras Obtidas	Abastecimento:	0.9949
	Irrigação:	0.9966
	Geração de Energia:	0.9999
	Vazão Mínima:	0.9973
	*Reservatório de Jusante:	0.4524
Mês Simulados:		852
Demanda Total do Sistema (hm ³):		3103478.41
Déficit Total do Sistema no Período (hm ³):		378227.90
Déficit Relativo:		12.19%
Déficit sem Otimização (hm ³):		437889.04
Melhora Relativa:		13.62%
Tipo de Regras Adotado:		Fixas no Tempo

Tabela 9 - Resultados para otimização de regras no Cenário 2.

Segunda Otimização		
Número de máximo de Iterações:		50
Tamanho da População:		30
Número necessário de Iterações:		41
Regras Obtidas	Abastecimento:	0.9987
	Irrigação:	1.0000
	Geração de Energia:	1.0000
	Vazão Mínima:	0.9958
	*Reservatório de Jusante:	0.9119
Mês Simulados:		852
Demanda Total do Sistema (hm ³):		3103478.41
Déficit Total do Sistema no Período (hm ³):		378119.86
Déficit Relativo:		12.18%
Déficit sem Otimização (hm ³):		437889.04
Melhora Relativa:		13.65%
Tipo de Regras Adotado:		Fixas no Tempo

Tabela 10 - Resultados para otimização de regras no Cenário 3.

Terceira Otimização		
Número de máximo de Iterações:		15
Tamanho da População:		40
Número necessário de Iterações:		40
Regras Obtidas	Abastecimento:	0.9984
	Irrigação:	0.9966
	Geração de Energia:	0.9994
	Vazão Mínima:	0.9978
	*Reservatório de Jusante:	0.5622
Mês Simulados:		852
Demanda Total do Sistema (hm ³):		3103478.41
Déficit Total do Sistema no Período (hm ³):		378219.40
Déficit Relativo:		12.19%
Déficit sem Otimização (hm ³):		437889.04
Melhora Relativa:		13.63%
Tipo de Regras Adotado:		Fixas no Tempo

O déficit relativo indica o valor de deficiência no abastecimento das demandas em todo o período em relação à demanda total para o mesmo. Já o valor descrito como melhora relativa, indica a redução do déficit encontrado após a otimização em relação ao sistema inicial. O valor referente

às regras ótimas para demandas oriundas de reservatórios a jusante, não é aplicável neste caso, já que para este sistema modelado não existe reservatório a jusante, por isso o item encontra-se marcado nas tabelas, isso decorre pelo mecanismo de otimização ter sido implementado em uma rotina genérica para diversos casos.

Como referenciado anteriormente, a ferramenta de otimização por algoritmos genéticos do Matlab® possui um utilitário que permite visualização de seu desempenho de acordo com o número de iterações já realizadas (figuras 2, 3 e 4). No eixo das ordenadas é marcado o valor médio (em azul) encontrado, para o Déficit Total do Sistema, na iteração para todas as variáveis testadas (população) e o melhor valor encontrado em cada iteração (em preto). Na abscissa é informado o número da iteração. Assim sendo é possível verificar a situação de convergência e o desempenho do AG. Por meio desses gráficos também é possível verificar a sensibilidade do AG ao problema.

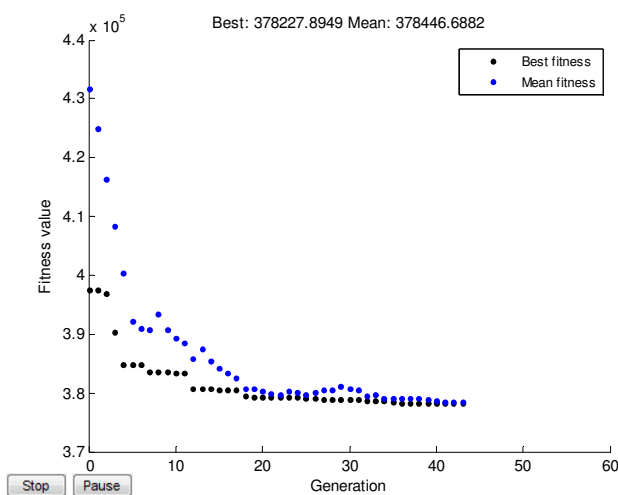


Figura 2 - Monitoramento do procedimento da otimização no Cenário 1.

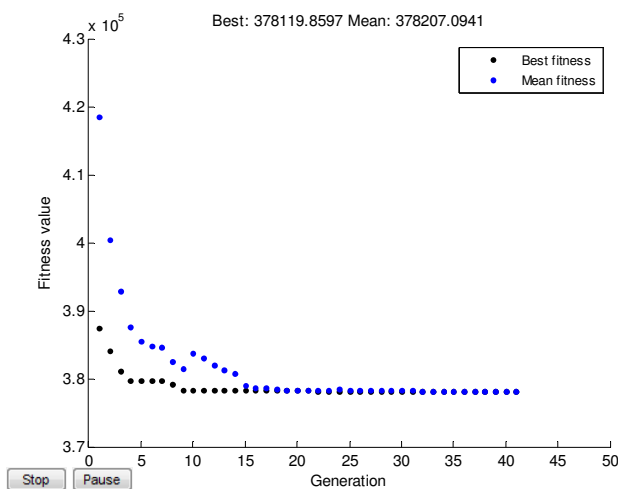


Figura 3 - Monitoramento do procedimento da otimização no Cenário 2.

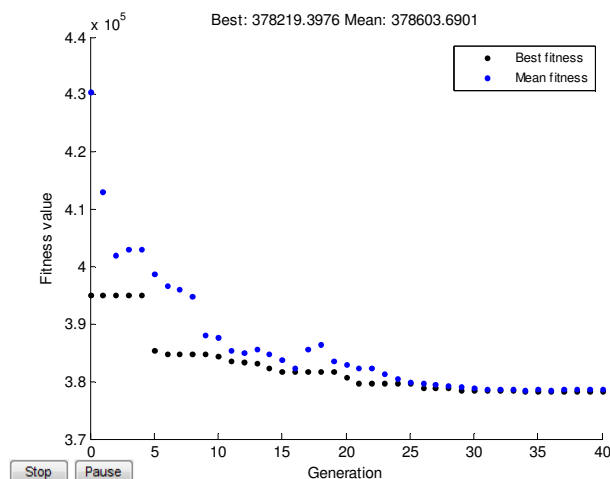


Figura 4 - Monitoramento do procedimento da otimização no Cenário 2.

Assim, sendo podemos observar uma melhora de até 13,65% no cenário 2, que não difere muito dos outros cenários propostos já que também atingiram resultados semelhantes para as regras de controle. Dentre os valores ótimos encontrados, pode-se observar que todos tenderam a um, isso pode dar a falsa impressão de erro no modelo. Na verdade o que se tem é uma situação onde as demandas e volumes disponíveis foram compatibilizados, mesmo criando situações de escassez, de forma que a melhor situação encontrada pelo AG é aquela em que as demandas sempre são abastecidas conforme as possibilidades existentes. Entretanto, não haveria a mesma resposta se fossem consideradas regras variáveis no tempo ou uma sequência de reservatórios.

Outra observação é que apesar de uma população entre 20 e 40, a convergência dos resultados se deu na mesma faixa de iterações e tempo (cerca de vinte minutos em um processador Core2duo 1.83 GHz com 2 gigabytes de memória RAM), salientando que o AG teve resposta consideravelmente rápida neste caso.

6. CONCLUSÕES

Conclui-se que os Algoritmos Genéticos com sistema de simulação incluso promoveram regras eficientes ao sistema com redução significativa do déficit. Essa aplicabilidade é potencializada pelo fato desta técnica ser flexível a diferentes tipos de funções objetivas, podendo uma mesma rotina ser aplicada a diversos modelos para simulação. Além disso, o fato de absorver simuladores como funções objetivas facilita a virtualização de sistemas existentes. Porém, ainda é uma tarefa complexa a criação de modelos de simulação sistemas de reservatórios conforme os aspectos que se deseja analisar e os parâmetros a serem incluídos no modelo.

O AG em conjunto com a simulação foi eficaz conforme o problema proposto, diminuindo o déficit do sistema em até 13,65% para todo o período simulado, mesmo com uso de regras constantes em um período de tempo grande onde a demanda aplicada cresce se comporta como uma curva logística. Por tanto se recomenda continuidade no estudo da aplicação do AG na criação de ferramentas de auxílio na gestão de sistemas de reservatórios. Ainda, é possível que seu uso resulte em soluções mais eficientes ao se avaliar um sistema com inclusão de prioridades, que levaria a uma otimização multi-objetivo. Outro aspecto a ser verificado futuramente diz respeito à aplicação de regras que variem ao longo do tempo, de forma que o número de cálculos computacionais será mais elevado, mas o sistema será mais realista e sensível as oscilações da disponibilidade hídrica e das demandas.

Por tanto são necessárias simulações mais complexas da aplicação do AG de forma a verificar sua aplicabilidade em modelos que se aproximem mais das condições reais, pois apesar de se mostrar um ferramenta bem flexível e com resultados visíveis, é necessário apreciar sua real sensibilidade em casos mais complexos e realistas e também o custo computacional de seu uso.

Finalmente, é importante considerar que apesar do aumento da aplicabilidade de sistemas computacionais de apoio, ainda mostra-se indispensável ao planejamento e gestão de recursos hídricos a experiência dos gestores e seu entendimento do sistema e ferramentas aplicadas de forma que possam avaliar os resultados e traduzi-los em aplicações reais sobre o sistema.

BIBLIOGRAFIA

ANA. *Hidroweb: Séries Históricas*. Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em junho de 2006.

AZEVEDO, L. G. T., PORTO, R. L. e ZAHED, K. F.º. “*Modelos de Simulação e de Rede de Fluxo*. In: PORTO, R. L. et al., *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*”. 1a ed. Porto Alegre: ABRH-EUFRGS, 1997. p. 165-237.

BARBOSA, P. S. F., “*Modelos de Programação Linear em Recursos Hídricos*”. In: PORTO, R. L. et al., “*Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos*”. 1a ed. Porto Alegre: ABRH-EUFRGS, 1997. p. 97-163.

BELLMAN, R. “*Dynamic Programming Princeton University Press*”, Princeton, N.J., 1957.

ELETROBRÁS. “*Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro*”, versão 4.0. Banco de Dados. Rio de Janeiro, 2004, 1 CD-ROM.

FORMIGA, K. T. M. “*Otimização Multiobjetivo de Projetos de Rede de Distribuição de Água*”. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005. 276 p.

- GILES, J., e WUNDERLICH, W. “*Weekly multipurpose planning model for TVA reservoir system*”. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 107, n. 2, p.495-511. 1981.
- LABADIE, J. W. “*Reservoir System Optimization Models. In: Decision Support Systems Applied to Water Resources Engineering*”. São Paulo, 1998.
- LOUCKS, D. P. e Van BEEK, E. “*Water Resources System Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications*”. UNESCO, 2005. 680 p. Operação, 2001.
- PORTO, R. L. et al., “*Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos*”. 1a ed. Porto Alegre: ABRH-EUFRGS, 1997. 419 p.
- PORTO, R. L. e ROBERTO, A. N. – “*ModSimP32 – Modelo de Simulação de Bacias Hidrográficas, Manual de Modelos de Rede de Fluxo para Alocação da Água entre Múltiplos Usos em uma Bacia Hidrográfica*”. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 105 p. São Paulo, 2002.
- SHARIF, M. e WARDLAW, R. “*Multireservoir Systems Optimization Using Genetic Algorithms: Case Study*”. Journal of Computing in Civil Engineering, n.14, p. 255-263, 2000.
- SHIM, S. B., KOH, D. K., SHIM, K. D., LABADIE, J., and LEE, H. S. “*Development of optimal joint operation policies for a multi-reservoir system in the Han River Basin, Korea*”. Hydroinformatics 94, Verwey et al., ed Balkema, Rotterdam, Holanda. 1994.
- THE MATHWORKS. “*Genetic Algorithms and Simulink: Toolboxes Users Guide*”. Natick, MA. 2008.
- TUCCI, C. E. M. et al. “*Hidrologia: Ciência e Aplicação*”. 3a ed. Porto Alegre: ABRH-EUFRGS, 2004. 943 p.
- WARDLAW, R. e SHARIF, M. “*Evaluation of Genetic Algorithms for Optimal Reservoir System Operation*”. Journal Water Resources Planning and Management, Janeiro/Fevereiro, v 125, n. 1, p. 25-33. 1999.
- YAKOWITZ, S. “*Dynamic Programming Applications in Water Resources*”. Water Resources Research, v. 18, n. 3, p. 673-696. 1982.
- YEH, W. W-G., “*Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review*”. Water Resources Research, v.21, n.12, p.1797-1818, 1985.
- YEH, W. e TROTT, W. “*Optimization of water resources development: Optimization of capacity specification for components of regional, complex, integrated, multi-purpose water resources systems*”. Engineering Rep, n. 7245, Univ. of California, Los Angeles. 1972.