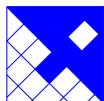




**MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL  
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA HÍDRICA**



**INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**



*FUNCATE - Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais*



**PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DE  
ÁGUAS DO RIO SÃO FRANCISCO PARA  
O NORDESTE SETENTRIONAL**

*PROJETO BÁSICO*

**TRECHO III – EIXO NORTE  
R10 – MODELO HIDRODINÂMICO E  
ESQUEMA OPERACIONAL**



**TRECHO III – EIXO NORTE  
R10 – MODELO HIDRODINÂMICO E ESQUEMA OPERACIONAL**

# **PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DE ÁGUAS DO RIO SÃO FRANCISCO PARA O NORDESTE SETENTRIONAL**

## ***PROJETO BÁSICO***

### **MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL**

Ministro de Estado da Integração Nacional: **Ciro Ferreira Gomes**

#### **Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica**

Secretário de Infra-Estrutura Hídrica: **Hypérides Pereira de Macêdo**

Coordenador Geral: **João Urbano Cagnin**

### **INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**

Diretor: **Luiz Carlos Moura Miranda**

### **FUNCATE – Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais**

Gerente: **José Armando Varão Monteiro**

Coordenador Técnico: **Antônio Carlos de Almeida Vidon**

Coordenador Técnico Adjunto: **Ricardo Antônio Abrahão**

São José dos Campos, setembro de 2003

Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais - FUNCATE

Projeto de transposição de Águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional – Projeto Básico; Trecho III – Eixo Norte – R10 – Modelo Hidrodinâmico e Esquema Operacional. - São José dos Campos: Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais – FUNCATE, 2003.

13 p

1. Transposição de Águas; Engenharia; Tecnologia Geral; Hidrodinâmica.
- I. Trecho III – Eixo Norte - R10 – Modelo Hidrodinâmico e Esquema Operacional.

CDU 556.18:62

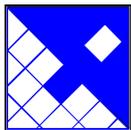
**FUNCATE:**

Av. Dr. João Guilhermino, 429, 11º Andar – Centro

São José dos Campos – SP

CEP: 12210-131

Telefone: (0XX 12) 3925 1399 Fax: (0XX 12) 3941 2829



**FUNCATE**

**Fundação de Ciência,  
Aplicações e Tecnologia  
Espaciais**

Projeto	RGV	Data
Verificação	RAA	Data
Aprovação	ACAV	Data
Aprovação	JAVM	Data
Código FUNCATE	EN.B/III.RF.HI.0004	Data



**MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL**

Verificação	Data
Aprovação	Data

**PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DE ÁGUAS  
DO RIO SÃO FRANCISCO PARA O  
NORDESTE SETENTRIONAL**

**PROJETO BÁSICO**

**TRECHO III - EIXO NORTE  
R10 - MODELO HIDRODINÂMICO E ESQUEMA OPERACIONAL**

**Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco  
para o Nordeste Setentrional**  
*Projeto Básico*

**Equipe**

*José Armando Varão Monteiro: Gerente*

*Antônio Carlos de Almeida Vidon: Coordenador Técnico*

*Ricardo Antônio Abrahão: Coordenador Técnico Adjunto*

*Geverson Luiz Machado: Chefe da Equipe de Geotecnia*  
*Clóvis Ribeiro de Moraes Leme: Engenheiro*

*Aloysio Accioly de Senna Filho: Chefe da Equipe de Geologia*

*Rafael Guedes Valença: Chefe da Equipe de Hidráulica*  
*Anibal Young Eléspuru: Engenheiro*

*José Carlos Degaspare: Chefe da Equipe de Estrutura*

*José Ricardo Junqueira do Val: Chefe da Equipe de Orçamento e Planejamento*

*Bernd Dieter Lukas: Chefe da Equipe de Engenharia Mecânica*

*Sidnei Collange: Chefe da Equipe de Engenharia Elétrica*

**Equipe de Produção**

*Antonio Carlos Cunha Aguiar – Projetista*

*Antonio Muniz Neto – Projetista*

*Leandro Eboli – Projetista*

*João Luiz Bosso – Projetista*

*Laryssa Lillian Lopes – Técnica em Geoprocessamento*

*Mônica de Lourdes Sampaio – Desenhista Projetista*

**Infra Estrutura e Apoio**

*Ana Julia Cristofani Belli – Secretária*

*Célia Regina Pandolphi Pereira – Assistente Adm. Especializada*

*Andréa Marques Moraes – Aux. Administrativo*

*Maria Aparecida de Souza – Servente*

**Consultor**

*Luiz Antonio Villaça de Garcia*



## Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

---

### APRESENTAÇÃO

O presente documento se constitui no Relatório R10 – MODELO HIDRODINÂMICO E ESQUEMA OPERACIONAL, parte integrante do **Projeto Básico do Trecho III – Eixo Norte**, referente ao PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DE ÁGUAS DO RIO SÃO FRANCISCO PARA O NORDESTE SETENTRIONAL, elaborado pela FUNCATE através do contrato INPE/FUNCATE nº 01.06.094.0/99.

O Projeto de Transposição está sendo desenvolvido com base no Convênio nº 06/97-MPO/SEPPE – celebrado entre o MINISTÉRIO DE INTEGRAÇÃO NACIONAL-MI e o MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA-MCT e seu INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE.

O **Projeto Básico do Trecho III – Eixo Norte** compõe-se dos seguintes relatórios:

- R1 Descrição do Projeto
- R2 Critérios de Projeto
- R3 Usinas Hidrelétricas
- R4 Sistema Adutor
- R5 Sistema de Drenagem
- R6 Bases Cartográficas
- R7 Geologia e Geotecnia
- R8 Estudos Hidrológicos
- R9 Sistema de Supervisão
- R10 Modelo Hidrodinâmico e Esquema Operacional
- R11 Sistema Elétrico
- R12 Canteiros e Sistema Viário
- R13 Cronograma e Orçamentos
- R14 Dossiê de Licitação
- R15 Memoriais de Cálculo
- R16 Linhas de Transmissão
- R17 Caderno de Desenhos



ÍNDICE	PG
<b>1 . OBJETO E OBJETIVO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 . INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>3 . MÉTODO NUMÉRICO UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES.....</b>	<b>2</b>
<b>3.1 Método de MacCormack – Descrição Sucinta.....</b>	<b>2</b>
<b>4 . CONDIÇÕES DE CONTORNO DOS SUB TRECHOS .....</b>	<b>4</b>
<b>5 . LEIS DE MANOBRA NORMAL DIÁRIA PARA TURBINAS .....</b>	<b>4</b>
<b>6 . SIMULAÇÕES DE OPERAÇÃO .....</b>	<b>5</b>
<b>7 . CASOS SIMULADOS.....</b>	<b>6</b>
<b>7.1 Simulação com a Lei de Manobra Normal Diária.....</b>	<b>6</b>
<b>7.2 Simulação com a Enchente Milenar (critério hidrológico).....</b>	<b>8</b>
<b>7.3 Simulação com o critério hidráulico .....</b>	<b>10</b>
<b>7.4 Simulação entre as UHEs Salgado I e Salgado II.....</b>	<b>10</b>
<b>8 . COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES .....</b>	<b>13</b>



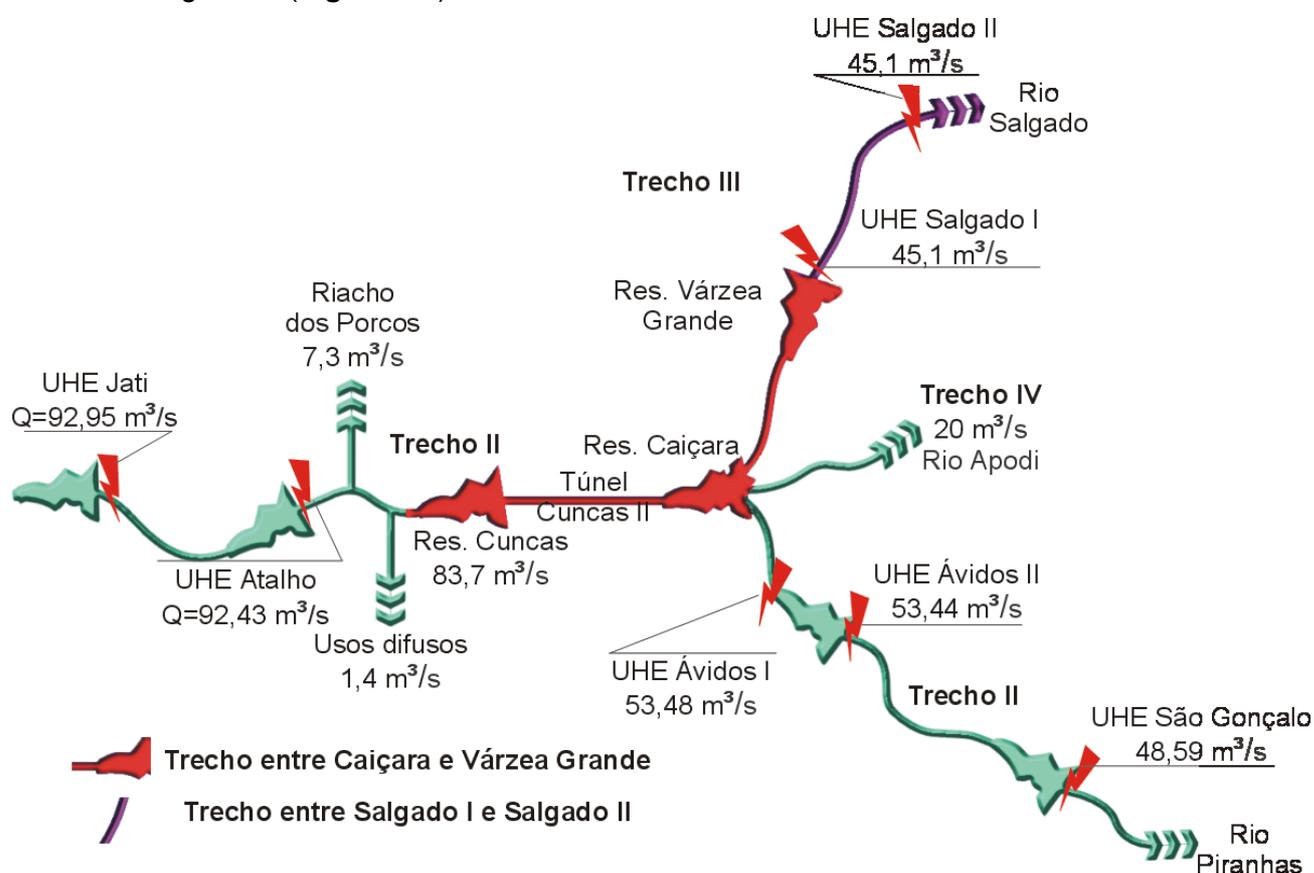
## Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

### 1 . OBJETO E OBJETIVO

O objeto deste relatório é o Projeto de Transposição do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional e o seu objetivo é a descrição geral dos transientes hidráulicos superficiais simulados para Projeto Básico do Trecho III.

### 2 . INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta os estudos hidrodinâmicos para determinar as cotas máximas das linhas d'água nos canais, aquedutos, túneis e reservatórios do Trecho III abrangendo dois sub trechos, um que se desenvolve desde o reservatório Caiçara até o reservatório Várzea Grande, que se constitui na câmara de carga da usina hidrelétrica Salgado I e, o segundo, desde o canal de fuga da UHE Salgado I até a câmara de carga da UHE Salgado II que lança as águas transpostas no rio Salgado, afluente do rio Jaguaribe (**Figura 2.1**).



**Figura 2.1 – Trecho estudado entre o reservatório Cuncas e a câmara de carga da UHE Salgado II**

Todos os dias, uma manobra normal das usinas provoca variações de vazões e alturas d'água, que se constituem em transientes hidráulicos superficiais.

Os estudos simularam a operação diária durante um período de 5 dias, com a vazão máxima de projeto, de forma a identificar os níveis d'água máximos operacionais.

Adicionalmente a essas análises, foram também simuladas as ocorrências de uma enchente milenar simultânea nos reservatórios de Cuncas, Caiçara e Várzea Grande, e de uma falha operacional e suas propagações pelos canais.

O conhecimento das linhas d'água resultantes no canal e níveis d'água no reservatório e câmaras de carga possibilitou o dimensionamento das obras deste sistema.



### 3 . MÉTODO NUMÉRICO UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES

Para a simulação das operações do sistema hidráulico de todo o Trecho III, foram utilizadas as equações diferenciais de Saint Venant, que descrevem o escoamento a superfície livre em canais e reservatórios, na sua forma conservativa:

$$\frac{\partial A}{\partial T} + \frac{\partial Q}{\partial X} = q; \quad (\text{Equação da continuidade}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial T} + \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{Q^2}{A} + g.I1 \right) = g.A.(S - SF); \quad (\text{Equação dinâmica}) \quad (2)$$

sendo:

$Q$  = a vazão nos canais ou reservatórios, podendo ser variável no tempo e no espaço;

$A$  = área molhada da seção transversal dos canais;

$q$  = vazão de fuga lateral do fluxo d'água por unidade de comprimento dos canais, considerada nula nas simulações;

$g$  = aceleração gravitacional;

$X$  = distância ao longo do escoamento

$T$  = tempo

$I1$  = parâmetro relativo à seção transversal

$S$  = declividade do canal e

$SF$  = declividade da linha de energia

Para a simulação do escoamento nos canais, túnel e aqueduto, ambas as equações (da continuidade e dinâmica) foram utilizadas. Para as laminações de enchentes nos reservatórios, só a equação da continuidade foi utilizada.

O método numérico utilizado para a resolução das citadas equações diferenciais foi o de MacCormack.

#### 3.1 Método de MacCormack – Descrição Sucinta

O método numérico de MacCormack, utilizado para resolução das equações diferenciais de Saint Venant, foi então aplicado nas seções transversais  $S_2, S_3, \dots, S_n$  internas dos canais (**Gráfico 3.1**).

As condições de contorno extremas e intermediárias foram resolvidas com auxílio dos vetores de ligação do método das características.

As equações (1) e (2) antes apresentadas podem ser postas sob forma vetorial:

$$\frac{\partial G}{\partial T} + \frac{\partial F}{\partial X} = Z \quad (3)$$

sendo os vetores  $G$ ,  $F$  e  $Z$  abaixo definidas como:

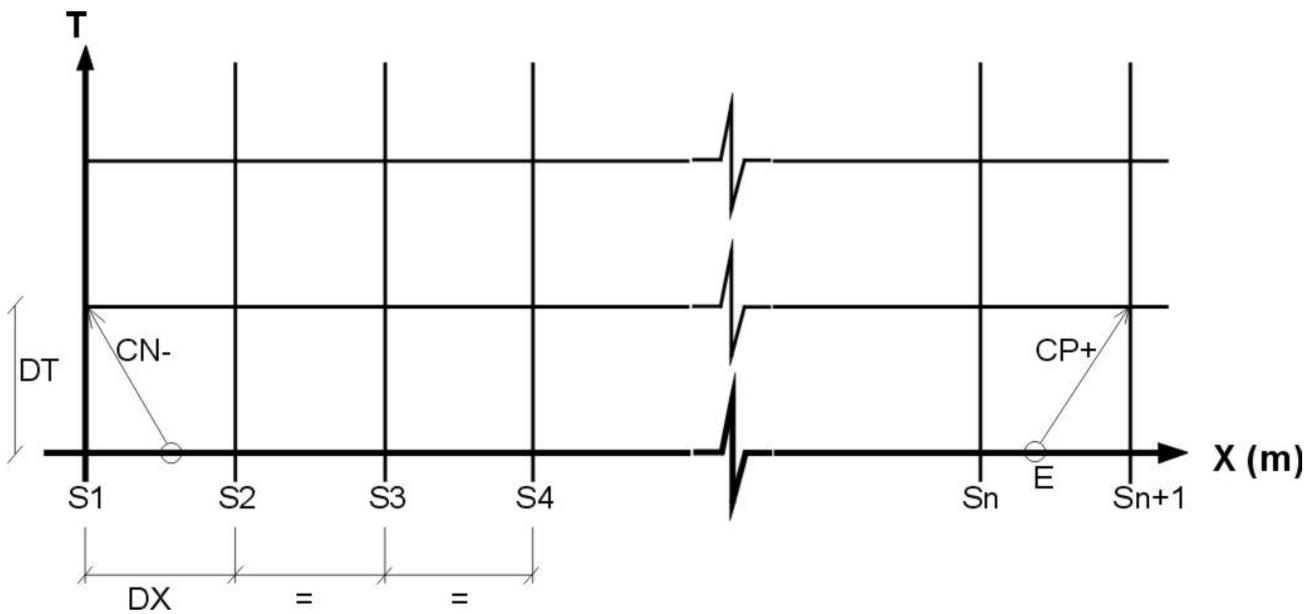
$$G = \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix} \quad (4)$$



## Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

$$F = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Z = \begin{bmatrix} q \\ g.A.(S - SF) \end{bmatrix} \quad (6)$$



**Gráfico 3.1: Trecho II - Diagrama tempo – espaço do método de MacCormack**

O método emprega dois passos para cada intervalo de tempo DT:

1º Passo: previsão

$$G_i^* = G_i^T - L.(F_{i+1}^T - F_i^T) + DT.Z_i^T \quad (7)$$

sendo:

$$L = \frac{DT}{DX} \quad (8)$$

2º Passo: correção

$$G_i^{**} = G_i^* - L.(F_i^* - F_{i-1}^*) + DT.Z_i^* \quad (9)$$

Ao final do intervalo de tempo DT, tem-se os valores:

$$G_i^{T+DT} = \frac{G_i^T + G_i^{**}}{2} \quad (10)$$

Sendo  $G_i^{T+D}$  o vetor dos parâmetros hidráulicos da altura d'água e vazão no extremo do intervalo de tempo.



## Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

O método avança, então, para os cálculos dos parâmetros em intervalos de tempo prefixados.

Para as condições de contorno dos extremos de montante (reservatório Cuncas) e de jusante (reservatório Várzea Grande) e intermediárias (Túnel Cuncas II e reservatório Caiçara), foi empregado o método das características com seus vetores de ligação. O método de MacCormack aplica-se nas seções transversais de cálculo, S2 a Sn.

Os vetores de ligação  $CN^-$  e  $CP^+$  fazem a ligação com as respectivas condições de contorno dos extremos de montante e jusante.

### 4 . CONDIÇÕES DE CONTORNO DOS SUB TRECHOS

Como ilustrado na **Figura 2.1**, o trecho estudado inicia a montante, no reservatório de Cuncas, o qual forneceu uma vazão constante de 83,7 m<sup>3</sup>/s. Este reservatório foi considerado como a condição de contorno de montante nas simulações dos transientes hidráulicos superficiais. O túnel Cuncas II une esse reservatório ao reservatório Caiçara, considerados nas simulações como condições de contorno intermediárias.

O reservatório de Caiçara possui 3 saídas com controle de vazão, garantido por meio de comportas em cada uma delas:

- A saída para o Trecho II com vazão de projeto de 53,48 m<sup>3</sup>/s;
- A saída para o Trecho III com vazão de projeto de 45,1 m<sup>3</sup>/s;
- A saída para o trecho IV com vazão de projeto de 20 m<sup>3</sup>/s;

A condição de contorno de jusante do trecho III no primeiro sub trecho é o reservatório Várzea Grande e, no segundo sub trecho, a câmara de carga da UHE Salgado II.

### 5 . LEIS DE MANOBRA NORMAL DIÁRIA PARA TURBINAS

O sistema operacional da Transposição está concebido para acionar o bombeamento toda vez que algum dos reservatórios atendidos necessite de água para atendimento das suas demandas. Como parte da energia elétrica que aciona as bombas virá do sistema elétrico interligado, concebeu-se um sistema hidráulico que garantirá o escoamento entre as estações de bombeamento e em todo o resto do sistema adutor durante o período de pico de consumo de energia elétrica, quando então o bombeamento será desligado. Assim, quando o bombeamento se der por vários dias, todos os dias nas 3 horas de pico o sistema será desligado. Conseqüentemente, as usinas hidrelétricas do sistema, que só fornecem energia para as bombas, funcionarão da mesma forma.

Esse desligamento evitará o desembolso das tarifas de pico de energia, reduzindo o custo operacional do sistema.

Em termos de vazão, a vazão máxima de dimensionamento  $Q_m$  terá um valor médio diário correspondente às horas de efetivo bombeamento como segue:

$$Q_{24h} = Q_m \times \frac{21h}{24h}$$

Assim, para as usinas hidrelétricas, durante a simulação dos hidrodinâmicos do sistema, foi utilizada a mesma lei de manobra aplicada às estações de bombeamento (**Gráfico 5.1**).

Como resultado de várias análises abrangendo períodos diversos de simulação, optou-se por estabelecer um cenário de 5 dias de operação, para se avaliar o resíduo de níveis como explicado no item 7.1.

A simulação foi feita em ciclos de 24 horas, começando 2 horas antes da incidência do período de pico de consumo do sistema elétrico interligado. Essas 2 horas garantem ao modelo a regularização do escoamento até o próximo evento, mantendo o fluxo em regime permanente.

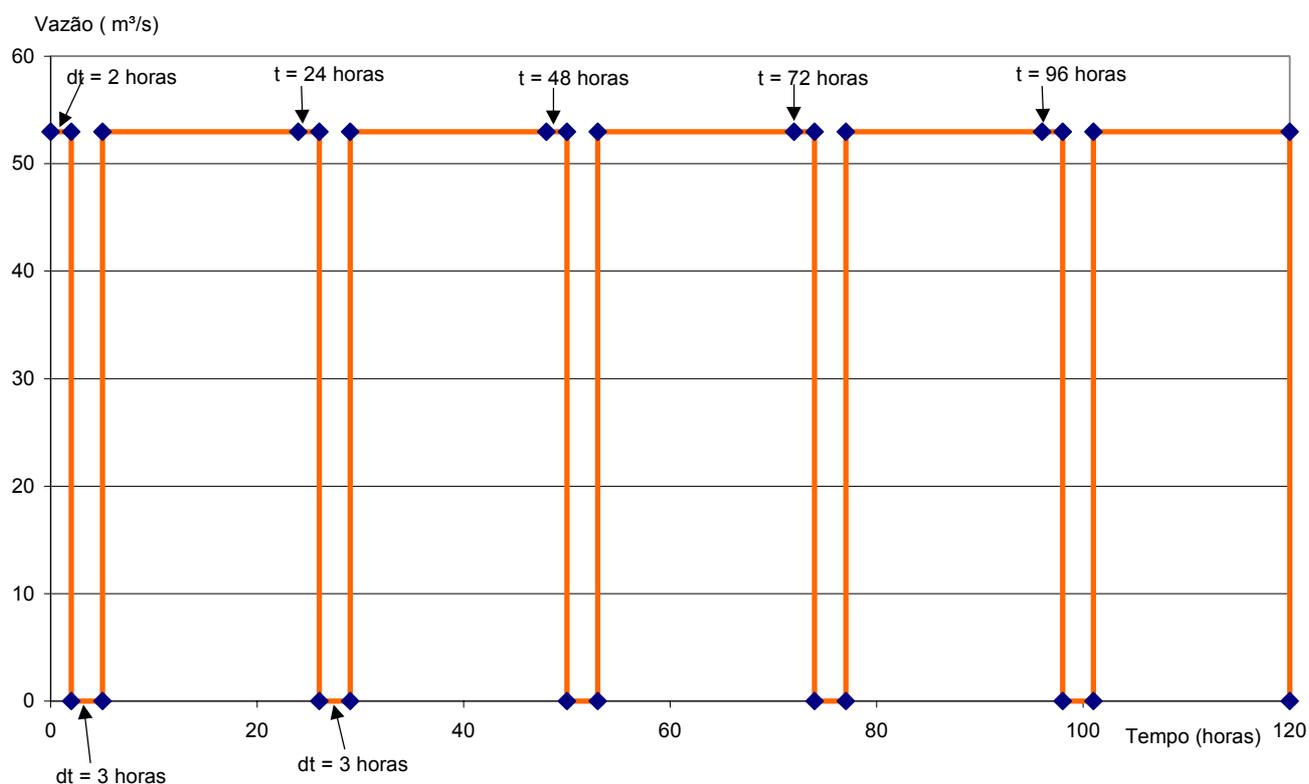


## Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

Ao início do período de pico de consumo de energia elétrica, as bombas no Trecho I foram desligadas e, conseqüentemente, desligaram-se todas as usinas hidrelétricas dos Trechos II e III que, ao fecharem seus distribuidores, anularam a vazão na tomada d'água, interrompendo o escoamento no canal.

O período de pico foi simulado por 3 horas quando, então, as bombas e usinas reiniciaram a operação. Ao final destas 3 horas de paralisação todas as usinas hidrelétricas abriram simultaneamente os distribuidores das suas turbinas, voltando a gerar durante as 19 horas restantes, completando o primeiro dia de 24 horas de operação.

Outros dias subseqüentes foram simulados da mesma forma, até que se completasse o quinto dia, como estabelecido.



**Gráfico 5.1 - Trecho II - Lei de manobra normal diária das turbinas. Operação de 5 dias.**

### 6 . SIMULAÇÕES DE OPERAÇÃO

Foram simulados o reservatório Cuncas, o túnel Cuncas II, o reservatório Caiçara, o canal de 50 km e a câmara de carga da UHE Salgado I (**Figura 2.1**).

Foram simuladas 3 operações:

- Operação de 5 dias de 24 horas cada, com a lei de manobra normal diária descrita anteriormente;
- Operação para a enchente de recorrência milenar, chamado critério hidrológico, com a incidência dos hidrogramas milenares dos reservatórios de Cuncas, Caiçara e Várzea Grande, precipitando-se simultaneamente, na segunda hora do quinto dia de funcionamento (no segundo sub trecho esta situação não existe). Neste caso, ao iniciar a chuva, as comportas da estrutura de controle de Cuncas se fecham, anulando a vazão afluyente no reservatório Caiçara;
- Esta situação corresponde à simulação do critério hidráulico que tem conceitos diferentes para cada um dos sub trechos analisados:



## Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

Primeiro sub trecho - Operação com critério hidráulico, idêntico ao item a, exceto que, a partir da segunda hora do quinto dia, as UHEs Salgado I e Ávidos I (Trecho II) fecham seus distribuidores, simulando uma parada não programada. Nesse instante, somente duas das quatro comportas da estrutura de controle em Caiçara estariam fechadas, resultando em uma vazão afluente variável e inferior à vazão máxima possível no canal, durante o período analisado;

Segundo sub trecho - Operação com critério hidráulico, partindo da condição em regime, após a parada da geração, as válvulas dispersoras de Salgado I mantém-se operando e a vazão na tomada d'água de Salgado II é nula.

### 7 . CASOS SIMULADOS

#### 7.1 Simulação com a Lei de Manobra Normal Diária

O escoamento inicialmente permaneceu em regime permanente com a vazão de 83,7 m<sup>3</sup>/s proveniente do reservatório de Cuncas a montante. No reservatório Caiçara, a saída para o trecho IV foi mantida fechada. Na saída para o trecho III a vazão simulada foi de 45,1 m<sup>3</sup>/s, vazão que estava sendo turbinada pela UHE Salgado I.

Na saída para o Trecho II manteve-se escoando a vazão complementar de 38,6 m<sup>3</sup>/s (83,7 – 45,1), a qual estava sendo turbinada pela UHE Ávidos I.

A linha d'água inicial correspondente à vazão de projeto foi denominada linha do nível d'água normal, ou linha d'água em regime permanente.

Ao final das primeiras 2 horas em regime permanente, as turbinas das casas de força das UHE de Salgado I do trecho III, e Ávidos I do trecho II foram fechadas, anulando as vazões nos extremos de jusante do sistema simulado.

O modelo desenvolvido especificamente para este trecho III, da saída do reservatório Cuncas até o reservatório Várzea Grande, permitiu determinar as vazões e alturas d'água variáveis em função do tempo, para as seções transversais do canal em estudo. Os níveis d'água máximos obtidos em cada seção de cálculo determinaram, quando unidos, a linha d'água envoltória dos níveis máximos normais.

Ao final das 3 horas de paralisação, as usinas voltaram a abrir seus distribuidores até atingirem as vazões de regime, provocando novos transientes hidráulicos superficiais, durante as 19 horas restantes do dia. Porém, os níveis d'água não retornaram aos valores do regime permanente inicial.

Explica-se esse efeito, considerando o funcionamento dos reservatórios na região dos Porcos, que recebe a vazão da Usina de Atalho com uma relação operacional de 21h / 24h. Entretanto, como a área dos reservatórios na região dos Porcos é muito grande e, como o sistema está previsto para ser operado sem manobra de comportas, nas 3 horas sem operação o nível daqueles reservatórios desce poucos centímetros.

No canal que aduz água ao reservatório Cuncas essa variação de nível pouco muda sua vazão, que se mantém aproximadamente constante nas 24 horas de operação.

Por exemplo, em um dia de utilização da vazão máxima do sistema, a vazão que sai do canal de fuga da UHE Atalho é 92,43 m<sup>3</sup>/s durante 21 horas. Descontando as vazões para o riacho dos Porcos (7,3 m<sup>3</sup>/s) e a de usos difusos (1,4 m<sup>3</sup>/s), os 83,73 m<sup>3</sup>/s restantes são conduzidos ao reservatório Cuncas. Assim, como explicado, os reservatórios de Porcos garantem aproximadamente essa vazão durante 24 horas para o reservatório Cuncas.

Na região das usinas hidrelétricas a situação é invertida pois, 83,73 m<sup>3</sup>/s chegam durante 24 h e só são turbinados 83,73 m<sup>3</sup>/s durante 21h.

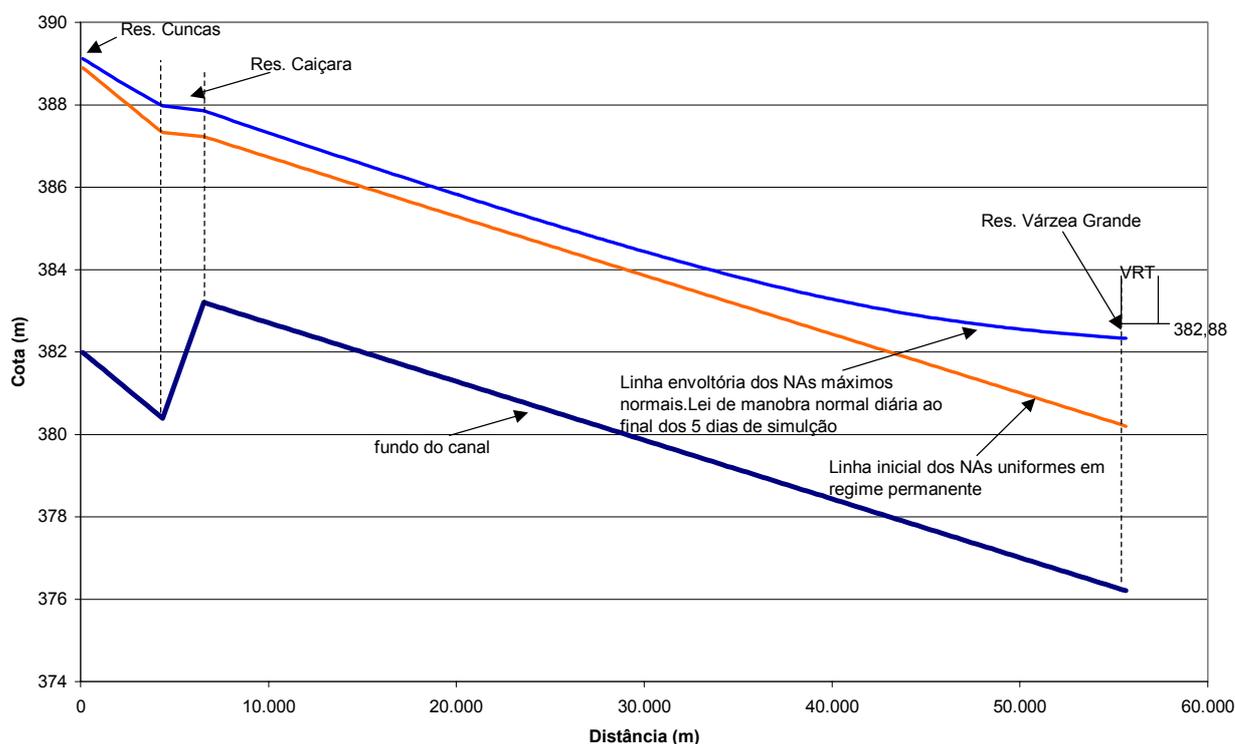


## Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

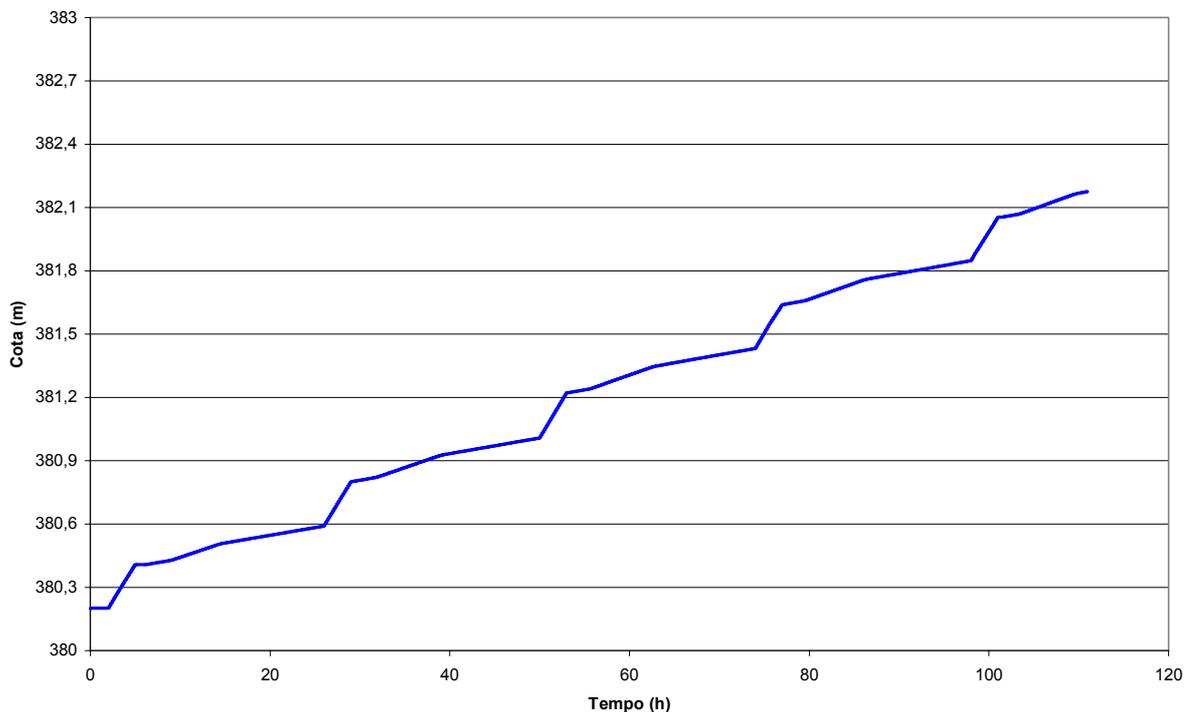
O resultado dessa constatação é uma transferência de volumes de água dos reservatórios da região dos Porcos para os reservatórios Cuncas, Caiçara e Várzea Grande, sem que exista uma variação de vazão nos limites do sistema. Como consequência, os níveis dos reservatórios em Porcos tendem a baixar, e na região de Cuncas, Caiçara e Várzea Grande, a subir.

O **Gráfico 7.1** ilustra o perfil do canal desde a saída do reservatório Cuncas até o reservatório Várzea Grande passando pelo túnel Cuncas II e reservatório Caiçara. Foram traçadas as linhas d'água em regime permanente e, logo acima, a linha envoltória dos níveis d'água máximos normais. Acima desta última linha adicionou-se a borda livre para obter-se a margem do canal até onde irá o revestimento como estabelecido nos Critérios de Projeto. Para a vazão de projeto de  $45,1 \text{ m}^3/\text{s}$ , o valor da borda livre calculado é  $0,6 \text{ m}$ .

Em seguida, com a volta do funcionamento das usinas, o nível de Várzea Grande tendeu a voltar ao valor inicial, porém, igualmente, um resíduo acumulado de nível d'água também foi detectado no final do quinto dia, devido à soma dos resíduos ocorridos a cada dia. O **Gráfico 7.2** mostra a variação do nível d'água no reservatório de Várzea Grande durante o período analisado.



**Gráfico 7.1 - Linhas d'água em regime e envoltória máxima normal.**



**Gráfico 7.2 – Variação do nível d'água máximo operacional, no reservatório Várzea Grande, ao final do quinto dia de simulação.**

### 7.2 Simulação com a Enchente Milenar (critério hidrológico)

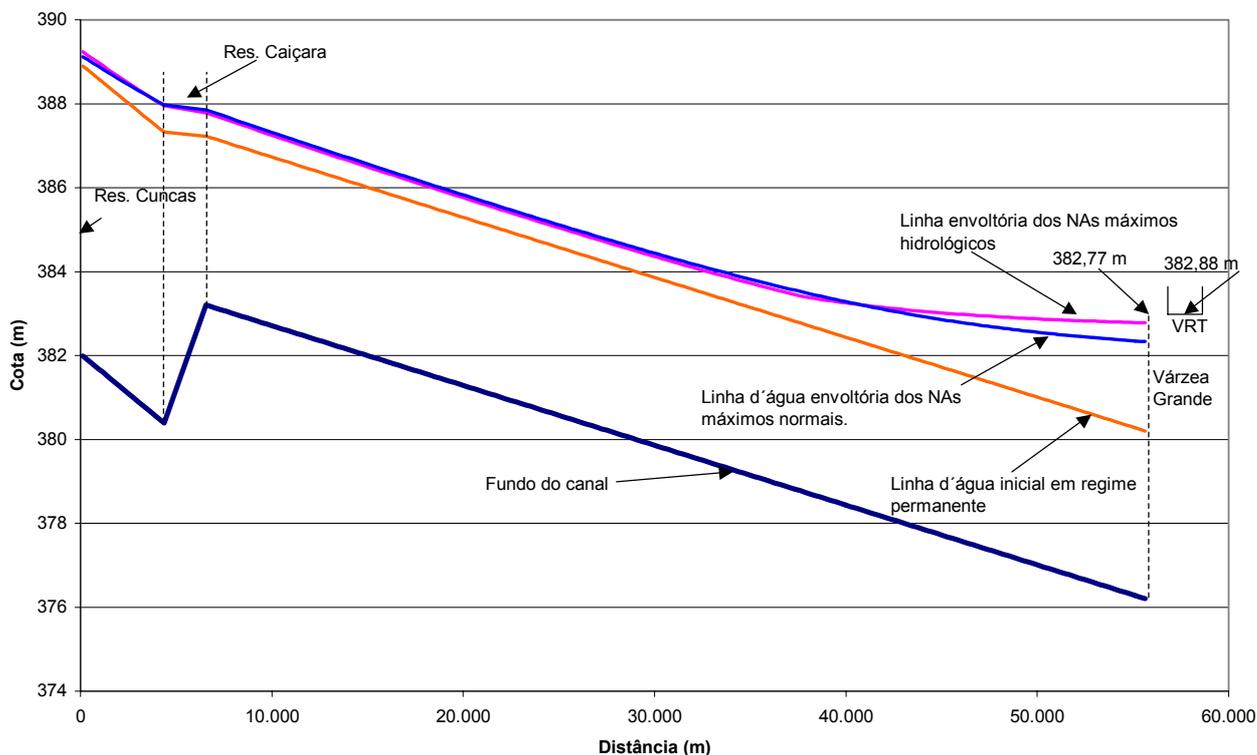
A simulação do Trecho III com a incidência da enchente milenar consistiu nos seguintes procedimentos básicos:

No início do quinto dia da semana, no momento em que as 2 casas de força das UHEs Salgado I e Ávidos I fecham seus distribuidores, fez-se precipitar os hidrogramas da enchente milenar no reservatório Caiçara (com pico de 70 m<sup>3</sup>/s), no reservatório de Cuncas (com pico de 414 m<sup>3</sup>/s) e no reservatório Várzea Grande (com pico de 27,5 m<sup>3</sup>/s). Nesse momento, as comportas da estrutura de controle de Cuncas foram fechadas e as de Caiçara permaneceram abertas durante a simulação.

A envoltória dos níveis d'água máximos obtidos da simulação do processo hidrodinâmico nos canais e reservatórios resultou na linha dos níveis máximos, que auxiliam o dimensionamento dos canais e reservatórios, como estabelecido nos critérios de projeto. Note-se que a linha envoltória dos NAs máximos não alcançou a cota dos respectivos vertedouros de Caiçara nem de Várzea Grande. O desenvolvimento das linhas d'água correspondentes estão ilustradas no **Gráfico 7.3**.

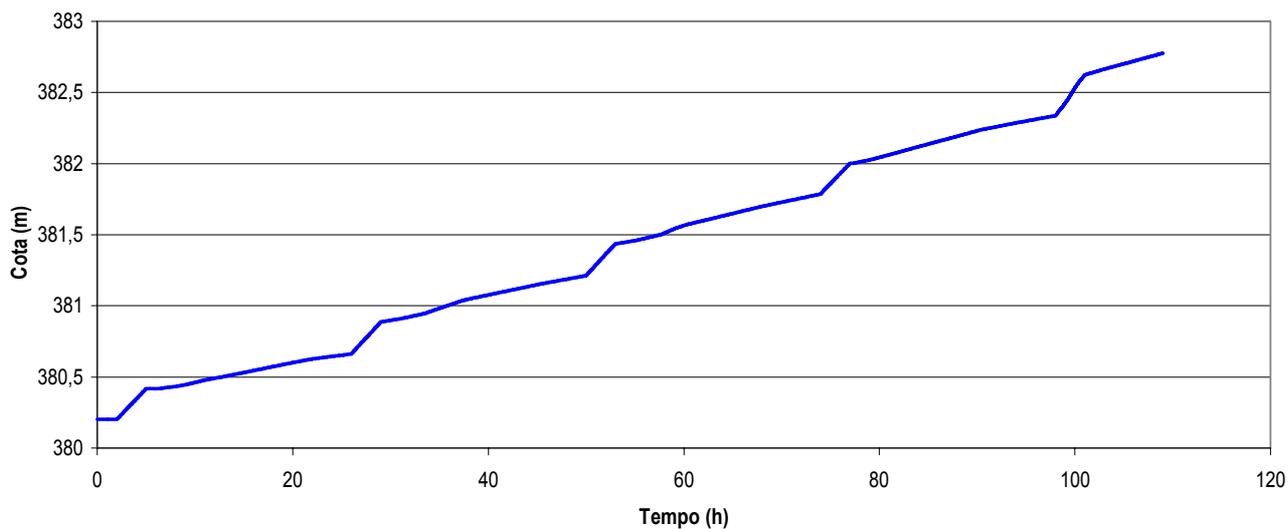


## Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico



**Gráfico 7.3 - Linhas d'água em regime, envoltória máxima normal e envoltória correspondente à enchente milenar.**

A variação do nível d'água em função do tempo no reservatório Várzea Grande está mostrada no **Gráfico 7.4**, indicando a incidência da cheia milenar.



**Gráfico 7.4 - Nível no reservatório Várzea Grande em função do tempo. Lei de manobra normal com ocorrência da enchente milenar no quinto dia.**



### 7.3 Simulação com o critério hidráulico

Outra verificação a ser feita diz respeito à falhas operacionais, como estabelecido nos Critérios de Projeto, foi denominada critério hidráulico, pois refere-se exclusivamente a problemas de ordem eletromecânica que interferem com o escoamento.

Neste caso, em particular, considerou-se que, no quinto dia da operação normal, com o escoamento da vazão máxima, após 2 horas de funcionamento em regime permanente de vazão, o escoamento pelas tomadas d'água das UHEs Ávidos I e Salgado I se interrompe, anulando a vazão. As comportas da estrutura de controle de Cuncas se fecham e, por falha dos equipamentos, somente duas das quatro comportas na estrutura de controle de Caiçara conseguem fechar. A vazão resultante no canal é, conseqüentemente, variável, tendendo a esvaziar o reservatório Caiçara.

Estimou-se que esse evento se propague por 24 horas, tempo suficiente para providências que garantam a retomada do escoamento pelas turbinas ou pelas válvulas dispersoras.

Unindo-se todos os níveis máximos de uma mesma simulação, obtidos entre os reservatórios Cuncas e Várzea Grande, obteve-se a máxima altura em relação ao piso do canal, que cada caso simulado atinge ao longo do sistema adutor nesse trecho como mostrado no **Gráfico 7.5**.

Nesse gráfico pode-se ver:

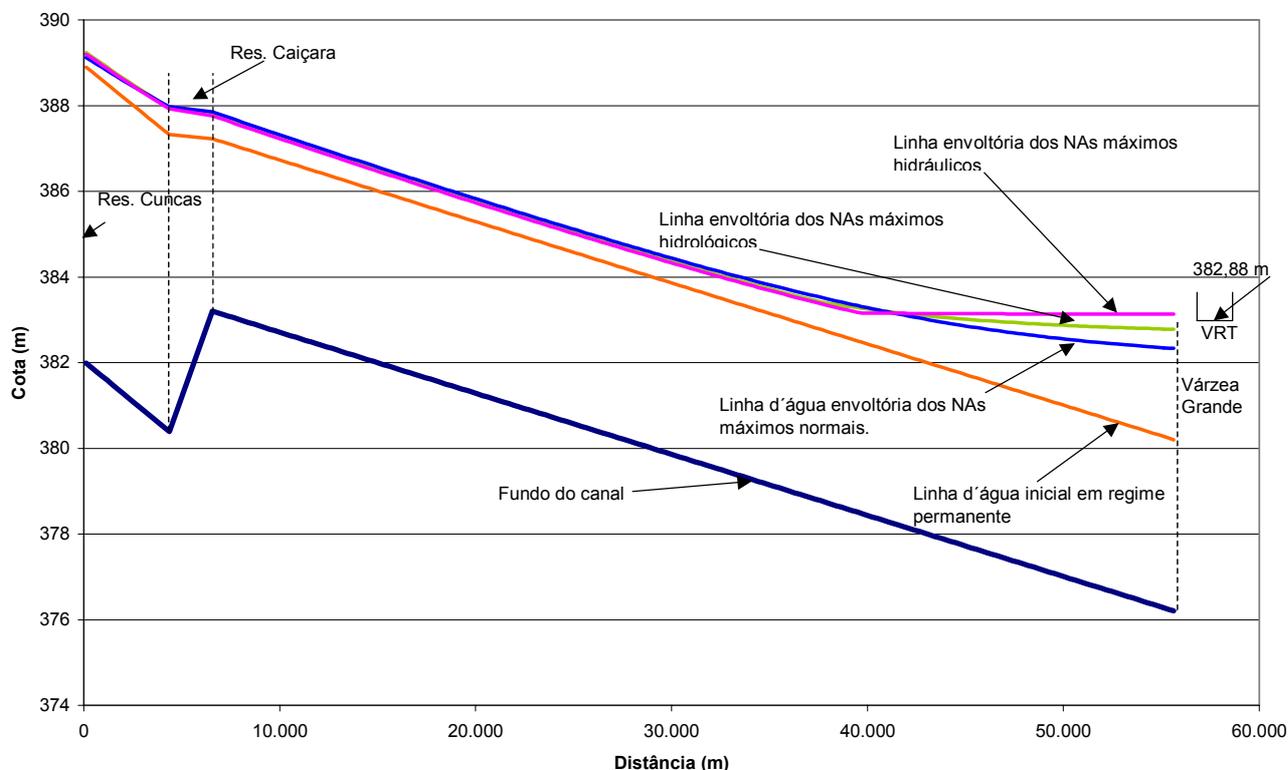
- a linha d'água correspondente à operação em regime, relativa ao período inicial de 2 h, em laranja;
- a linha d'água correspondente à operação que considera o efeito sobreposto dos fechamentos das turbinas que ocorre todos os dias até o quinto dia, mostrada em azul, denominada máximo normal;
- a linha d'água correspondente à ocorrência de uma cheia com recorrência de mil anos ao final do quinto dia, mostrada em verde, denominada máximo hidrológico;
- a linha d'água correspondente à falha de operação que considera a afluência da vazão de projeto por um período de 24 horas sem que haja escoamento pelas tomadas d'água das usinas Ávidos I e Salgado I (Trecho III), denominada máximo hidráulico, na cor rosa.

### 7.4 Simulação entre as UHEs Salgado I e Salgado II

Entre o final do canal de fuga da UHE Salgado I e o início da câmara de carga da UHE Salgado II, existirá um canal de ligação dimensionado para a vazão turbinada de 45,1 m<sup>3</sup>/s.



## Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico



**Gráfico 7.5 - Linhas d'água em regime, envoltória máxima normal, envoltória considerando a cheia milenar e envoltória considerando o critério hidráulico.**

As simulações foram feitas nos mesmos moldes das anteriores, considerando-se um período de cinco dias para as operações normais, não existindo o critério hidrológico das cheias, pois não existem reservatórios intermediários.

A simulação da operação com critério hidráulico foi feita partindo da condição em que as válvulas dispersoras de Salgado I mantém-se operando, e a vazão na tomada d'água de Salgado II é nula.

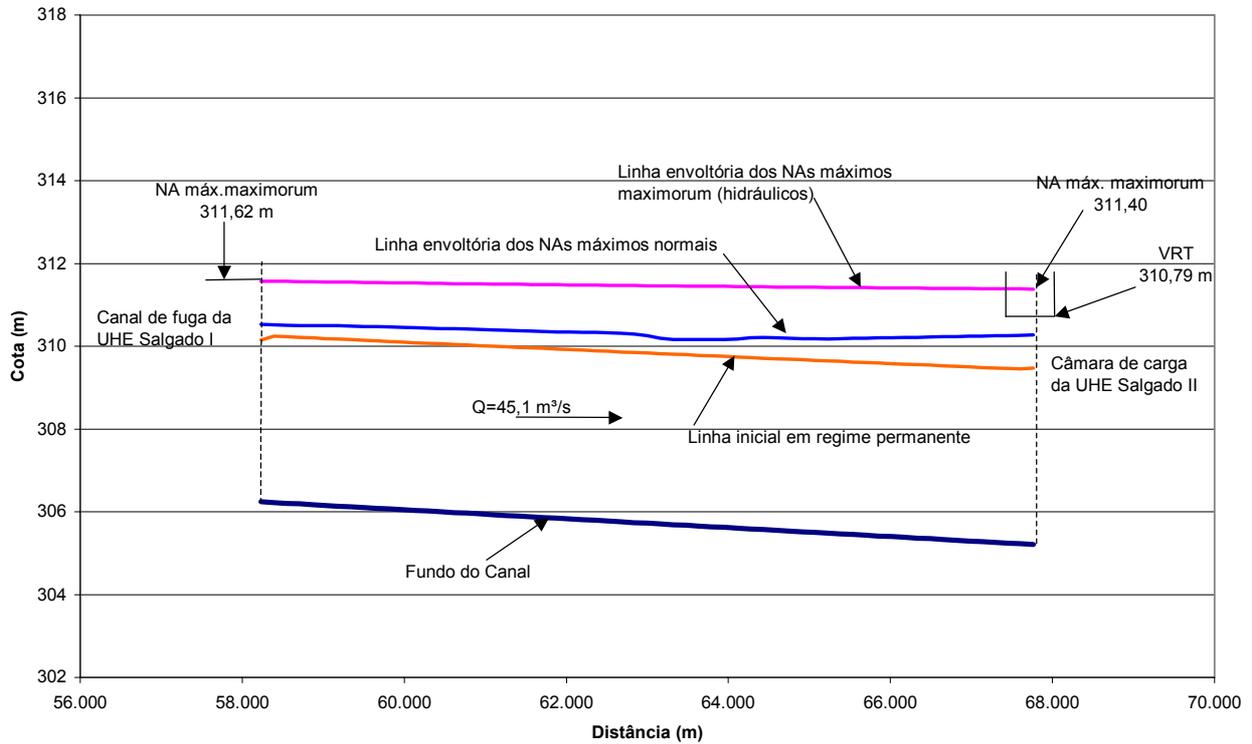
O resultado dessas simulações pode ser visto no **Gráfico 7.6**, podendo-se ver:

- a linha d'água correspondente à operação em regime, relativa ao período inicial de 21 h, em laranja;
- a linha d'água correspondente à operação que considera o efeito sobreposto dos fechamentos das turbinas que ocorre todos os dias até o quinto dia, mostrada em azul, denominada máximo normal;
- a linha d'água correspondente à falha de operação que considera a afluência da vazão de projeto por um período de 24 horas fornecida pela usina Salgado I, sem que haja escoamento pela usina de Salgado II. A vazão de projeto esco completamente pelo reservatório lateral da câmara de carga de Salgado II, em cor de rosa.

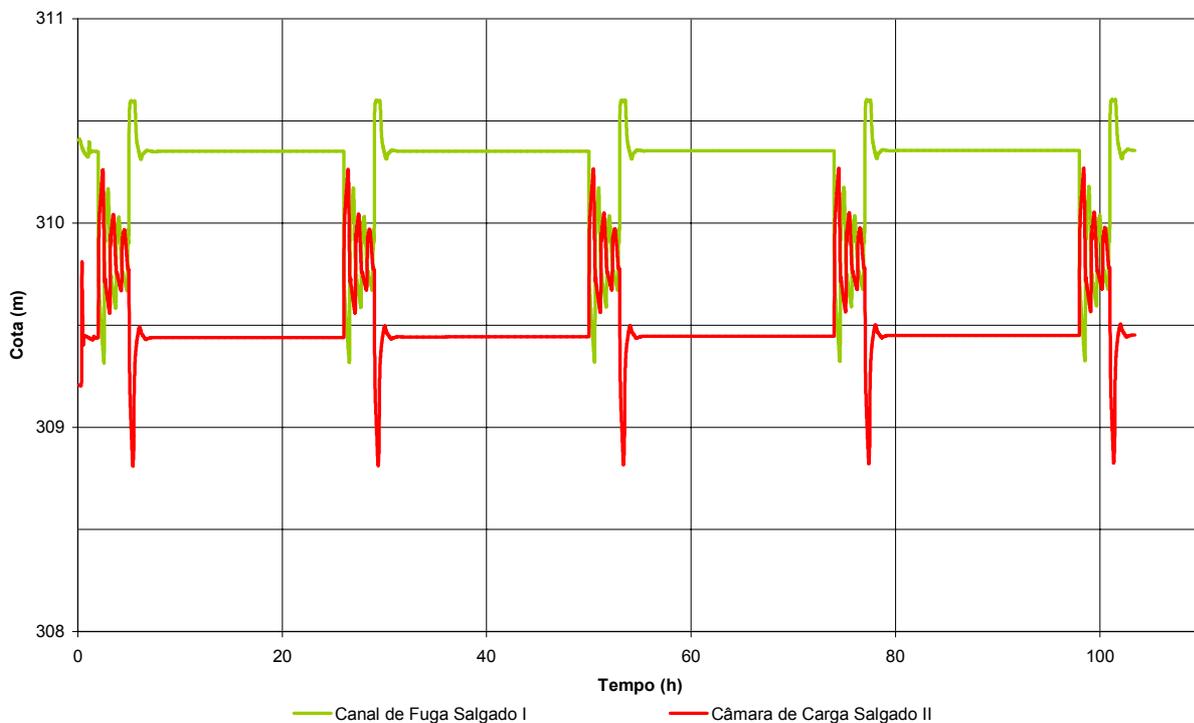
Neste trecho, devido ao pequeno comprimento do canal, os níveis d'água entram em regime em poucas horas, não existindo a ocorrência de resíduos, sendo que, diariamente, os níveis se recuperam, não havendo problemas para o início do dia seguinte. Esse efeito está mostrado no **Gráfico 7.7**.



## Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico



**Gráfico 7.6 – Sub trecho entre Salgado I e Salgado II - Linhas d'água em regime, envoltória máxima normal e envoltória considerando o critério hidráulico.**



**Gráfico 7.7 – Variação de 5 dias dos níveis d'água a montante e a jusante do canal entre Salgado I e Salgado II.**



### 8 . COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Para o projeto dos canais, conforme estabelecido nos critérios de projeto, o nível máximo normal é o responsável pelo estabelecimento da cota de coroamento, definido como uma borda livre de 60 cm acima desse nível d'água.

O máximo maximorum geral foi definido pelo nível resultante da simulação com o critério hidráulico, ou o simulado com a cheia, adotando-se o mais alto. A borda livre para o máximo maximorum foi definida 30 cm acima do nível mais alto, como estabelecido nos critérios de projeto. Se a borda do canal estiver abaixo da borda livre dos máximos maximorum a altura correspondente deverá ser completada com uma mureta de concreto.

Para o reservatório Várzea Grande, são os seguintes os níveis principais de projeto:

NA normal = 380,25 m

NA máximo normal = 382,38 m

NA máximo maximorum = 383,13 m

Para a câmara de carga de Salgado II, são os seguintes os níveis principais de projeto:

NA normal = 309,23 m

NA máximo normal = 310,29 m

NA máximo maximorum = 311,44 m

Como o acúmulo dos resíduos de níveis, em operação normal para as vazões máximas de projeto, tem sua origem nas vazões mantidas quase constantes a partir dos reservatórios da região dos Porcos, ao final dos cinco dias de operação dever-se-á fazer uma manobra para restabelecer os níveis às condições originais do primeiro dia de operação. Essa manobra consistirá em fechar as comportas na saída do reservatório do Boi (início do canal que dá acesso ao reservatório Cuncas) e acionar o bombeamento do Trecho I até o nível dos reservatórios serem restaurados. Ao mesmo tempo serão acionadas as usinas hidrelétricas que rebaixarão os reservatórios de Cuncas e Caiçara às cotas originais.