

**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Ciências e Tecnologia**

**Departamento de Engenharia Civil**



## **HIDRO - Sistema de apoio à decisão para operação de reservatórios**

Relatório de Estágio Supervisionado, sendo supervisionado e orientado pelo Prof. Carlos de Oliveira Galvão, semestre 2002.2.

Aluna: Klécia Forte de Oliveira

Matrícula 2981.1114

Campina Grande, Abril de 2003.

**Universidade Federal de Campina Grande**  
**Centro de Ciências e Tecnologia**  
**Departamento de Engenharia Civil**

**HIDRO - Sistema de apoio à decisão  
para operação de reservatórios**

*Klécia Forte de Oliveira*

---

Klécia Forte de Oliveira – Aluna

*Carlos Galvão*

---

Carlos de Oliveira Galvão - Orientador

Campina Grande, Abril de 2003.



Biblioteca Setorial do CDSA. Junho de 2021.

Sumé - PB

## ÍNDICE

	Pág.
1.0 Introdução.....	4
2.0 Descrição do sistema pré-existente.....	5
2.1 Planilha Apresentação.....	5
2.2 Planilha Curva C-A-V.....	7
2.3 Planilha Demanda, Afluência e Evaporação (Dem, Afl, Evp) .....	7
2.4 Planilha Coeficiente de Afluência e de Demanda (Coef Afl e Dem) .....	7
2.5 Planilha Previsão.....	8
2.6 Planilha Alerta.....	9
3.0 Materiais e Métodos.....	10
4.0 Resultados.....	12
5.0 Bibliografia.....	16
6.0 Anexos	
6.1 Exemplo de uso do sistema HIDRO.....	17
6.2 Descrição detalhada do processo de cálculo das planilhas.....	22

## 1.0 Introdução

No semi-árido brasileiro grande parte das cidades tem seu abastecimento urbano de água dependente de mananciais de superfície, que são alimentados durante o período de chuvas anuais. Como a região é acometida por constantes períodos de estiagem, estes sistemas de abastecimento sofrem com freqüentes racionamentos. Este quadro de instabilidade na garantia de recursos hídricos é gerado pela grande variabilidade climática, por deficiências no gerenciamento destes recursos e pelos impactos ambientais causados pela ocupação humana.

Este trabalho apresenta um sistema computacional para apoio à operação de reservatórios de abastecimento de água, um recurso tecnológico para o gerenciamento. Foi desenvolvido em planilha eletrônica e simula o balanço hídrico de um reservatório, de modo a auxiliar na tomada de decisões sobre sua operação. O modelo de decisão se fundamenta na política de zoneamento múltiplo de níveis, em que várias zonas de armazenamento são definidas e a cada uma corresponde um critério de liberação de água para consumo. O reservatório tem seus volumes armazenados alocados em faixas horizontais imaginárias, uma das quais é delimitada superiormente pelo nível de alerta, abaixo do qual são impostas restrições ao uso da água com o objetivo de aumentar o alcance temporal do abastecimento. A política permite definir uma escala de prioridades de armazenamento para cada zona estabelecida.

O sistema computacional tratado, batizado de HIDRO, apresentado sob a forma de planilha *Excel*, simula computacionalmente o balanço hídrico do reservatório, de modo a auxiliar na tomada de decisões sobre sua operação.

No processo de operação de reservatórios há que se distinguir duas fases: o planejamento das ações e o gerenciamento dos recursos em tempo real.

Este trabalho se insere no contexto da pesquisa *Transferência de previsões climáticas de Modelos de Circulação Global Atmosférica para a escala de bacia hidrográfica*, pois objetiva remodelar (aperfeiçoar) o sistema computacional citado, aperfeiçoando a interação com o usuário e os processos de cálculo adotados para a partir disso serem usados os resultados da pesquisa, que visam relacionar variáveis de larga escala simuladas pelos Modelos de Circulação Global (MCG) à precipitação, a volumes armazenados em açudes, a vazões em rios e a demandas de água para irrigação.

## **2.0 Descrição do sistema pré-existente**

O sistema, apresentado sob forma de planilha *Excel*, simula computacionalmente o balanço hídrico do reservatório, de modo a auxiliar na tomada de decisões sobre sua operação. O sistema é composto por seis módulos/planilhas: a) Apresentação; b) Curva C-A-V; c) Dem, Afl, Evp; d) Coef Afl e Dem; e) Previsão e f) Alerta.

O modelo de simulação apresentado se fundamenta na política de zoneamento múltiplo de níveis, em que quatro zonas de armazenamento são definidas e a cada uma corresponde um critério de liberação de água para consumo. Os reservatórios têm seus volumes armazenados alocados em faixas horizontais imaginárias, uma das quais é delimitada superiormente pelo nível de alerta. A política permite definir uma escala de prioridades de armazenamento para cada zona estabelecida. Com a definição dos níveis de alerta na planilha Alerta é realizado o planejamento para o reservatório. Estes níveis são utilizados na planilha Previsão, que caracteriza a fase de gerenciamento em tempo real do modelo.

Como variáveis de entrada no modelo, estão as quantidades hidrológicas (vazões afluentes e evaporação do lago), as demandas, os limites operacionais dos níveis do reservatório e variáveis de caracterização do sistema, como o volume mínimo a ser armazenado, a curva cota-área-volume do reservatório e o volume no início do primeiro mês de simulação. Os dados hidrológicos normalmente usados são séries históricas em intervalos mensais. Além destes, deve-se fornecer o nome do reservatório para o qual se está fazendo a simulação.

A seguir é feita uma descrição da função de cada planilha. Figuras ilustrativas de cada planilha são apresentadas em anexo.

### **2.1 Planilha Apresentação**

O módulo de apresentação contém breves informações sobre o embasamento teórico do sistema e fornece um roteiro explicativo para aplicação do modelo, além de informações sobre sua autoria e complementações. São apresentados alguns conceitos, como o de balanço hídrico, e componentes que compõem um modelo de simulação para operação de reservatórios; tem-se um roteiro para correta aplicação do HIDRO, onde cada planilha é explicitada de forma sucinta.

Como parte do roteiro, há uma indicação de cores das células da planilha de acordo com o tipo de dado que cada célula contém. Para tanto são mostrados seis diferentes tipos:

- Azul escuro, para células numeradas, indicando colunas;
- Verde, para células que devem receber dados de entrada;
- Marrom claro, para células de saída de resultados;
- Cinza, para aquelas que indicam a unidade utilizada na formatação dos dados;
- Amarelo claro, para as que contêm informações;
- Branca com fonte vermelha, para aquelas que contêm valores que podem ser alterados em diferentes simulações.

A Figura 1 ilustra os diferentes tipos de células.

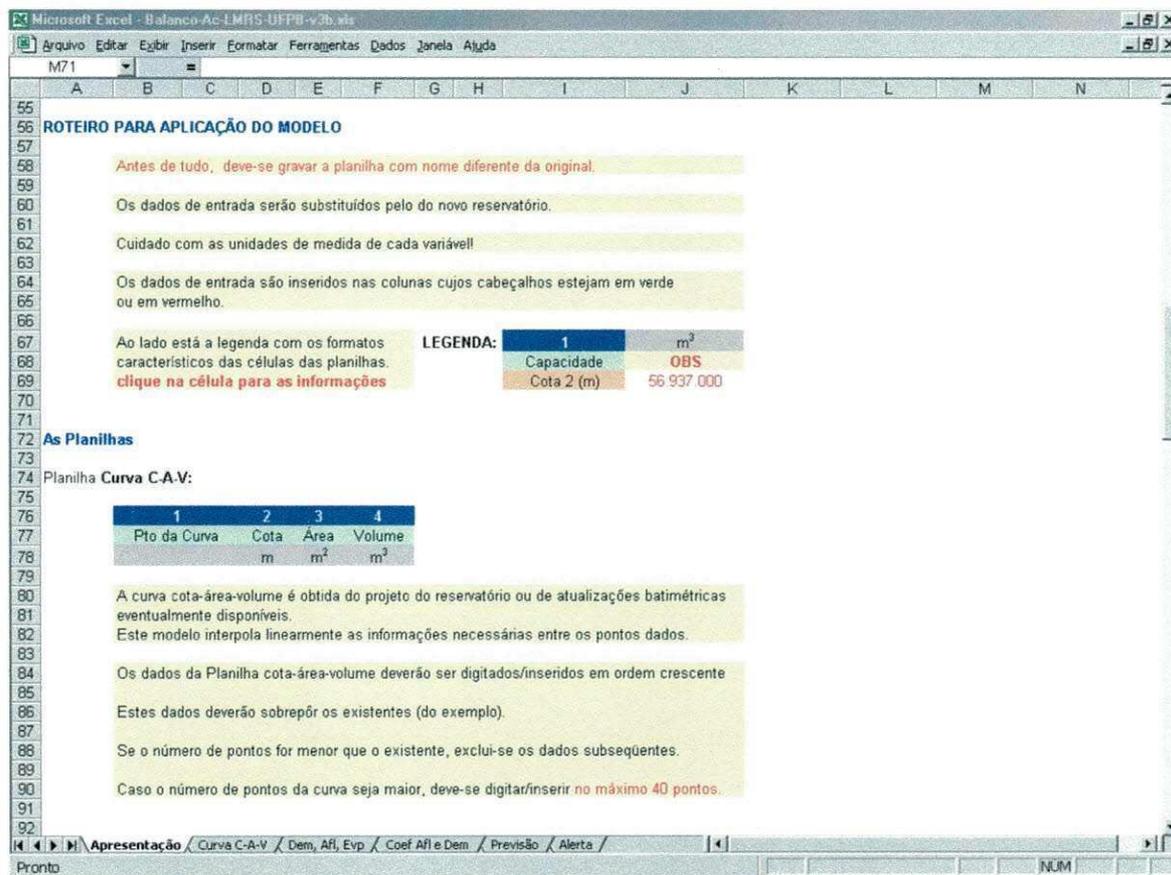


Figura 1– Planilha Apresentação – Diferenciação de células por cor.

Esta variedade de cores nas planilhas gera um desconforto visual e constante dúvida no uso do modelo.

## **2.2 Planilha Curva C-A-V**

A curva cota-área-volume é obtida do projeto do reservatório ou de atualizações batimétricas disponíveis. Diz respeito à relação entre dados de área e volume variando de acordo com a cota do reservatório e está inclusa no conjunto de dados a serem inseridos como variáveis de entrada do modelo.

## **2.3 Planilha Demanda, Afluência e Evaporação (Dem, Afl, Evp)**

Nesta planilha estão contidos os valores médios mensais referentes à demanda estimada, vazão afluente e lâmina evaporada do reservatório. Estes valores devem ser inseridos como variáveis de entrada do modelo.

Os valores relativos às vazões médias mensais afluentes ao reservatório são usados apenas na planilha Previsão, que caracteriza a fase de gerenciamento do modelo. Este esclarecimento não é feito na planilha, podendo deixar o usuário confuso em relação aos dados que são usados para obtenção dos resultados dos módulos Previsão ou Alerta.

## **2.4 Planilha Coeficiente de Afluência e de Demanda (Coef Afl e Dem)**

Nesta planilha estão apresentados os padrões de data (mês e ano) para os cálculos do modelo, além de exibir os coeficientes de afluência e de demanda usados. Estes padrões de data servem para encontrar o número de dias de cada mês, antes identificando se o ano introduzido é bissexto ou não, e por esse motivo as orientações que apresenta são de que não sejam alterados os dados de data apresentados. A Figura 2 apresenta uma ilustração da planilha.

A nomenclatura dada à planilha e os dados que esta exhibe não são bem definidos, pois os coeficientes que exhibe não são inseridos nela e sim na planilha Previsão, não tendo, portanto, função alguma a visualização dos coeficientes de afluência e de demanda nesta planilha.

Coeficientes de Afluência e de Demanda:			
Mês	Nº de dias	Coef. Afluência	Coef. Demanda
jan-00	31	1	1

Figura 2 – Planilha Coeficiente de Afluência e de Demanda.

## 2.5 Planilha Previsão

Com a planilha Previsão é feito o gerenciamento em tempo real do reservatório. A partir dos valores inseridos nas planilhas Curva C-A-V e Dem, Afl, Evp, inserindo ainda dados referentes a data do início do período analisado, volume nesta data, volume máximo do reservatório e coeficientes de afluência e de demanda, é feita uma previsão de volume armazenado mês-a-mês para o reservatório, ou melhor, é feito o balanço hídrico do reservatório a cada mês. Como resultado se obtêm a estatística para o período, com os valores de volume mínimo, evaporado e vertido, e ainda o número de falhas (quantidade de meses em que não se conseguiu atender à demanda desejada) no abastecimento nesse mesmo período.

Os coeficientes de afluência e de demanda aqui inseridos são os mesmos a serem usados na planilha Alerta, e únicos para todo o período simulado. Os níveis de alerta (NA) definidos na planilha Alerta não são usados de forma adequada na rotina de cálculo da planilha Previsão, pois estes deveriam definir coeficientes de demanda para cada NA atingido no decorrer do balanço hídrico realizado. Além disto, o usuário deveria poder inserir coeficientes de demanda baseados em seu próprio conhecimento, possibilitando variados cenários de operação do reservatório.

## 2.6 Planilha Alerta

Nesta planilha são definidos os níveis de alerta (NA) para operação do reservatório, que delimitam as zonas de atendimento à demanda de acordo com o nível apresentado. Para tanto, são usados os valores dos coeficientes de afluência e de demanda e valores inseridos nas planilhas Curva C-A-V e Dem, Afl, Evp, com a ressalva de que os valores referentes à afluência, ou vazão afluyente, são provenientes das séries históricas de vazões afluentes ao reservatório, em vez de serem valores médios mensais.

Os níveis de alerta são definidos por tentativa: primeiro, supondo-se uma fração da capacidade do reservatório (volume máximo); depois, frações dos NA's obtidos. Conforme os valores supostos para os NA's, obtém-se uma estatística do período analisado com valores de volume mínimo, escassez, volumes evaporado e vertido, além do número de falhas no abastecimento.

Para cada NA previsto é também previsto um novo coeficiente de demanda, o qual sendo menor que 1,0 (um), simula um cenário de racionamento do sistema. É fornecido um gráfico do volume acumulado e escassez do reservatório em função do período considerado, através do qual se pode ter melhor noção da distribuição das falhas de atendimento à demanda desejada. O que se faz ao definir os NA's para o reservatório é tentar otimizar o volume de água acumulado no reservatório, de forma a atender a demanda desejada com o menor número de falhas.

Para ilustrar o zoneamento do reservatório, é apresentada uma figura esquemática de um reservatório com as zonas delimitadas pelos NA's definidos, informando o volume máximo de cada zona, e coeficientes de demanda adotados para cada NA.

Nota-se um certo descompasso no sequenciamento das ações para o manuseio do modelo, já que é necessário inserir os coeficientes de afluência e de demanda na planilha Previsão (valores que são usados em todo o modelo) e para usa-la tem-se primeiramente que definir os níveis de alerta.

Em todas as planilhas do modelo há uma estrutura de links entre planilhas que gera confusão, pois estes não indicam diretamente seu destino, têm denominações como RETORNA, AJUDA, VAZÃO AFLUENTE, etc..Um exemplo deste evento se constata na planilha Alerta: há links denominados RETORNA que direcionam ao quadro de Estatísticas do Período desta mesma planilha.

### 3.0 Materiais e Métodos

Como descrito no item anterior, o sistema foi desenvolvido em planilha *Excel*, tendo sido usada a versão 2000.

O sistema HIDRO realiza o balanço hídrico do reservatório a partir de dados hidrológicos característicos deste. Como entrada para o sistema tem-se os valores correspondentes à curva Cota-Área-Volume, às demandas médias mensais estimadas, às vazões médias mensais afluentes ao reservatório e à lâmina evaporada média mensal. Além destes, outros valores são imprescindíveis à operação do modelo.

O balanço hídrico é realizado em duas etapas, uma delas simulando o planejamento das ações administrativas do sistema de abastecimento proveniente do reservatório, outra simulando o gerenciamento em tempo real desse sistema de abastecimento.

A escala temporal adotada para o balanço é a escala mensal, adequada à problemas de abastecimento urbano. Para tanto, a equação geral de balanço hídrico sofre simplificações, pois se deve fazer a ressalva de que o balanço hídrico é realizado apenas para o corpo d'água e não para a bacia hidrográfica da qual faz parte. A equação, em sua forma geral, é apresentada como sendo:

$$P - I_T - E - T - I - Q = \Delta S$$

Onde:

- P = precipitação;
- $I_T$  = interceptação;
- E = evaporação;
- T = transpiração;
- I = infiltração;
- Q = escoamento;
- $\Delta s$  = variação no armazenamento de água.

Assim, o fator interceptação é desconsiderado, pois não há meios que interceptem a precipitação sobre a superfície do reservatório. A evaporação, a transpiração e a infiltração são condensados num só parâmetro, que é a evapotranspiração. O escoamento é tido ora como saída, como sendo a retirada de água para atender a demanda de abastecimento urbano, ora como entrada, sendo a vazão afluente que provém da bacia hidrográfica. A precipitação  $P_t$  tem seu valor embutido na vazão afluente ao reservatório. Tem-se ainda que considerar o escoamento afluente ao reservatório como entrado no

sistema hídrico, além da precipitação. A equação do balanço hídrico para o reservatório fica então resumida a:

$$S_{t+1} = S_t + (P_t + Q_t) - E_t - R_t$$

Onde:

- $t$  é o intervalo de simulação atual e  $t+1$  é o próximo intervalo de simulação;
- $S_t$  é o volume armazenado no reservatório;
- $P_t$  é o volume de água precipitado sobre o lago do reservatório;
- $Q_t$  é a vazão afluente ao reservatório;
- $E_t$  é o volume de água perdido por evaporação, transpiração e infiltração do reservatório; e
- $R_t$  é o volume retirado do reservatório para consumo.

A evapotranspiração é considerada em dois momentos para o balanço hídrico mensal. É decrescido metade de seu valor no início do balanço e metade no final deste. Isto acontece para minimizar os erros na sua retirada, que se daria de forma contínua durante o período mensal.

Os dados referentes à retirada de água ( $R_t$ ) para atender a demanda gerada pelo abastecimento urbano são provenientes das companhias que administram essa distribuição. Para os demais valores, estes podem ser obtidos em institutos de climatologia, como o Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto da Paraíba – LMRS-PB.

Para a fase de planejamento das ações, a vazão afluente é representada pela série histórica de vazões afluentes ao reservatório. Já para a fase de gerenciamento, as vazões afluentes são tomadas como as vazões médias mensais afluentes ao reservatório.

Como o intuito do modelo HIDRO é realizar o balanço hídrico possibilitando ao operador otimizar o uso dos recursos hídricos, tanto na planilha Alerta como na planilha Previsão o operador pode inserir coeficientes que regulem a vazão afluente, simulando períodos úmidos ou secos, ou a demanda, simulando racionamentos no abastecimento ou fornecimentos normais.

## 4.0 Resultados

Como forma de melhorar a estética do modelo, foram tomadas como cores padrões o cinza e o azul (índigo), sendo suspenso o uso de diferenciação do tipo de célula por cor (que eram em número de seis). Para evitar que o usuário possa se confundir com o uso do sistema HIDRO, já na planilha Apresentação é destacada a função de cada planilha, podendo ser **de dados de entrada**, **de dados de saída** ou **de base para cálculos**.

A planilha **Apresentação** se apresenta no sistema como mostrado abaixo na Figura 3.

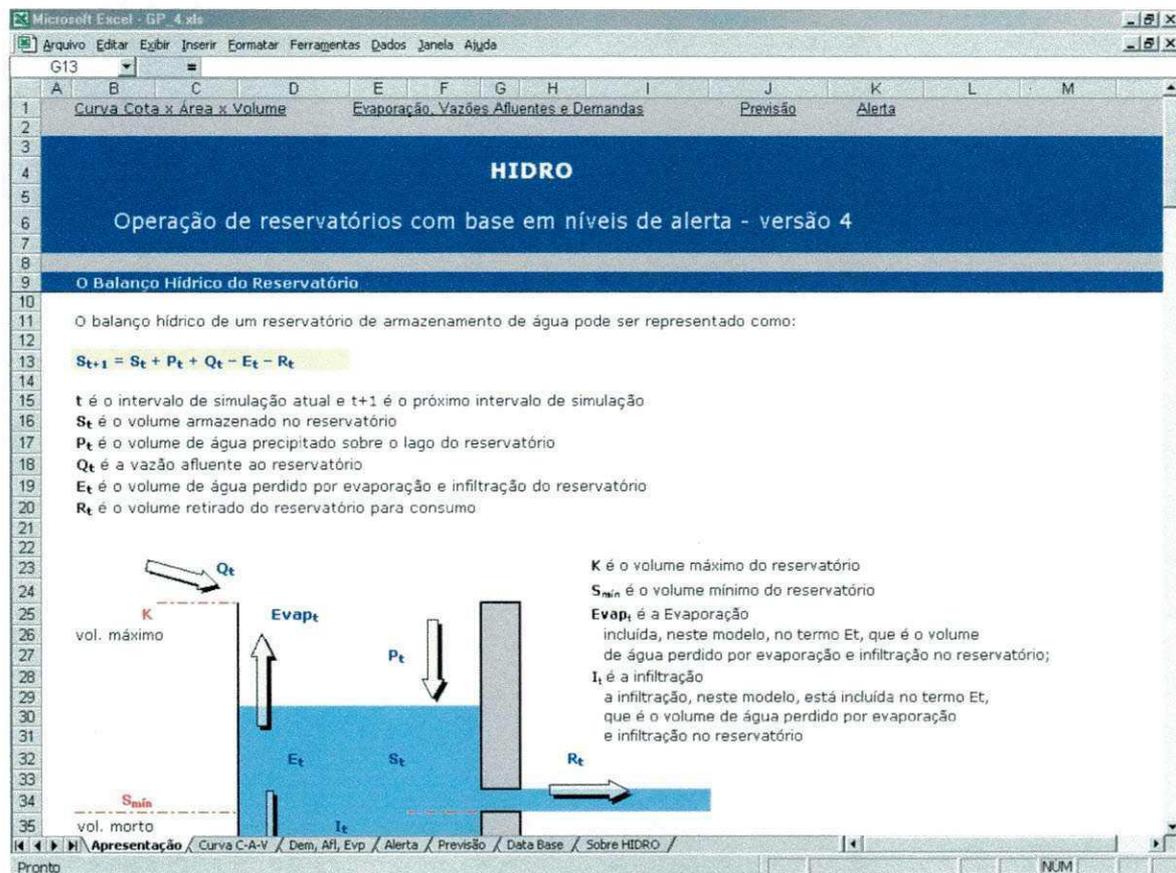


Figura 3 – Planilha **Apresentação** de HIDRO.

As planilhas caracterizadas como sendo de dados de saída não são compostas apenas por resultados; há nelas células em que se necessita inserir valores. Para estes casos, convencionou-se apenas o uso de fonte vermelha em células cujo conteúdo possa ser alterado ou modificado na ocasião de uma nova simulação. Isto pode ser observado nas planilhas Alerta e Previsão, em que há colunas para inserção de dados, ou apenas células. A Figura 4 ilustra a entrada de dados em ambas as planilhas.

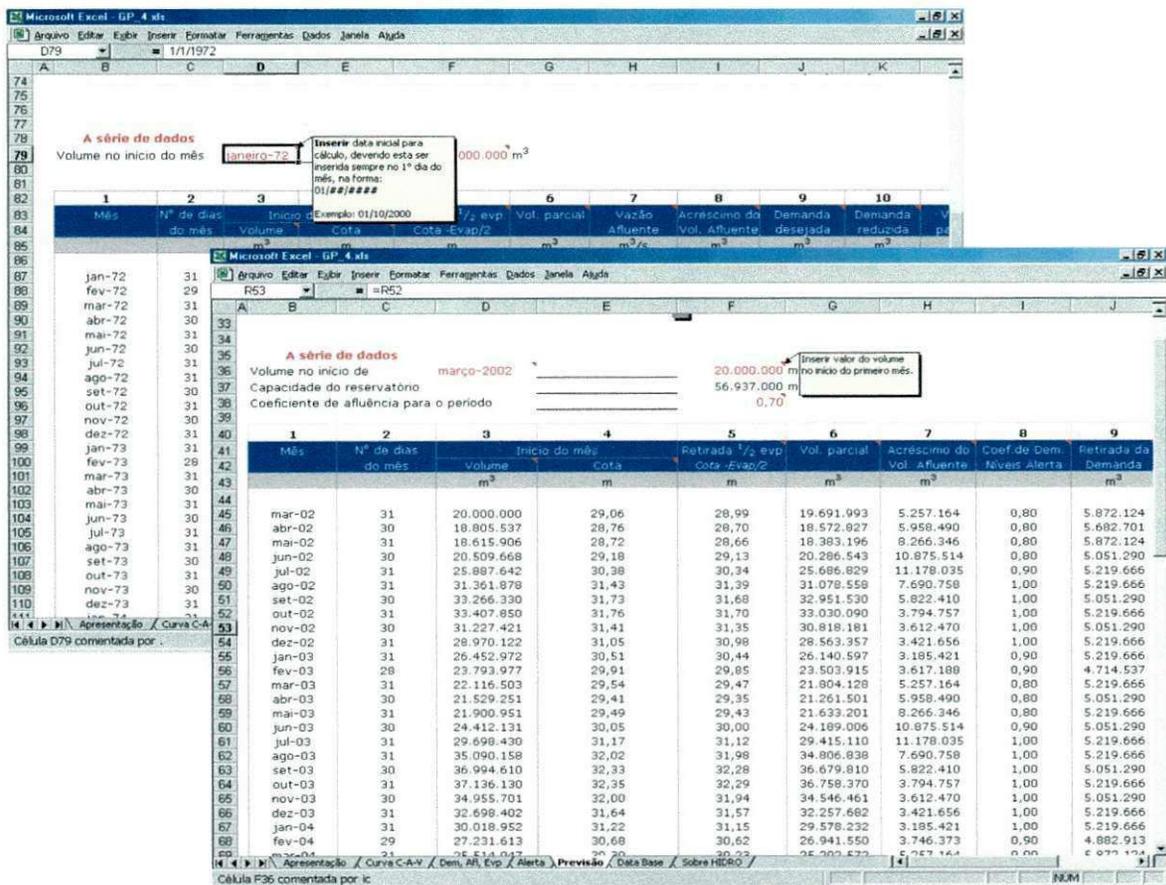


Figura 4 – Entrada de dados nas planilhas Alerta e Previsão.

Em casos de observações importantes, convencionou-se também o uso de fonte vermelha na célula, como ilustra a Figura 4 na célula **A série de dados**.

O sistema de links no modelo foi simplificado, constando em cada planilha links que direcionam para as demais planilhas, denominados pelos nomes de cada planilha a qual direciona. O esquema de links no modelo é apresentado a seguir na Figura 5.

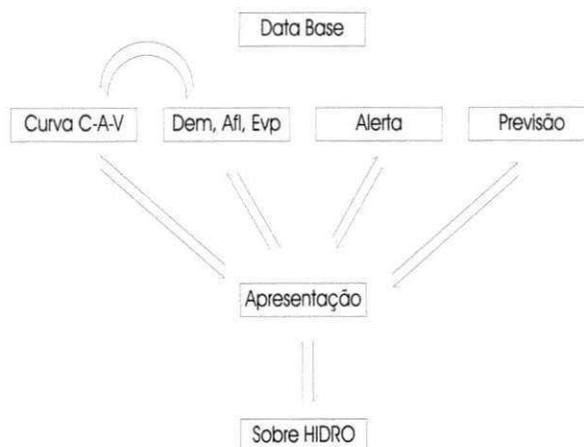


Figura 5 – Esquema de links do modelo.

Na planilha Curva C-A-V, foi introduzido um gráfico que gera automaticamente a curva cota-área-volume, permitindo ao usuário do sistema uma rápida inferência sobre o comportamento do reservatório.

A planilha Coef Afl e Dem, aparentemente sem função definida, foi denominada Data Base. Esta passou a conter apenas os dados referentes à base de data para cálculo. Como este valor não deve ser mudado, há um aviso para que o usuário não o faça. A Figura 6 apresenta a planilha Data Base.

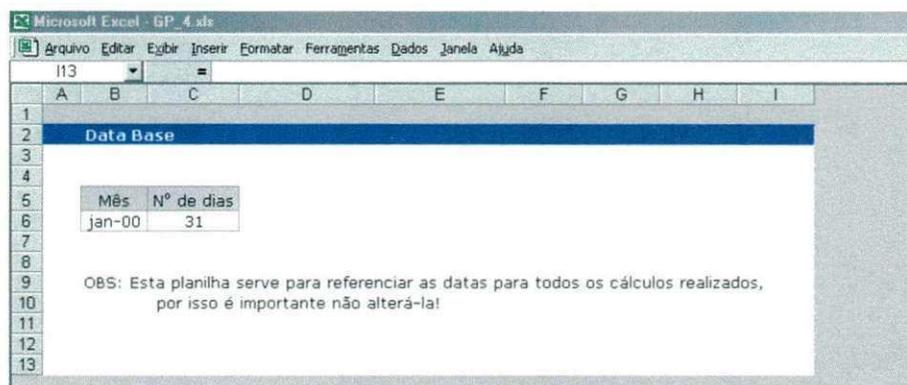


Figura 6 – Planilha Data Base.

Nas planilhas Alerta e Previsão procurou-se enfatizar seus resultados colocando gráficos e tabelas de Estatísticas do Período em primeiro plano; a coluna 1, que continha apenas a Capacidade do reservatório foi excluída e seu conteúdo, que era inserido em ambas as planilhas, provém diretamente da planilha Curva C-A-V, como sendo o volume máximo do reservatório.

Na planilha Alerta, os níveis de alerta NA2 e NA3, que eram definidos como frações do NA1, passaram a ser definidos do mesmo modo que o NA1, como frações do volume máximo do reservatório. No gráfico de Volume Acumulado e Escassez do Período, as faixas horizontais representando os níveis de alerta foram suprimidas, pois neste momento interessa inferir os volumes mínimos do gráfico para poder defini-los. Foram retiradas ainda as colunas Demanda Atendida/Demanda Desejada e Volume Vertido. A permanência da primeira gerava redundância, pois representa tão somente o coeficiente de demanda; a segunda, usada para calcular o Volume Extravasado, foi embutida neste cálculo.

Na planilha Previsão, o usuário pode inserir coeficientes de demanda, mês a mês, baseados em seu conhecimento. Caso estes não sejam inseridos, os coeficientes de

demanda são tomados de acordo com o nível do reservatório, otimizando o uso dos níveis de alerta definidos em Alerta, o que confere interatividade entre as planilhas. As colunas 17 (Nível de Alerta 1), 18 (Nível de Alerta 2) e 19 (Nível de Alerta 3), sem função evidente, são usadas para gerar no gráfico de Volume Armazenado as faixas referentes aos níveis de alerta. A coluna Volume Vertido, antes presente, foi retirada pelo mesmo motivo que na planilha Alerta.

Como forma de encadear o processo de inserção de dados e obtenção dos resultados, uma nova ordem foi dada às planilhas que compõem o HIDRO, ficando como segue: 1) Apresentação, 2) Curva C-A-V, 3) Dem, Afl, Evp, 4) Alerta, 5) Previsão, 6) Data Base e 7) Sobre HIDRO. O usuário segue a seqüência adotada nas planilhas ao operar o sistema e com isso o número de dúvidas gerado é menor.

## **6.0 Bibliografia**

GALVÃO, C. de O.; PORTO, R. L.; AZEVEDO, L. G.; LANNA, E. – Especialização em Instrumentos Técnicos, Jurídicos e Institucionais de Suporte ao Gerenciamento dos Recursos Hídricos – UFBA, 2000. 54p.

TUCCI, C. E. M – Hidrologia: ciência e aplicação – Porto Alegre: Ed.da Universidade : ABRH : EDUSP, 1993. 943 p.

SEMARH - Volume do Açude Gramame-Mamuaba - <http://www.lmrs-semarh.ufpb.br/hidrico/gramame.html>.

## **6.0 Anexos**

### **6.1 Exemplo de uso do sistema HIDRO**

No processo de operação de reservatórios, como citado antes, há que se distinguir duas fases: o planejamento das ações e o gerenciamento dos recursos em tempo real. Como forma de ilustrar o uso do sistema HIDRO, é desenvolvido a seguir um exemplo de sua aplicação, tomando-se como estudo de caso o sistema Gramame-Mamuaba, que abastece a região metropolitana de João Pessoa, com capacidade máxima de acumulação de 56.937.000 m<sup>3</sup>.

#### **Fase de planejamento – Planilha Alerta**

Com base em séries históricas de dados, simulando vários cenários de afluência e demanda, por processo de tentativa e erro, pode-se definir níveis críticos de operação para o reservatório, que servirão para indicar o momento correto na tomada de decisões. Por exemplo, a partir de qual nível é aconselhável iniciar um racionamento; e qual percentual da demanda será atendido.

A simulação de períodos normais, chuvosos ou de estiagem é feita com a definição do coeficiente de afluência, que traduz a afluência de vazões ao reservatório, dependendo se seu valor é igual a 1,0, maior que 1,0 ou menor que 1,0, respectivamente. Para a planilha Alerta, este coeficiente é tomado sempre igual a 1,0.

O coeficiente de demanda traduz a demanda de vazões do reservatório e, do mesmo modo que o coeficiente de afluência, simula períodos em que toda a demanda é atendida, períodos em que se tem uma demanda maior ou períodos nos quais se tem racionamento no abastecimento, dependendo se seu valor é igual a 1,0, maior que 1,0 ou menor que 1,0, respectivamente.

Dados obtidos por internet, no endereço eletrônico do Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto da Paraíba – LMRS-PB, mostram que o volume atual (29 de novembro de 2002) para o reservatório é de 51.701.100 m<sup>3</sup>.

Várias simulações foram feitas considerando diferentes níveis de alerta até o estabelecimento da estratégia ótima que menos impactasse a população, observando a

garantia de não-ocorrência de colapso. Primeiramente, pode-se definir os níveis de alerta a serem adotados por observação dos pontos mínimos do gráfico da Figura 7 a seguir.



Figura 7 – Gráfico do Volume acumulado e da Escassez no reservatório durante o período.

Partindo da premissa de que o racionamento seria apresentado à população de forma gradativa, começando com medidas de educação e conscientização, determinou-se que ao atingir um volume de 53% da capacidade do reservatório seria dado início a uma política de racionamento de 5% da demanda desejada, de maneira a alertar a população da necessidade de se economizar água para evitar períodos mais severos. Para o segundo nível de alerta, a 35% do volume máximo do reservatório, seria prevista uma política mais restritiva, com racionamento de 20%, a fim de manter um atendimento sem risco de colapso no abastecimento. O terceiro nível foi obtido observando-se o volume mínimo no período que equivale a aproximadamente 20% da capacidade do reservatório. Tendo o reservatório atingido este nível, a situação é de extrema emergência, pois o risco de colapso é evidente. Uma política de racionamento que atendesse a apenas 70% da demanda desejada seria prevista, como forma de prolongar o tempo de atendimento do abastecimento, retardando o colapso do sistema. Estas estatísticas obtidas para o período podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estatística do período.

Níveis de Alerta	% da Capacidade	Volume(m <sup>3</sup> )	Coef. de demanda
NA1	53,0%	30.176.610	0,95
NA2	35,0%	19.927.950	0,80
NA3	20,0%	11.387.400	0,70
Volume morto	-	1.000.000	0,00
Estatística do Período			OBS
Mínimo	11.321.576	19,9%	43 falhas em 180 meses, ou 24% dos meses
Escassez	30.739.202	54,0%	
Evaporado	144.353.546	253,5%	
Vertido	297.114.115	521,8%	

Partindo agora para outra estratégia de definição dos níveis de alerta, a partir do critério de minimização de falhas no atendimento à demanda, novamente, uma série de tentativas é feita para determinar os níveis críticos mais adequados. Observe a estatística obtida para o período apresentada na Tabela 2, seguido pelo gráfico de Volume Acumulado e Escassez, na Figura 8.

Tabela 2 – Estatística do período.

Níveis de Alerta	% da Capacidade	Volume(m <sup>3</sup> )	Coef. de demanda
NA1	50,0%	28.468.500	0,90
NA2	40,0%	22.774.800	0,80
NA3	20,0%	11.387.400	0,70
Volume morto	-	1.000.000	0,00
Estatística do Período			OBS
Volume	Valor(m <sup>3</sup> )	Valor/Capacidade	36 falhas em 180 meses, ou 20% dos meses
Mínimo	13.407.692	23,5%	
Escassez	35.843.109	63,0%	
Evaporado	145.385.912	255,3%	
000000Vertido	301.185.656	529,0%	



Figura 8 – Gráfico do Volume acumulado e da Escassez no reservatório durante o período.

Observe que o racionamento foi acionado somente após o reservatório atingir 50% de seu volume máximo, prolongando ao máximo o início de um racionamento no abastecimento de água. Entretanto, o impacto provocado na população com uma política de racionamento mais brusca e pesada, iniciando com corte de 10% da demanda desejada, pode provocar má aceitação da política de racionamento.

### Fase de gerenciamento – Planilha Previsão

Nesta fase se dá o gerenciamento propriamente dito, a avaliação em tempo real das condições de operação do reservatório e sua administração com base nos níveis críticos de operação obtidos na planilha Alerta.

Tomando o volume atual do reservatório e simulando cenários de afluência (períodos secos e períodos chuvosos) para uma política de racionamento constante, pode-se prever o comportamento do reservatório e decidir quais medidas tomar para otimizar o uso de seus recursos. Pode-se, em vez disso, tomar uma afluência constante e prever vários cenários de racionamento, e dentre estes cenários propostos, escolher aquele que mais se adequa a situação de abastecimento em questão.

Assim, introduzindo o valor do volume inicial, igual a  $51.701.100 \text{ m}^3$ , com base nos dados mensais históricos de vazão afluente ao reservatório, tomando um coeficiente de afluência igual a 0,80, tem-se um comportamento do reservatório como descrito pelo

gráfico do *Volume acumulado no reservatório durante o período*, exibido a seguir na Figura 9.



Figura 9 – Gráfico do Volume acumulado no reservatório durante o período, observando os níveis de alerta, definidos na planilha Alerta para o reservatório.

Note que o reservatório não chega a atingir o nível de alerta 1 (NA1) para a condição de afluência imposta. Caso esta afluência fosse de 0,70, caracterizando um período seco, uma política de racionamento teria de ser acionada nos últimos seis meses do período, como mostra a Figura 10 abaixo.

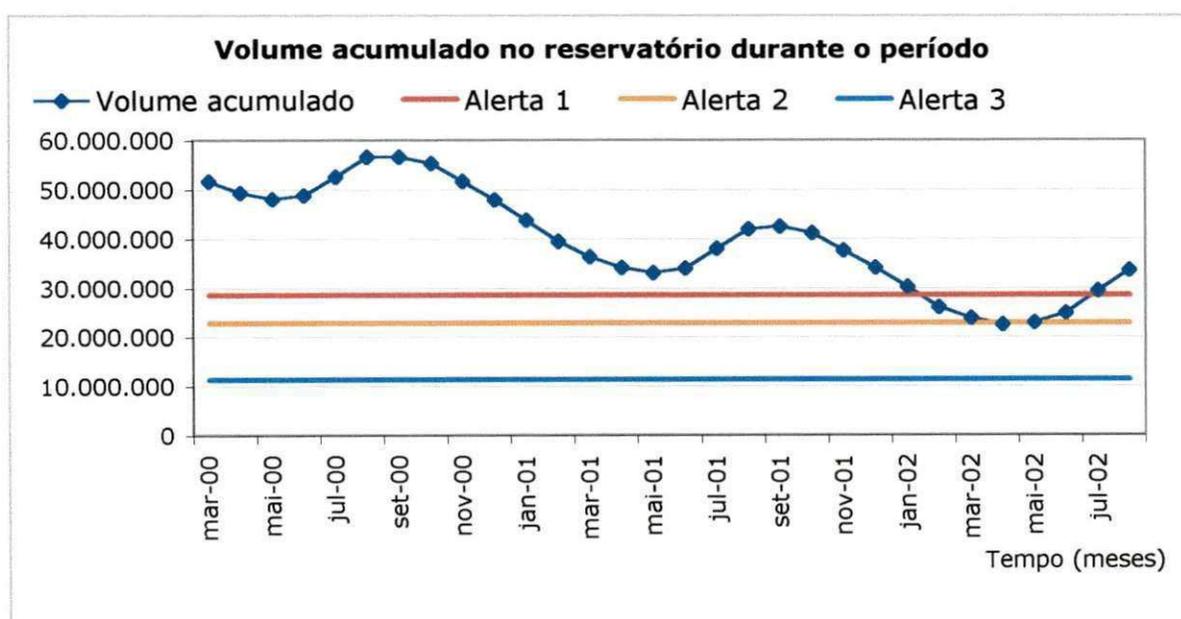


Figura 10 – Gráfico do Volume acumulado no reservatório durante o período, observando os níveis de alerta, definidos na planilha Alerta para o reservatório.

## 6.2 Descrição detalhada do processo de cálculo das planilhas

Um exemplo de aplicação do sistema é apresentado, pormenorizando o processo de cálculo das planilhas Alerta e Previsão, simulando o comportamento do reservatório Gramame-Mamuaba.

Para tanto foram inseridas as seguintes quantidades: a *capacidade* do reservatório é de 56.937.000 m<sup>3</sup>; o *volume no início do 1º mês*, igual a 20.000.000 m<sup>3</sup>; os valores relativos à *Curva Cota-Área-Volume* são apresentados na Tabela 6 a seguir; os valores médios mensais históricos da vazão demandada, da vazão afluente e da evaporação do reservatório, inseridos na planilha Dem, Afl, Evp, são exibidos na Tabela 7.

Tabela 6 – Dados referentes à **Curva Cota-Área-Volume**.

Ponto da Curva	Cota M	Área m <sup>2</sup>	Volume m <sup>3</sup>
01	17,00	0	0
02	19,00	208098	95.000
03	21,00	667620	722.000
04	23,00	1160629	2.537.000
05	25,00	2154869	6.122.000
06	27,00	3146352	11.964.000
07	29,00	4288668	19.721.000
08	31,00	5574353	28.646.000
09	33,00	6997439	41.238.000
10	35,00	8552990	56.937.000

Tabela 7 - Valores médios mensais históricos da vazão demandada (Q<sub>DEM</sub>), da vazão afluente (Q<sub>AFL</sub>) e da evaporação (Evap) do reservatório.

Mês		Q <sub>DEM</sub> M <sup>3</sup> /s	Q <sub>AFL</sub> m <sup>3</sup> /s	Evap m
Jan	1	2,436	1,699	0,140
Fev	2	2,436	2,136	0,130
mar	3	2,436	2,804	0,140
Abr	4	2,436	3,284	0,120
mai	5	2,436	4,409	0,120
Jun	6	2,436	5,994	0,100
Jul	7	2,436	5,962	0,090
Ago	8	2,436	4,102	0,090
Set	9	2,436	3,209	0,100
Out	10	2,436	2,024	0,120
Nov	11	2,436	1,991	0,130
Dez	12	2,436	1,825	0,140

## A planilha Alerta

Como se sabe, da planilha Alerta obtêm-se os níveis de alerta, por método de tentativa a partir da observação do número de falhas resultantes. Para melhor entendimento do processo de cálculo, são apresentados os critérios de cálculo de cada coluna (de acordo com sua ordem na planilha).

A data inicial nesta planilha é a data referente ao início da série histórica de vazões afluentes ao reservatório, e deve obedecer a uma formatação definida (a data deve ser inserida no padrão dd/mm/aaaa, sendo sempre equivalente ao primeiro dia do mês em questão).

**Coluna 1 = Mês:** a primeira linha contém o mês da data inicial. Para os meses seguintes o mês é resultado da soma da data e mês anteriores.

**Coluna 2 = Nº de dias do mês:** fornece o número de dias do mês em questão (ou mês de cálculo). Este campo verifica se o mês da coluna anterior é fevereiro, caso seja, verifica se o ano é bissexto. Sendo o ano bissexto, o mês de fevereiro terá 29 (vinte e nove) dias, e o preenchimento dos meses seguintes é continuado. Caso o ano não seja bissexto, segue-se apenas o preenchimento dos demais meses.

**Coluna 3 = Início do mês – Volume:** volume inicial de cada mês de cálculo. Para a primeira linha de cálculo, o volume inicial é aquele fornecido, para as linhas seguintes, o volume inicial de cada mês será o volume final do mês anterior.

**Coluna 4 = Início do mês – Cota:** valor da cota (nível) do reservatório equivalente ao volume do início do mês. Este valor é obtido por interpolação linear dos dados da planilha Curva C-A-V. A fim de exemplificar os cálculos, a partir dos dados já tomados para o reservatório, e sendo a data inicial tomada 01/01/1972.

Na planilha Curva C-A-V, tem-se que:

19.721.000 m<sup>3</sup> equivale a cota 29,00m

28.646.000 m<sup>3</sup> equivale a cota 31,00m

Assim:

$$Cota = (31,00 - 29,00) \times \left( \frac{20.000.000 - 19.721.000}{28.646.000 - 19.721.000} \right) + 29,00 = 29,06m$$

**Coluna 5** = Cota Evap/2: fornece o valor do nível do reservatório após se diminuir da cota equivalente ao volume inicial o valor correspondente a metade da lâmina evaporada no mês de cálculo, obtida a partir da planilha Dem, Afl, Evp para este mesmo mês.

Observe: para o mês de janeiro (mês de cálculo do exemplo), o valor da lâmina evaporada mensal, de acordo com a planilha Dem, Afl, Evp é 0,140m. Como a cota anterior do reservatório foi 29,06m, diminuindo desta metade da lâmina média mensal evaporada, a cota do reservatório será:

$$Cota = 29,06 - \frac{0,140}{2} = 28,99m$$

**Coluna 6** = Vol. Parcial: é o valor do volume correspondente à cota obtida após a diminuição de metade da lâmina média mensal evaporada. De maneira semelhante ao procedimento adotado na coluna 5, obtém-se, a partir dos dados da planilha Curva C-A-V, por interpolação linear, o valor do volume que equivale a cota da coluna 5.

Na planilha Curva C-A-V, tem-se que:

11.964.000 m<sup>3</sup> equivale a cota 27,00m

19.721.000 m<sup>3</sup> equivale a cota 29,00m

Assim:

$$Vol = \left[ \left( \frac{28,99 - 27,00}{29,00 - 27,00} \right) \times (19.721.000 - 11.964.000) \right] + 11.964.000 = 19.691.993m^3$$

**Coluna 7** = Vazão Afluente: é o valor da vazão afluente ao reservatório, proveniente da série histórica de vazões afluentes ao reservatório. Este valor deve ser inserido diretamente pelo usuário.

**Coluna 8** = Acréscimo do Vol. Afluente: valor correspondente ao volume afluente ao reservatório, para o mês de cálculo, de acordo com a **Coluna 7**, transformando o valor dado de vazão (m<sup>3</sup>/s) para volume (m<sup>3</sup>).

Seguindo o exemplo, tem-se: para o mês de janeiro de 1972, a série de dados históricos indica que a vazão afluente ao reservatório é de 2,89 m<sup>3</sup>/s, então o volume afluente será igual a esta vazão multiplicada pelo tempo em segundo para o mês, o qual tem 31 (trinta e um) dias. Tendo cada dia 86.400s, tem-se:

$$Vol = 2,89 \times 86.400 \times 31 = 7.740.576m^3$$

**Coluna 9** = Demanda Desejada: fornece o valor a ser retirado do reservatório para atender integralmente a demanda, de acordo com o valor proveniente da planilha Dem, Afl, Evp.

**Coluna 10** = Demanda Reduzida: este valor corresponde ao valor da Demanda Desejada, multiplicado pelo coeficiente de demanda adotado. O coeficiente de demanda tomado para cálculo aqui é escolhido da seguinte maneira: caso o nível inicial seja maior que o Nível de Alerta 1 (NA1), a planilha tomará para o coeficiente de demanda o valor 1,0; caso o volume do início do mês seja menor ou igual ao NA1, e maior que o Nível de Alerta 2 (NA2), o valor tomado para o coeficiente será o que consta na planilha Alerta, equivalente ao NA1; caso o volume do início do mês seja menor ou igual ao NA2, e maior que o Nível de Alerta 3 (NA3), o valor tomado para o coeficiente será o que consta na planilha Alerta, equivalente ao NA2; caso o volume do início do mês seja menor ou igual ao NA3, e maior que o Volume Morto estipulado em Alerta para o reservatório, o valor tomado para o coeficiente será o que consta na planilha Alerta, equivalente ao NA3; caso o volume do início do mês seja menor ou igual ao Volume Morto, o coeficiente de demanda será tomado igual a zero.

**Coluna 11** = Volume Parcial 2: é o volume que tem o reservatório após o acréscimo da vazão afluente e a retirada da vazão reduzida para consumo.

**Coluna 12** = Demanda Atendida: é o valor realmente atendido, de acordo com as condições de volume do reservatório.

**Coluna 13** = Cota 2: é o valor do nível do reservatório equivalente ao *Volume parcial 2*. Como na coluna 5, a partir do volume do reservatório, e recorrendo aos dados da planilha Curva C-A-V, por interpolação linear, obtém-se o valor desejado. A seguir, tem-se continuidade com o exemplo.

Na planilha Curva C-A-V, tem-se que:

19.721.000m<sup>3</sup> equivale a cota 29,00m

28.646.000m<sup>3</sup> equivale a cota 31,00m

Tendo sido o *Volume parcial 2* igual a 22.212.903 m<sup>3</sup>, tem-se:

$$Cota = \left[ \left( \frac{22.212.903 - 19.721.000}{28.646.000 - 19.721.000} \right) \times (31,00 - 29,00) \right] + 29,00 = 29,56m$$

**Coluna 14** = Cota 2 – Evap/2: fornece o valor do nível do reservatório após se diminuir da cota equivalente ao *Volume parcial 2* o valor correspondente a metade da lâmina evaporada no mês de cálculo, obtida a partir da planilha Dem, Afl, Evp para este mesmo mês.

**Coluna 15** = Vol. final do mês: é o valor do volume correspondente à cota obtida após a diminuição da segunda metade da lâmina média mensal evaporada. Obtém-se, a partir dos dados da planilha Curva C-A-V, por interpolação linear, o valor que equivale a cota da coluna 14; igual a 29,49 m.

**Coluna 16** = Escassez: este valor corresponde à diferença entre a Demanda Desejada e a Demanda Atendida; em termos práticos, seria o valor do volume de água a ser racionado no mês de cálculo.

Como exemplo, tome o mês de cálculo como novembro/75, com vazão afluente igual a 0,81 m<sup>3</sup>/s, para o qual se teve a demanda desejada igual a 6.314.112 m<sup>3</sup> e a demanda atendida igual a 5.682.701 m<sup>3</sup>. O valor da escassez para os dados é:

$$\text{Escassez} = 6.314.112 - 5.682.701 = 631.411\text{m}^3$$

**Coluna 17** = Volume extravasado: este valor corresponde à soma dos valores do Volume Parcial, do Acréscimo do Volume Afluente, diminuído o valor da Retirada da Demanda; este valor é comparado com a Capacidade do Reservatório, caso o primeiro seja maior que o segundo, é feita a diferença entre eles e o valor obtido é dado; caso contrário, o valor tido é zero.

## **A planilha Previsão**

A partir dos dados de entrada é feita uma previsão dos volumes armazenados no reservatório ao final de cada mês de simulação, o que possibilita acompanhar o nível de armazenamento do reservatório em função de suas afluências e demandas. São então apresentados os critérios de cálculo de cada coluna (de acordo com sua ordem na planilha).

A data inicial nesta planilha foi tomada igual a 01/03/2003, obedecendo a formatação definida; o volume inicial, igual a 20.000.000 m<sup>3</sup>; o coeficiente de afluência, igual .

**Coluna 1** = Mês: este valor é dado da mesma maneira que na **Coluna 1** da planilha Alerta.

**Coluna 2** = N<sup>o</sup> de dias do mês: este valor é dado da mesma maneira que na **Coluna 2** da planilha Alerta.

**Coluna 3** = Início do mês – Volume: este valor é dado da mesma maneira que na **Coluna 3** da planilha Alerta.

**Coluna 4** = Início do mês – Cota: este valor é dado da mesma maneira que na **Coluna 4** da planilha Alerta.

**Coluna 5** = Cota Evap/2: este valor é dado da mesma maneira que na **Coluna 5** da planilha Alerta.

**Coluna 6** = Vol. Parcial: este valor é dado da mesma maneira que na **Coluna 6** da planilha Alerta.

**Coluna 7** = Acréscimo do Vol. Afluente: valor correspondente ao volume afluente ao reservatório de acordo com a planilha Dem, Afl, Evp.

Seguindo o exemplo, tem-se: para o mês de março o valor médio mensal da vazão afluente ao reservatório é de 2,804m<sup>3</sup>/s, então o volume afluente será igual a esta

vazão multiplicada pelo tempo em segundo para o mês, o qual tem 31 (trinta e um) dias. Tendo cada dia 86.400s, tem-se:

$$Vol = 2,804 \times 86.400 \times 31 = 7.510.234m^3$$

**Coluna 8** = Coeficiente de Demanda – Níveis de Alerta: é o coeficiente de demanda tomado para cálculo, proveniente da planilha Alerta. Este valor só é adotado pela planilha caso a **Coluna 16** (nesta coluna o usuário pode inserir o valor que deseja para simular a demanda) esteja em branco. A planilha primeiramente compara o nível do reservatório no início do mês com os níveis estipulados na planilha Alerta. Caso o nível inicial seja maior que o Nível de Alerta 1 (NA1), a planilha tomará para o coeficiente de demanda o valor 1,0; caso o volume do início do mês seja menor ou igual ao NA1, e maior que o Nível de Alerta 2 (NA2), o valor tomado para o coeficiente será o que consta na planilha Alerta, equivalente ao NA1; caso o volume do início do mês seja menor ou igual ao NA2, e maior que o Nível de Alerta 3 (NA3), o valor tomado para o coeficiente será o que consta na planilha Alerta, equivalente ao NA2; caso o volume do início do mês seja menor ou igual ao NA3, e maior que o Volume Morto estipulado em Alerta para o reservatório, o valor tomado para o coeficiente será o que consta na planilha Alerta, equivalente ao NA3; caso o volume do início do mês seja menor ou igual ao Volume Morto, o coeficiente de demanda será tomado igual a zero.

**Coluna 9** = Retirada da Demanda: fornece o valor a ser retirado do reservatório para atender a demanda, de acordo com o valor proveniente da planilha Dem, Afl, Evp, multiplicado pelo coeficiente de demanda adotado para os cálculos da planilha (este pode ser o valor presente na **Coluna 8** ou **Coluna 16**).

De acordo com o exemplo dado, para o mês de março, o valor médio mensal da vazão demandada é igual a 2,436m<sup>3</sup>/s. Apenas como exemplo, será adotando o coeficiente de demanda igual a 0,80. Da mesma maneira que na coluna anterior, o volume retirado do reservatório devido à demanda será de:

$$Vol = 2,436 \times 86.400 \times 31 \times 0,80 = 5.219.666m^3$$

**Coluna 10** = Volume parcial 2: é o volume que tem o reservatório após o acréscimo da vazão afluente e a retirada da vazão demandada para consumo.

No exemplo:

$$Vol = 19.691.993 + 7.510.234 - 5.219.666 = 20.677.645m^3$$

Note que o valor difere de uma unidade do que se encontra na planilha. Isto se deve a questões de arredondamento do *Excel*.

**Coluna 11** = Cota 2: este valor é dado da mesma maneira que na **Coluna 13** da planilha Alerta.

**Coluna 12** = Cota 2 – Evap/2: este valor é dado da mesma maneira que na **Coluna 14** da planilha Alerta.

**Coluna 13** = Vol. final do mês: este valor é dado da mesma maneira que na **Coluna 15** da planilha Alerta.

**Coluna 14** = Volume extravasado: este valor é dado da mesma maneira que na **Coluna 17** da planilha Alerta.

**Coluna 15** = Falha: comparando-se o volume final do mês e o NA1, caso o NA1 seja maior ou igual ao volume final, o mês é tomado como falho, o que corresponde ao valor 1,0. Caso o volume final do mês seja maior que o NA1, o mês é tido como normal, o que corresponde ao valor 0,0.

**Coluna 16** = Coeficiente de Demanda – Usuário: nesta coluna o usuário pode inserir o valor que avalie adequado. Este valor será prioritariamente tomado como coeficiente de demanda para os cálculos efetuados na planilha.

**Coluna 17** = Nível de Alerta 1: primeiro nível de alerta obtido para o reservatório na planilha Alerta; usado nesta planilha apenas para gerar o gráfico de *Volume acumulado no reservatório durante o período*.

**Coluna 18** = Nível de Alerta 2: segundo nível de alerta obtido para o reservatório na planilha Alerta; usado nesta planilha apenas para gerar o gráfico de *Volume acumulado no reservatório durante o período*.

**Coluna 19** = Nível de Alerta 3: terceiro nível de alerta obtido para o reservatório na planilha Alerta; usado nesta planilha apenas para gerar o gráfico de *Volume acumulado no reservatório durante o período*.

O gráfico *Volume acumulado no reservatório durante o período* é mostrado na **Figura 11** a seguir, para os dados do exemplo.

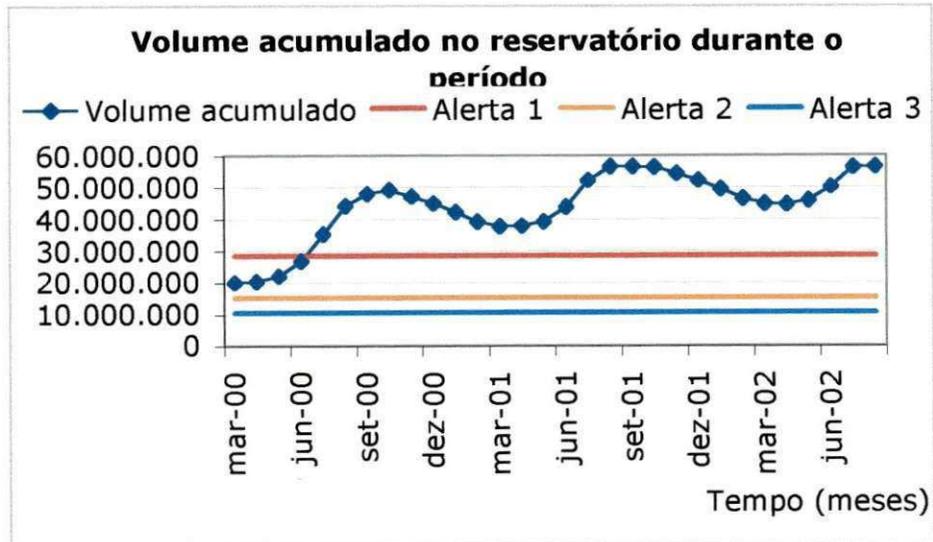


Figura 11 – Gráfico do Volume acumulado no reservatório durante o período, observando os níveis de alerta, definidos na planilha **Alerta** para o reservatório.