

# Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL

## Relatório Técnico



<b>Nº/Ano:</b> 1006/2011	<b>Nº de Páginas:</b> 48	<b>Nº de Anexos:</b>
<b>Título:</b> Consideração do tempo de viagem da água nos modelos SIMHIDR e DESSEM-PAT.		
<b>Departamento:</b> Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente - DEA		
<b>Área de Responsabilidade:</b> B200	<b>Conta de Apropriação:</b>	1399
<b>Cliente:</b> Centrais Elétricas Brasileiras S/A - ELETROBRAS Av. Presidente Vargas, 409 - 12º andar 20071-003 - Rio de Janeiro / RJ <b>Atenção:</b> Egidio Schoenberger	<b>Equipe de Acompanhamento:</b> Luis Ernesto Areias - ELETROBRAS Renata Leite Falcão - ELETROBRAS	
<b>Resumo:</b> Este Relatório descreve a funcionalidade de tempo de viagem ao longo das cascatas nos modelos do projeto DESSEM. O tempo de viagem pode ser considerado entre duas usinas hidroelétricas ou entre uma usina hidroelétrica e uma seção de rio, que é uma nova entidade introduzida nesses modelos. Dois tipos de modelagem podem ser utilizados: a forma tradicional de tempo de viagem por translação ou uma nova estratégia de tempo de viagem por curva de propagação. Apresenta-se a formulação matemática dessa funcionalidade, descrevem-se seus dados de entrada e mostra-se um exemplo de sua aplicação para um caso teste real com o sistema brasileiro.		
<b>Autores:</b> André Luiz Diniz Souto Lima - CEPEL Tiago Norbiato dos Santos - PUC-RJ	<b>Palavras-Chave:</b> Programação diária da operação, programação linear, tempo de viagem da água. <b>Classificação:</b> Controlado	
<b>Gerente de Projeto</b>  <b>Nome:</b> André Luiz Diniz Souto Lima <b>Tel.:</b> (21)2598-6046 <b>Fax:</b> (21)2598-6482 <b>E-mail:</b> <a href="mailto:diniz@cepel.br">diniz@cepel.br</a>	<b>Chefe do Departamento</b>  <b>Nome:</b> Maria Elvira Piñeiro Maceira <b>Tel.:</b> (21)2598-6454 <b>Fax:</b> (21)2598-6482 <b>E-mail:</b> <a href="mailto:elvira@cepel.br">elvira@cepel.br</a>	
<b>Aprovação</b>  <b>Roberto Pereira Caldas</b> <b>Diretor de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação</b> 25/01/11		

**CEPEL**

**Centro de Pesquisas de Energia Elétrica**

**Projeto DESSEM**

**Relatório Técnico:**

**CONSIDERAÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM DA ÁGUA  
NOS MODELOS SIMHIDR E DESSEM-PAT**

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>6</b>
<b>2. CONCEITUAÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM DA ÁGUA .....</b>	<b>8</b>
2.1. Elementos da cascata associados ao tempo de viagem.....	8
2.1.1. Definição das seções de rio.....	9
2.2. Tipos de modelagem de tempo de viagem .....	10
2.2.1. Não consideração do tempo de viagem .....	10
2.2.2. Tempo de viagem por translação .....	10
2.2.3. Tempo de viagem por curva de propagação .....	11
2.2.4. Representações mais acuradas do tempo de viagem.....	13
<b>3. DADOS PARA A REPRESENTAÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM.....</b>	<b>14</b>
3.1. Representação dos componentes do sistema .....	14
3.1.1. Usinas hidroelétricas .....	14
3.1.2. Seções de rio .....	14
3.2. Fornecimentos dos dados para representação do tempo de viagem .....	15
3.2.1. Identificação dos trechos de rio para os quais se deve considerar o tempo de viagem da água.....	15
3.2.2. Tipo de modelagem a ser adotada.....	15
3.2.3. Valores de tempo de viagem.....	16
3.2.4. Dados das curvas de propagação .....	17
3.2.5. Defluências anteriores ao início do estudo .....	17
3.3. Validação e Processamento dos Dados.....	18
3.3.1. Curvas de propagação .....	18
<b>4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA MODELAGEM DO TEMPO DE VIAGEM DA ÁGUA .....</b>	<b>21</b>
4.1. Cálculo <i>a priori</i> dos fatores de participação para tempo de viagem .....	22
4.1.1. Tempo de viagem de translação.....	23
4.1.2. Tempo de viagem por curva de propagação .....	26
4.2. Fatores de participação para as defluências anteriores ao início do estudo....	32
4.3. Condição de contorno para o final do horizonte de estudo .....	33
4.4. Consideração do tempo de viagem nos subproblemas de programação linear – modo PL-Único .....	34
4.4.1. Modelagem do tempo de viagem entre duas usinas hidroelétricas.....	35
4.4.2. Modelagem das seções de rio no problema de programação diária da operação .....	36
4.4.3. Modelagem do tempo de viagem entre uma usina hidroelétrica e uma seção de rio .....	36
<b>5. RELATÓRIOS DE SAÍDA.....</b>	<b>38</b>

<b>6.</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>39</b>
6.1.	Dados gerais do estudo .....	39
6.2.	Dados referentes a seções de rio .....	40
6.3.	Dados referentes ao tempo de viagem da água.....	40
6.4.	Dados das curvas de propagação .....	42
6.4.2.	Vazões defluentes anteriores ao início do estudo .....	43
6.5.	Resolução do problema.....	44
6.6.	Operação das usinas hidroelétricas e seções de rio no módulo de simulação	45
6.7.	Operação das usinas hidroelétricas e seções de rio no módulo de otimização.....	46
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>47</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>48</b>

### **Siglas e Nomenclatura**

- PDO:** Programação diária da Operação;
- Período:** Cada intervalo de tempo na discretização do problema;
- Horizonte:** Soma das durações de todos os períodos: corresponde ao horizonte de tempo ao longo do qual se deseja realizar a programação do sistema.

**Notação:**

- $GH_i^t$  : Geração da usina hidroelétrica  $i$ , no instante  $t$ ;
- $I_i^t$  : Vazão incremental natural à usina hidroelétrica  $i$ , no instante  $t$ ;
- $M_i$  : Conjunto de usinas à montante da usina  $i$ ;
- $Q_i^t$  : Turbinamento da usina hidroelétrica  $i$ , no instante  $t$ ;
- $S_i^t$  : Vertimento da usina hidroelétrica  $i$ , no instante  $t$ ;
- $\tau_{ji}$  : Tempo de viagem da água entre as usinas  $j$  e  $i$ ;
- $V_i^t$  : Volume armazenado da usina hidroelétrica  $i$ , ao final do instante  $t$ ;

## 1. INTRODUÇÃO

O programa DESSEM-PAT [1] é um modelo desenvolvido pelo CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica para ser utilizado como ferramenta de apoio para a otimização da programação diária da operação (PDO) de sistemas hidrotérmicos, com um horizonte de até duas semanas e discretização temporal em patamares cronológicos de duração mínima de 1 hora. Além de representar o atendimento à demanda e à reserva de potência do sistema, o modelo DESSEM-PAT representa de forma detalhada a rede elétrica (carga por barra, modelagem DC, restrições de limites de fluxo nos circuitos, etc.), a operação das usinas hidroelétricas (balanço hídrico, função de produção não linear, tempo de viagem da água, restrições operativas de limite e variação, etc...), e os recursos de geração térmica (limites de capacidade e custos incrementais lineares de geração).

Este programa se insere no escopo do projeto DESSEM, desenvolvido pelo CEPEL desde 1998, no qual se incluem também dois outros programas: (i) o modelo DESSEM-UC [2], com horizonte de 1 dia e discretização semi-horária, que considera de forma detalhada as restrições de *unit commitment* das unidades geradoras ; (ii) o modelo SIMHIDR (Simulação Hidráulica) [3], que simula a operação dos reservatórios a partir de um despacho já programado para a geração. No contexto de utilização dos modelos DESSEM-PAT e DESSEM-UC, o modelo SIMHIDR se torna um módulo preliminar, que tem por objetivo obter as condições do sistema no início do horizonte de otimização (por exemplo, volumes armazenados nos reservatórios e defluências passadas para usinas com tempo de viagem).

Este Relatório descreve a funcionalidade de tempo de viagem das usinas hidroelétricas nos modelos do projeto DESSEM, de acordo com a seguinte estrutura: no capítulo 2, faz-se uma descrição conceitual do tempo de viagem da água entre usinas hidroelétricas e/ou seções de rio em uma cascata; no capítulo 3, descrevem-se os dados de entrada associados a essa funcionalidade; no capítulo 4, apresenta-se a formulação matemática da consideração do tempo de viagem no balanço hídrico das usinas hidroelétricas e seções de rio; no capítulo 5, apresenta-se um estudo de caso ilustrativo com o sistema real brasileiro, e no capítulo 6, apresentam-se as conclusões do estudo dessa funcionalidade.

Embora a metodologia seja a mesma para os programas DESSEM-PAT, DESSEM-UC e SIMHIDR, um enfoque maior será dado para a utilização dessa funcionalidade nos modelos DESSEM-PAT e SIMHIDR.



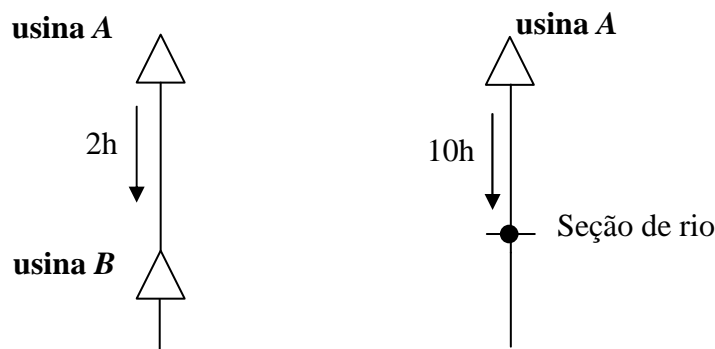
## 2. CONCEITUAÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM DA ÁGUA

Para diversos aproveitamentos hidroelétricos não se pode considerar que todo o volume defluente das usinas de montante durante um determinado intervalo de tempo da discretização (período) esteja disponível para a usina de jusante ao longo desse mesmo período, especialmente no problema de PDO, onde os períodos são curtos. Nestes casos, o volume de água afluente a uma usina a jusante na cascata deve ser obtido através do cálculo da propagação, no tempo, das defluências realizadas pela(s) usina(s) de montante em períodos passados.

Neste capítulo, apresenta-se uma descrição básica dos elementos da operação de sistemas hidrotérmicos que estão associados ao tempo de viagem da água dos reservatórios, assim como a descrição conceitual dessa funcionalidade. Uma descrição mais detalhada de como são representados os reservatórios e usinas hidroelétricas nos modelos é feita em [4], [5].

### 2.1. Elementos da cascata associados ao tempo de viagem

Nos modelos do projeto DESSEM, o tempo de viagem da água pode ser considerado entre duas usinas hidroelétricas (uma a montante e outra imediatamente a jusante) ou entre uma usina hidroelétrica e uma seção de rio<sup>1</sup> situada imediatamente à jusante. A Figura 2.1 ilustra essas duas situações.



**Figura 2.1 - Representação esquemática do tempo de viagem da água entre duas usinas hidroelétricas (à esquerda) ou entre uma usina hidroelétrica e uma seção de rio (à direita).**

<sup>1</sup> A representação de seções de rio no modelo tornou-se necessária devido a restrições de controle de nível em alguns pontos de rio, como por exemplo a cota na Régua 11 a jusante de Itaipu.

O tempo de viagem entre usinas hidroelétricas já vem sendo considerado desde 2004 no modelo DESSEM. Já o tempo de viagem entre uma usina e uma seção de rio é uma funcionalidade nova, introduzida em 2011 no modelo DESSEM-PAT. Desta forma, para que se possa considerar essa segunda situação de forma adequada, torna-se necessário introduzir as seções de rio como um novo elemento do sistema nos modelos para a programação da operação, conforme será descrito na seção 2.1.1.

Ao longo deste documento, chamaremos de “ponto de jusante” ou “elemento de jusante” ao elemento de destino da água cujo tempo de viagem é considerado, o qual, conforme explicado acima, pode ser uma usina hidroelétrica ou uma seção de rio.

### 2.1.1. Definição das seções de rio

Inicialmente, deve-se indicar a localização exata de uma seção de rio  $S$  em uma cascata. Devido à confluência de rios ao longo das bacias, para que essa localização possa ser feita de forma unívoca, deve-se informar quais são as usinas imediatamente à montante de  $S$ .

A Figura 2.2 ilustra três seções de rio ( $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ ) localizadas em uma região na cascata entre duas usinas de montante  $B$  e  $C$  e uma usina de jusante  $A$ . O ponto de confluência entre os rios onde situam as usinas  $B$  e  $C$  é denotado por  $P$ .

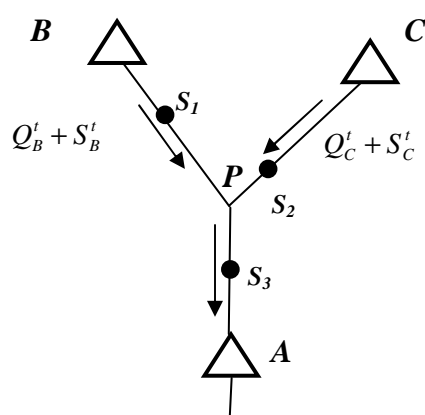


Figura 2.2 – Exemplo de três seções de rio  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  em uma cascata.

Observa-se que há três trechos de rio na figura:  $BP$ ,  $CP$  e  $PA$ . A identificação correta do trecho onde se localiza cada seção é feita conforme mostra a Tabela 2.1 a seguir:

Tabela 2.1 - Definição das seções de rio da Figura 2.2.

Seção de rio	Trecho onde se situa a seção	Conjunto de usinas imediatamente à montante
$S_1$	$BP$	$\{B\}$
$S_2$	$CP$	$\{C\}$
$S_3$	$PA$	$\{B,C\}$

## 2.2. Tipos de modelagem de tempo de viagem

Atualmente, três formas de tratamento do tempo de viagem podem ser consideradas pelos modelos do projeto DESSEM: a não consideração do tempo de viagem; consideração do tempo de viagem por translação; consideração do tempo de viagem através de curva de propagação. Estas três opções são detalhadas a seguir, sendo as duas últimas o objeto de interesse específico desse documento.

### 2.2.1. Não consideração do tempo de viagem

Quando se despreza o tempo de viagem da água, supõe-se, nas equações de balanço hídrico do modelo, que o volume defluído por uma usina  $i$  chegará imediatamente ao ponto de jusante  $j$ . Esta forma de tratamento é muito comum em modelos de mais longo prazo, onde o tempo de viagem (em geral, em horas) é muito menor do que o intervalo de tempo na discretização (semanas ou meses).

Entretanto, em modelos de mais curto prazo, como por exemplo no problema de PDO, onde o intervalo de tempo pode ser horário ou de poucas horas, passa a ser importante levar em consideração o tempo de viagem da água ao longo da cascata. Isto ocorre especialmente quando o ponto de jusante é uma usina a fio d'água, que possui uma capacidade de regularização pequena e, portanto, necessita de uma modelagem acurada do instante de tempo em que a água defluída pelas usinas de montante chegará a usina.

### 2.2.2. Tempo de viagem por translação

Esta é a forma tradicional e mais simplificada de modelagem do tempo de viagem, na qual se considera que todo o volume de água defluído por uma usina de montante  $i$  em um determinado instante de tempo  $t$  chegará ao ponto de jusante  $j$  no instante de tempo  $(t + \tau_{ij})$ , onde  $\tau_{ij}$  é o tempo de viagem da água entre os dois pontos. A Figura 2.3 a seguir mostra um

diagrama esquemático desta forma de consideração do tempo de viagem, onde a replicação das usinas tem o objetivo de mostrar sua operação ao longo do tempo.

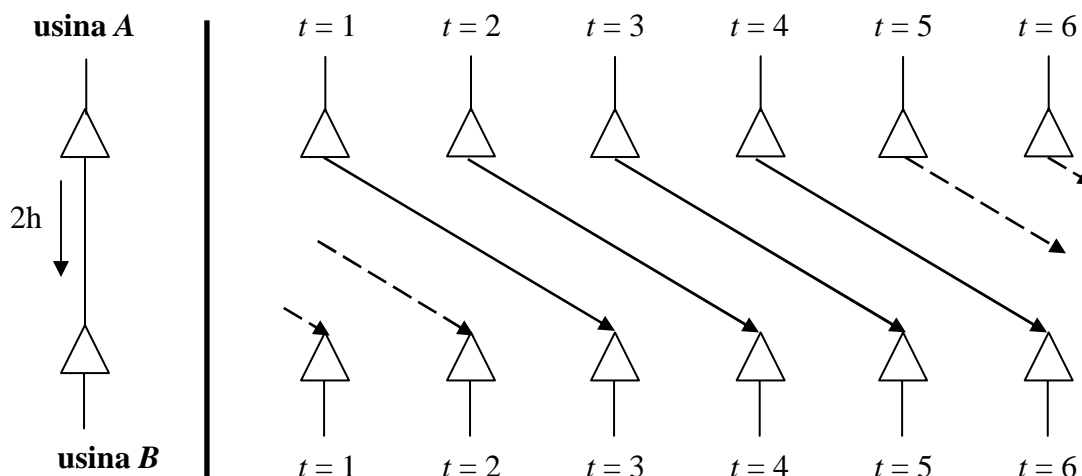


Figura 2.3 – Exemplo de representação do tempo de viagem da água por translação, para um tempo de viagem de duas horas.

### 2.2.3. Tempo de viagem por curva de propagação

Um aperfeiçoamento em relação à modelagem descrita no item anterior é considerar que a vazão defluida pela usina de montante  $i$  no instante  $t$  chega ao ponto de jusante  $j$  de forma parcelada, entre os instantes  $t + \tau_{ij_{\min}}$  até  $\tau_{ij_{\max}}$ . Os parâmetros  $\tau_{ij_{\min}}$  e  $\tau_{ij_{\max}}$  representam os tempos de viagem mínimo e máximo entre  $i$  e  $j$ , que se referem, respectivamente, a primeiras e últimas parcelas da água defluida por  $i$  que chegam ao ponto  $j$ .

Nesta forma de representação, devem ser fornecidos os percentuais da vazão defluida por  $i$  que chegam a cada instante de tempo entre  $\tau_{ij_{\min}}$  e  $\tau_{ij_{\max}}$ . A curva que mostra esses percentuais de forma acumulada é denominada neste documento de **curva de propagação da água**, exemplificada na Figura 2.4 para o caso da chegada, na seção da régua 11 (R11), das vazões defluidas pela usina de Itaipu. Ressalta-se que os coeficientes da curva de propagação não variam com o valor da vazão defluente da usina de montante.

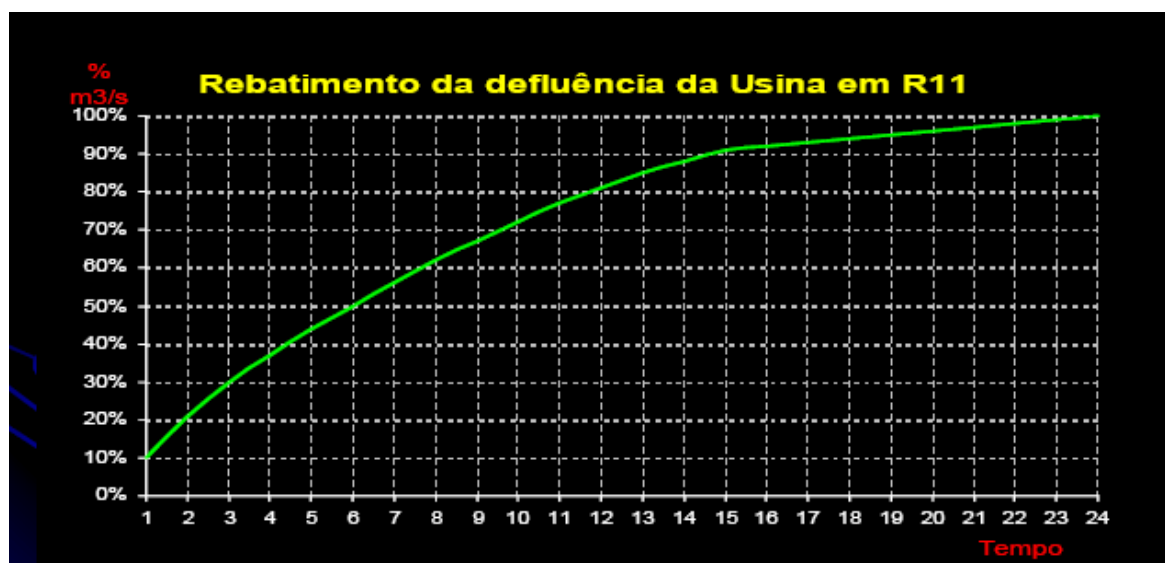


Figura 2.4 – Exemplo de uma curva de propagação para o tempo de viagem da água, onde  $\tau_{ij\ min} = 1$  e  $\tau_{ij\ max} = 24h$ .

Os coeficientes horários da curva de propagação indicada na Figura 2.4 são mostrados na Tabela 2.2, onde foi feita uma interpolação visual para obter os percentuais acumulados referentes a cada hora.

Tabela 2.2 –Dados de coeficientes da curva de propagação mostrada na Figura 2.4.

Tempo de defasagem	% da água que chega a jusante	Tempo de defasagem	% da água que chega a jusante	Tempo de defasagem	% da água que chega a jusante
de 0h a 1h	10.0	de 8h a 9h	5.0	de 16h a 17h	0.5
de 1h a 2h	11.0	de 9h a 10h	5.0	de 17h a 18h	0.5
de 2h a 3h	9.0	de 10h a 11h	5.0	de 18h a 19h	1.0
de 3h a 4h	7.0	de 11h a 12h	4.0	de 19h a 20h	1.0
de 4h a 5h	7.0	de 12h a 13h	4.0	de 20h a 21h	1.0
de 5h a 6h	6.0	de 13h a 14h	4.0	de 21h a 22h	1.0
de 6h a 7h	6.0	de 14h a 15h	3.0	de 22h a 23h	1.0
de 7h a 8h	6.0	de 15h a 16h	1.0	de 23h a 24h	1.0

Por exemplo, pode-se ver nesta curva que 10% da vazão defluída por Itaipu chega em R11 em uma hora, e que aproximadamente 20% (7+7+6) chega entre 3h e 6h.

Neste documento, o tempo de viagem máximo  $\tau_{ij_{\max}}$  será referenciado simplesmente por  $\tau_{ij}$ . O caso de representação por translação (seção 2.2.2) é um caso particular desta curva de propagação, para  $\tau_{ij_{\min}} = \tau_{ij_{\max}} = \tau_{ij}$ , com um fator de 100%.

#### 2.2.4. Representações mais acuradas do tempo de viagem

Em geral, a consideração de tempos de viagem constantes (seção 2.2.2) ou por curva de propagação (seção 2.2.3) é suficiente para se ter uma representação razoável para fins práticos. Entretanto, ainda é possível se fazer uma representação mais elaborada, considerando os fenômenos dinâmicos expressos nas equações de Saint-Venant, onde o tempo de viagem pode variar com o valor de vazão defluente. Entretanto, essas expressões não possuem solução analítica, o que dificulta a sua inclusão explícita nos modelos de otimização.

Uma alternativa é adotar a modelagem por curva de propagação na seção 2.2.3, onde os coeficientes da curva são aproximados através da linearização das equações Saint-Venant. Os valores da curva podem ainda variar de um caso para o outro, dependendo da época do ano e/ou da vazão defluente que se espera obter para a operação da usina de montante.

### 3. DADOS PARA A REPRESENTAÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM

Nesta seção, descrevem-se os dados de entrada necessários para representar o tempo de viagem da água nos modelos SIMHIDR e DESSEM-PAT.

#### 3.1. Representação dos componentes do sistema

Os componentes do sistema diretamente associados à consideração do tempo de viagem da água são as usinas hidroelétricas e as seções de rio, cuja representação no problema de PDO é discutida a seguir.

##### 3.1.1. Usinas hidroelétricas

O conjunto de usinas hidroelétricas na configuração e os seus dados físicos e operativos já são fornecidos nos arquivos de entrada do modelo e no arquivo de cadastro das usinas hidroelétricas. Portanto, os únicos dados adicionais específicos para a modelagem do tempo de viagem são discutidos na seção 3.2.

##### 3.1.2. Seções de rio

A entidade “seção de rio” corresponde a um ponto ao longo do rio, cuja representação no problema de PDO se torna necessária devido à necessidade de representação de alguma restrição específica aplicada a este ponto, como por exemplo um controle de variação horária ou diária na cota da seção, como é o caso da Régua 11 de Itaipu.

Como no cadastro de usinas hidroelétricas não há dados específicos para as seções de rio, estas devem ser definidas nos arquivos de entrada dos modelos do projeto DESSEM. Os dados necessários para a definição das seções de rio são descritos na Tabela 3.1, conforme já explicado anteriormente na seção 2.1.1.

**Tabela 3.1 - Dados de entrada para a definição das seções de rio**

Dado	Notação	Localização
Número e nome da seção	-	Registros SR do arquivo ENTDAADOS.XXX
Lista de usinas situadas imediatamente à montante da seção		Registros SR do arquivo ENTDAADOS.XXX

### **3.2. Fornecimentos dos dados para representação do tempo de viagem**

Para a consideração do tempo de viagem nos modelos, é preciso informar uma série de informações, conforme descrito nas seções a seguir. Em cada tabela, as células hachureadas correspondem aos dados em si, enquanto as células não hachureadas referem-se à chave primária para a qual os dados se referem.

#### **3.2.1. Identificação dos trechos de rio para os quais se deve considerar o tempo de viagem da água**

Como mencionado anteriormente, o tempo de viagem é considerado ao longo de um trecho de rio em uma cascata, o qual pode estar compreendido entre duas usinas hidroelétricas ou entre uma usina hidroelétrica e uma seção de rio. Desta forma, o trecho de rio é identificado por um par de usinas hidroelétricas consecutivas na cascata ou por uma usina hidroelétrica e uma seção de rio imediatamente a jusante, conforme mostrado anteriormente na Figura 2.1. Os dados necessários para a identificação de forma unívoca de um trecho de rio para o qual deve ser considerado o tempo de viagem são listados na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 - Dados de entrada para a definição dos trechos de rio onde deverá ser considerado o tempo de viagem da água**

<b>Dado</b>	<b>Notação</b>	<b>Localização</b>
Identificação da usina de montante para o tempo de viagem		Registro TV do arquivo ENTDAADOS.XXX
Identificação do tipo de elemento de jusante para o tempo de viagem (usina hidroelétrica ou seção de rio)		Registro TV do arquivo ENTDAADOS.XXX
Identificação do número da usina hidroelétrica ou número da seção de rio de jusante para o tempo de viagem		Registro TV do arquivo ENTDAADOS.XXX

#### **3.2.2. Tipo de modelagem a ser adotada**

Para cada trecho de rio indicado na Tabela 3.2, deve-se indicar o tipo de modelagem desejado para o tempo de viagem da água, conforme as opções descritas anteriormente nas seções 2.2.1. Este dado é mostrado na Tabela 3.3.



Tabela 3.3 - Definição do tipo de modelagem do tempo de viagem da água

Dado	Notação	Localização
Identificação da usina de montante para o tempo de viagem		Registro TV do arquivo ENTDAADOS.XXX
Identificação do tipo de elemento de jusante para o tempo de viagem (usina hidroelétrica ou seção de rio)		Registro TV do arquivo ENTDAADOS.XXX
Identificação do número do elemento de jusante para o tempo de viagem		Registro TV do arquivo ENTDAADOS.XXX
Tipo de modelo adotado para esse tempo de viagem (0: sem tempo de viagem; 1:translação; 2: curva de propagação)		Registro TV do arquivo ENTDAADOS.XXX

### 3.2.3. Valores de tempo de viagem

Em seguida, para cada trecho definido na Tabela 3.2, deve-se informar o valor de tempo de viagem para este trecho, conforme mostra a Tabela 3.4. Ressalta-se que, caso o tempo de viagem para o trecho de rio em questão seja modelado por translação, o tempo de viagem  $\tau_{ij}$  corresponderá a esse tempo de viagem fixo. Se a modelagem do tempo de viagem for feita por curva de propagação, o valor de  $\tau_{ij}$  corresponderá ao tempo de viagem máximo  $\tau_{ij\max}$  descrito na seção 2.2.3.

Tabela 3.4 - Fornecimento do valor de tempo de viagem para cada trecho de rio onde deverá ser considerado o tempo de viagem da água

Dado	Notação	Localização
Identificação da usina de montante para o tempo de viagem		Registro TV do arquivo ENTDAADOS.XXX
Identificação do tipo de elemento de jusante para o tempo de viagem (usina hidroelétrica ou seção de rio)		Registro TV do arquivo ENTDAADOS.XXX
Identificação do número da usina hidroelétrica ou número da seção de rio de jusante para o tempo de viagem		Registro TV do arquivo ENTDAADOS.XXX
Tempo de viagem da água (fixo ou máximo) entre os pontos de montante e jusante ( $h$ )	$\tau_{ij}$	Registro TV do arquivo ENTDAADOS.XXX

### 3.2.4. Dados das curvas de propagação

Finalmente, para os trechos de rio cuja consideração do tempo de viagem será feita por meio de uma curva de propagação, devem ser fornecidos os coeficientes dessa curva, para os instantes de tempo desde  $t=1$  até  $t = \tau_{ij \max}$

Para maior praticidade no fornecimento destes dados, os percentuais devem ser fornecidos em valores acumulados, para que possam ser obtidos diretamente por consulta ao gráfico da curva de propagação (vide Figura 2.4), conforme mostrado na Tabela 3.5 a seguir:

**Tabela 3.5 - Fornecimento dos fatores acumulados da curva de propagação do tempo de viagem da água**

Dado	Notação	Localização
Identificação da usina de montante para o tempo de viagem		Registros do arquivo CURVTV.DAT
Identificação do tipo de elemento de jusante para o tempo de viagem (usina hidroelétrica ou seção de rio)		Registros do arquivo CURVTV.DAT
Identificação do número da usina hidroelétrica ou número da seção de rio de jusante para o tempo de viagem		Registros do arquivo CURVTV.DAT
Valor do tempo de viagem ( $h$ )		Registros do arquivo CURVTV.DAT
% acumulado das águas defluídas de montante que chegam ao ponto de jusante até a hora indicada no campo anterior		Registros do arquivo CURVTV.DAT

### 3.2.5. Defluências anteriores ao início do estudo

Como condição de contorno inicial para a modelagem do tempo de viagem da água, é necessário que o usuário informe o conjunto de defluências anteriores ao início do estudo realizadas pelas usinas de montante, as quais chegam à usina hidroelétrica (ou seção de rio) no horizonte de estudo. Estes dados, discriminados na Tabela 3.6 a seguir, devem ser informados no arquivo DEFLANT.XXX.

Tabela 3.6 - Fornecimento das defluências das usinas de montante anteriores ao início do estudo.

Dado	Notação	Localização
Identificação da usina de montante para o tempo de viagem	-	Registros do arquivo DEFLANT.XXX
Identificação do tipo de elemento de jusante para o tempo de viagem (usina hidroelétrica ou seção de rio)	-	Registros do arquivo DEFLANT.XXX
Identificação do número da usina hidroelétrica ou número da seção de rio de jusante para o tempo de viagem	-	Registros do arquivo DEFLANT.XXX
Janela de tempo (instantes de início e fim, no formato “d/h/mh”)	-	Registros do arquivo DEFLANT.XXX
Vazão defluente (turbinamento + vertimento) da usina de montante ao longo da janela de tempo considerada ( $m^3/s$ ).	-	Registros do arquivo DEFLANT.XXX

### 3.3. Validação e Processamento dos Dados

As validações e consistência dos dados de tempo de viagem realizadas pelo modelo são relacionadas a seguir:

- o trecho de rio indicado (seção 3.2.1) deve ser entre usinas existentes e consecutivas na cascata, ou entre uma usina hidroelétrica existente e uma seção de rio existente e situada imediatamente à jusante da usina;
- o valor do tempo de viagem (seção 3.2.2) deve ser maior do que zero e menor do que ZHORATV, indicado na tabela de dimensões máximas do Manual do Usuário [1];
- o tipo de modelagem (vide seção 3.2.3) deve ser 0, 1 ou 2;
- a validação e tratamento das curvas de propagação (seção 3.2.4) é descrita a seguir.

#### 3.3.1. Curvas de propagação

Para as curvas de propagação, dois procedimentos são realizados pelo modelo: validação dos dados e cálculo dos fatores horários das curvas de propagação.

#### Validação dos dados

As seguintes validações são realizadas:

**Relatório Técnico – 1006 / 11**

- é permitido fornecer uma curva de propagação para um trecho cuja modelagem desejada é do tipo 1. Entretanto, neste caso o modelo irá desprezar os valores intermediários da curva e irá considerar que toda a água chega por translação no instante  $t + \tau_{ij_{max}}$  ;
- os fatores devem ser fornecidos em intervalos mínimos de 1 hora;
- os fatores devem ser positivos e estar em ordem crescente com os valores de hora.

**Cálculo dos fatores horários da curva de propagação**

A partir dos fatores validados, prossegue-se ao cálculo dos coeficientes horários da curva de propagação. Dois exemplos de cálculo são mostrados na Tabela 3.7 e Tabela 3.8 a seguir. Na primeira tabela, os fatores para todas as horas entre  $\tau_{ij_{min}}$  e  $\tau_{ij_{max}}$  foram fornecidos pelo usuário. No segundo caso, alguns fatores não foram fornecidos, e o modelo teve que fazer uma interpolação para obter os coeficientes para cada hora, conforme será discutido na seqüência.

**Tabela 3.7 - Cálculo dos coeficientes horários da curva de propagação: exemplo sem interpolação.**

Valores fornecidos pelo usuário		Valores obtidos pelo modelo	
Tempo de viagem ( $\tau_{ij}$ ): 7 h		$\tau_{ij_{min}} = 3h; \tau_{ij_{max}} = 6h$	
Curva		Coeficientes horários calculados para a curva	
$t$ (h)	% acumulado	$t$ (h)	% que chega nessa hora
1	0	1	0
2	0	2	0
3	20	3	20
4	50	4	30
5	90	5	40
6	90	6	0
7	100	7	10

**Tabela 3.8 - Cálculo dos coeficientes horários da curva de propagação:  
exemplo com interpolação**

Valores fornecidos pelo usuário		Valores obtidos pelo modelo	
Tempo de viagem ( $\tau_{ij}$ ): 6 h		$\tau_{ij_{\min}} = 3h$ ; $\tau_{ij_{\max}} = 6h$	
Curva		Coeficientes horários calculados para a curva	
t (h)	% acumulado	t (h)	% que chega nessa hora
1	0	1	0
2	10	2	10
5	70	3	30
7	100	4	50
		5	70
		6	85
		7	100

Para estes cálculos, são adotadas as seguintes hipóteses pelo modelo

- permite-se que o usuário não forneça fator para determinada hora. Neste caso, o “buraco” existente na tabela de dados será preenchido através de interpolação linear, como realizado entre as horas 2 e 5 e entre as horas 5 e 7 da e Tabela 3.8;
- caso o usuário não deseje que o modelo faça a interpolação descrita no item anterior, deve ser fornecido explicitamente um percentual igual a zero, como realizado para a hora 6 da Tabela 3.7;
- para indicar que o tempo mínimo de viagem vale  $\tau_{ij_{\min}}$ , o usuário deverá fornecer valores zero para todos os instantes de tempo entre  $t = 0$  e  $t = \tau_{ij_{\min}} - 1$ , como realizado para as horas 1 e 2 da Tabela 3.7 e para a hora 1 da Tabela 3.8.

#### 4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA MODELAGEM DO TEMPO DE VIAGEM DA ÁGUA

Nesta seção, apresenta-se a formulação matemática da modelagem do tempo de viagem da água. Conforme mencionado anteriormente, esta modelagem comporta as seguintes variantes:

- consideração do tempo de viagem da água entre duas usinas hidroelétricas (vide Figura 2.1) ou entre uma usina hidroelétrica e uma seção de rio;
- representação do tempo de viagem por translação (seção 2.2.2) ou por curva de propagação (seção 2.2.3).

A modelagem do tempo de viagem envolve as seguintes etapas:

- cálculo *a priori*, para cada período de tempo IPER da discretização temporal, dos fatores de participação das defluências da usina de jusante nos períodos IPERANT anteriores a IPER. Observa-se que o número de períodos anteriores pode ser variável em relação ao período IPER, devido a:
  - adoção de uma discretização temporal não uniforme do modelo;
  - utilização das curvas de propagação para o tempo de viagem;
  - condições de contorno no início do estudo,

Estas questões serão detalhadas mais adiante.

- modelagem, nas equações de balanço hídrico do problema de programação linear, da defasagem entre as defluências da usina de montante e a chegada da água nos pontos de jusante;
- para o modo de resolução por decomposição de Benders: consideração das defluências da usina de montante anteriores a cada período IPER como variáveis de estado na função de custo futuro ao final do estágio correspondente, e ajustes na construção e utilização dos cortes de Benders.

Os três itens mencionados acima serão discutidos nas seções seguintes.

#### 4.1. Cálculo *a priori* dos fatores de participação para tempo de viagem

Mesmo que se considere a modelagem do tempo de viagem por translação, a possibilidade de adoção de períodos de tempo com durações distintas ao longo do horizonte de estudo faz com que o número de *lags*<sup>1</sup> passados e os fatores de participação de cada *lag* possam ser variáveis para cada período. Ressalta-se que os “fatores de participação” tratados nesta seção não se referem aos fatores da curva de propagação tratados nas seções 3.2.4 e 3.3.1, os quais se constituem uma característica do trecho de rio entre os pontos de montante e jusante. Nesta seção os fatores de participação se referem **aos fatores de acoplamento temporal entre os períodos de tempo do horizonte de estudo**, para os trechos de rio onde o tempo de viagem é considerado.

Conforme será visto nas próximas seções, independente do tipo de modelagem adotado para o tempo de viagem (por translação ou por curva de propagação), estes fatores se aplicarão de forma semelhante ao problema de otimização multi-período, embora naturalmente a forma de cálculo dos fatores será diferente em ambos os casos.

Para facilitar o entendimento, o cálculo dos fatores será exemplificado para quatro casos distintos, descritos na seqüência. Algumas definições se fazem necessárias, já que serão utilizadas ao longo de todo este capítulo:

- **IPER**: índice de cada período de tempo na discretização, tendo como referência a chegada da água (afluência) ao ponto de jusante;
- **IPERANT**: índice de cada período de tempo anterior a IPER na discretização, tendo como referência o instante de saída da água (defluência) da usina de montante.;
- **t**: instante de tempo ao longo do horizonte de estudo, medido em horas, tendo como referência a chegada da água ao ponto de jusante. Cada período IPER pode compreender diversos valores de *t*;

---

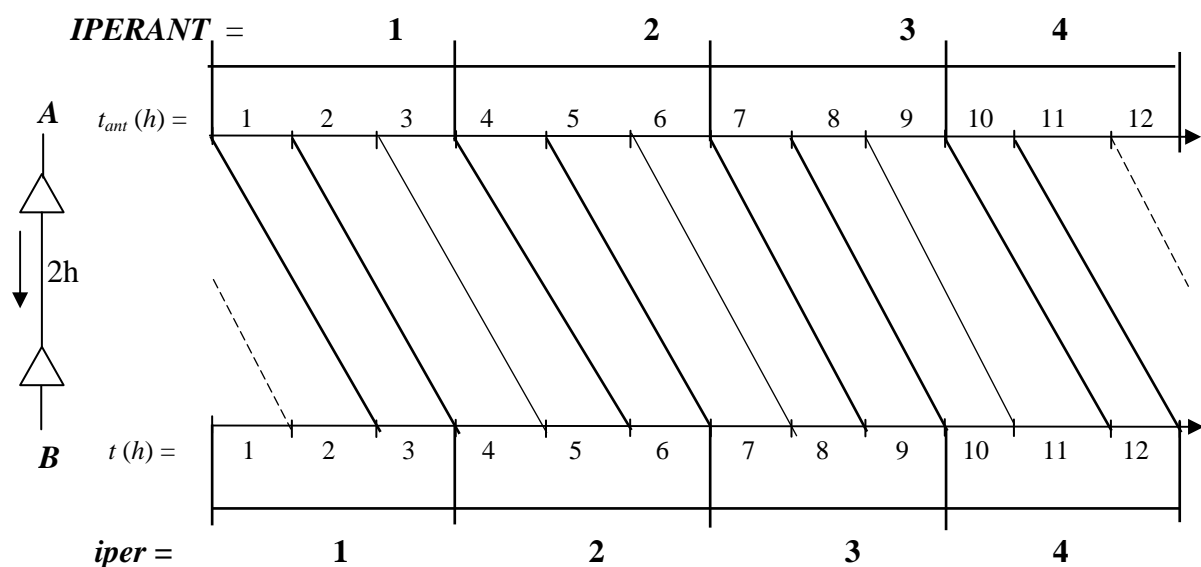
<sup>1</sup> neste documento, denomina-se *lag* a defasagem ocorrida devido ao tempo de viagem. Assim, “número de *lags*” significa o número de períodos de tempo de defasagem entre a defluência da água na usina de montante e a chegada da água na usina de jusante.

➤  $t_{ant}$ : instante de tempo ao longo do horizonte de estudo, medido em horas, tendo como referência a saída da água do ponto de montante. Cada período IPERANT pode compreender diversos valores de  $t_{ant}$ ;

#### 4.1.1. Tempo de viagem de translação

##### 4.1.1.1. Discretização temporal uniforme

Neste caso mais simples, todos os períodos de tempo possuem a mesma duração. Considerando por exemplo um tempo de viagem de duas horas e períodos de tempo de três horas, o acoplamento temporal entre as defluências de montante e a chegada da água a jusante se dará conforme ilustrado na Figura 4.1.



**Figura 4.1 - Representação do acoplamento temporal ao longo do horizonte de estudo – exemplo para discretização temporal uniforme e tempo de viagem por translação.**

Nesta figura, os traçados indicam o caminho da água de montante até jusante. Os traços mais grossos destacam as linhas que partem do início de um período em montante ou chegam ao início de um período em jusante. Estes instantes são importantes para definir a fração da água defluída no ponto de montante em cada período IPERANT que chega a jusante em cada período IPER.

Acompanhando os traçados das linhas, verifica-se que o número de lags ( $NLAG$ ), índice dos períodos anteriores associados a esses lags (IPERANT) e os fatores para cada lag (FATLAG)



para os períodos  $IPER = 2$  a  $4$  de chegada da água a jusante assumem os valores mostrados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 - Cálculo dos fatores de participação de cada lag – exemplo com discretização uniforme e tempo de viagem por translação.**

IPER	NLAG	IPERANT	$t_{ant}$	FATLAG
2	2	2	2	1/3
		1	1	2/3
3	2	3	3	1/3
		2	2	2/3
4	2	4	4	1/3
		3	3	2/3

Por exemplo, para o período  $IPER=3$ , são dois os períodos em que a usina de montante defluiu água que chega nesse período (portanto,  $NLAG = 2$ ). O primeiro período anterior é o próprio período  $IPERANT = 3$ , já que  $1/3$  da água defluída por  $A$  nesse período chega em  $B$  no mesmo instante. O segundo período anterior é  $IPERANT = 2$ , sendo que  $2/3$  do volume de água defluído por  $A$  nesse período chega a  $B$  em  $IPER = 3$ . Assim, os índices desses dois lags anteriores são  $\{3,2\}$  (em ordem cronológica reversa) com fatores  $1/3$  e  $2/3$ , respectivamente. Ressalta-se que a soma desses fatores não necessita ser igual a 1, pois esses fatores não indicam o percentual da água em  $IPER$  que foi defluído em cada instante  $IPERANT$ , mas sim o percentual da água defluída em cada período  $IPERANT$  que chega a jusante no período  $IPER$ . Isto ficará mais claro nos exemplos posteriores, onde se adota uma discretização temporal não uniforme.

Para os primeiros instantes de tempo do primeiro período ( $t=1$  a  $t=2$ ), o volume de água que chega a jusante já foi defluído pela usina de montante em instantes de tempo anteriores ao início do estudo. Esta questão será vista com detalhes na seção 0. Além disso, para os últimos instantes de tempo do último período (por exemplo, de  $t = 11$  e  $t = 12$ ), as defluências de montante não chegam à usina de jusante antes do final do horizonte de estudo. Esta questão será discutida na seção 4.3.

4.1.1.2. Discretização temporal não uniforme

Neste segundo exemplo, a modelagem do tempo de viagem ainda será por translação, mas será considerada uma discretização temporal não uniforme. O acoplamento entre os pontos de jusante e montante ao longo do horizonte de estudo nesta nova situação é ilustrada na Figura 4.2, e os fatores de propagação calculados pelo modelo são mostrados na Tabela 4.2.

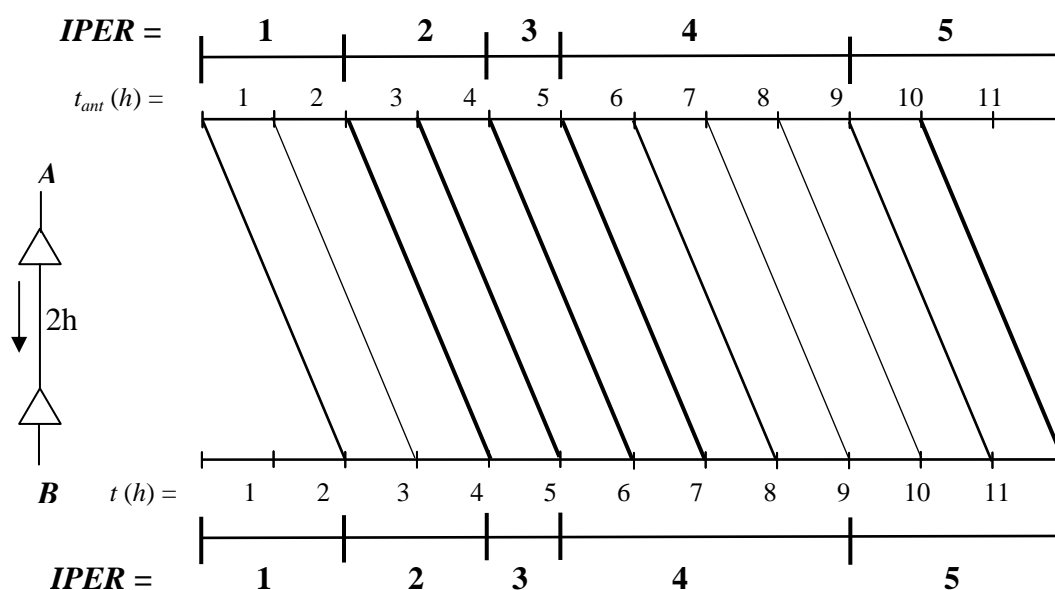


Figura 4.2 - Representação do acoplamento temporal ao longo do horizonte de estudo – exemplo para discretização temporal não uniforme e tempo de viagem por translação.

Tabela 4.2 - Fatores de participação de cada lag – exemplo com discretização não uniforme e tempo de viagem por translação.

IPER	NLAG	IPERANT	$t_{ant}$	FATLAG
2	1	1	1 e 2	1
3	1	2	3	1/2
4	3	4	6 e 7	1/2
		3	5	1
		2	4	1/2
5	2	5	10	1/3
		4	8 e 9	1/2

Observe que, neste exemplo, os três fatores associados a  $IPER = 4$  não somam 1, pois se referem a percentuais associados a períodos de tempo diferentes. O que deve ser igual a 1 é a soma dos fatores associados ao mesmo valor de IPERANT, como por exemplo os fatores

**Relatório Técnico – 1006 / 11**

associados a  $IPERANT = 2$  (metade chegando em  $IPER = 3$  e metade chegando em  $IPER = 4$ ) e a  $IPERANT = 3$  (100% chegando em  $IPER = 4$ ).

**4.1.2. Tempo de viagem por curva de propagação**

Nesta seção, será detalhado o cálculo dos fatores dos lags anteriores para tempo de viagem, quando se utiliza uma curva de propagação, conforme descrito na seção 2.2.3. Para o exemplo, será considerado um tempo de viagem de três horas, cuja curva de propagação horária é dada pela Tabela 4.3 a seguir:

**Tabela 4.3 - Fatores da curva horária de propagação para o exemplo desta seção.**

Lag (hora)	1	2	3
Fator (% de água que chega a jusante)	50%	40%	10%

Na prática, o modelo transforma esses percentuais em fatores para cada meia-hora futura, já que os modelos comportam uma discretização temporal de múltiplos de meia hora. Nesta seção, para facilitar o entendimento, serão mantidos os fatores horários.

**4.1.2.2. Discretização temporal uniforme**

No tempo de viagem por curva de propagação, considera-se um esquema semelhante ao da Figura 4.1 para cada hora de defasagem da curva de propagação, com a diferença de que apenas a parcela do volume defluente correspondente a esta hora (conforme indicado na Tabela 4.3) chega ao ponto de jusante. Desta forma, os volumes afluentes para o ponto de jusante proveniente da usina de montante são calculados pela soma dos volumes de água referentes a cada hora de defasagem da curva. A Figura 4.3 a seguir mostra, individualmente, o esquema de traslado da água para as horas de defasagem de 1 a 3 no caso exemplo, e a Figura 4.4 mostra a composição final considerando a superposição das águas que chegam simultaneamente em cada período, provenientes das várias horas anteriores.

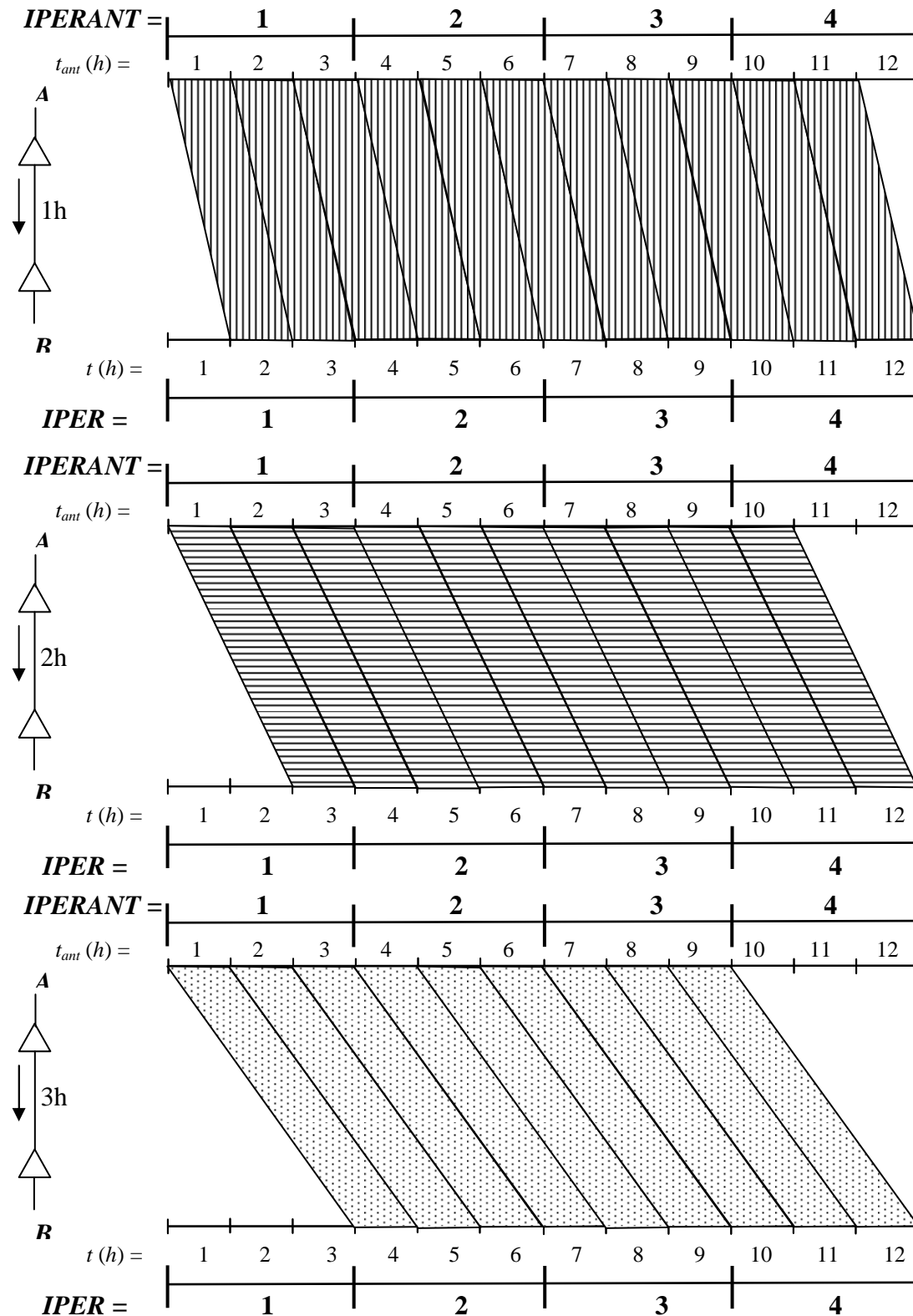


Figura 4.3 - Detalhamento das parcelas do acoplamento temporal para o tempo de viagem por curva de propagação.

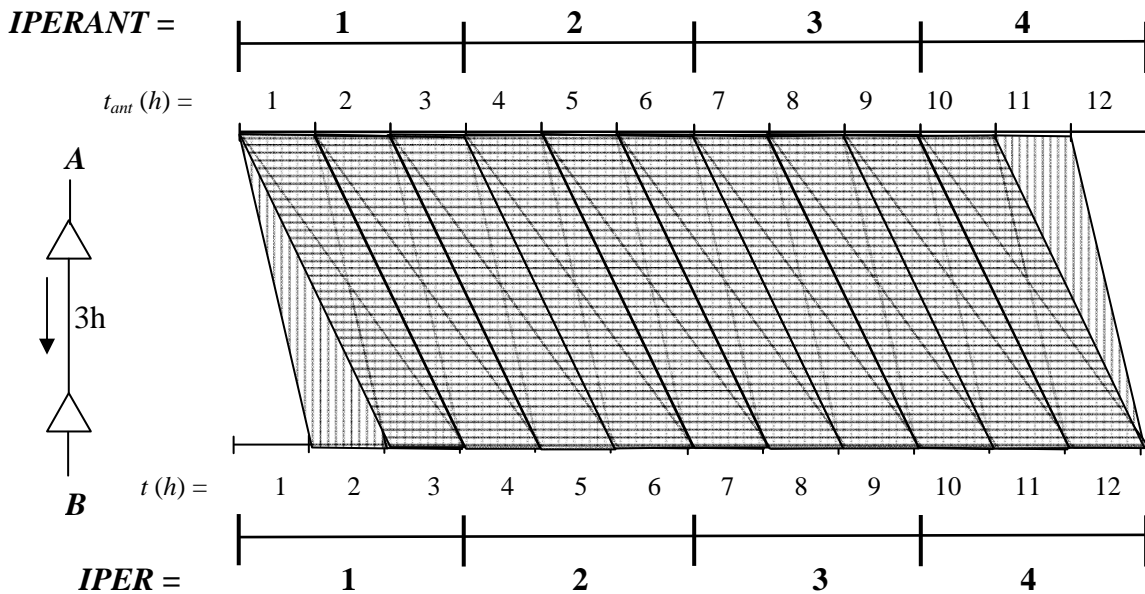


Figura 4.4 - Composição final para representação do acoplamento temporal – exemplo para discretização uniforme e tempo de viagem por curva de propagação.

O cálculo dos fatores de propagação para cada período IPER, e cada hora  $t_{ant}$  que compõe cada período anterior IPERANT é mostrado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Cálculo dos fatores para cada lag – discretização uniforme e tempo de viagem por curva de propagação.

IPER	NLAG	IPERANT	$t_{ant}$	FATLAG
2	2	2	5	$0,5 \times 1/3$
			4	$0,5 \times 1/3 + 0,4 \times 1/3$
		1	3	$0,5 \times 1/3 + 0,4 \times 1/3 + 0,1 \times 1/3$
			2	$0,4 \times 1/3 + 0,1 \times 1/3$
			1	$0,1 \times 1/3$
3	2	3	8	$0,5 \times 1/3$
			7	$0,5 \times 1/3 + 0,4 \times 1/3$
		2	$0,5 \times 1/3 + 0,4 \times 1/3 + 0,1 \times 1/3$	

IPER	NLAG	IPERANT	$t_{ant}$	FATLAG
			5	$0,4 \times 1/3 + 0,1 \times 1/3$
			4	$0,1 \times 1/3$
4	2	2	11	$0,5 \times 1/3$
			10	$0,5 \times 1/3 + 0,4 \times 1/3$
		1	9	$0,5 \times 1/3 + 0,4 \times 1/3 + 0,1 \times 1/3$
			8	$0,4 \times 1/3 + 0,1 \times 1/3$
			7	$0,1 \times 1/3$

Considere como exemplo o período IPER=3. Este período compreende desde  $t = 7$  até  $t = 9$ . A primeira hora anterior que contribui para esse período é  $t_{ant} = 4$ , calculado pela diferença entre a primeira hora do período (7) e a defasagem horária máxima (3). A última hora anterior que contribui para esse período é  $t_{ant} = 8$ , calculado pela diferença entre a última hora do período (9) e a defasagem horária mínima (1). O cálculo dos fatores para dois valores de  $t_{ant}$  relacionados a este período IPER =3 é detalhado a seguir:

- **$t_{ant} = 7$ , localizado em IPERANT = 3:** a vazão defluente nesta hora corresponde a 1/3 da vazão total defluente em todo o período IPERANT = 3, pois corresponde à proporção da duração desta hora em relação a duração total do período a que pertence. Desta vazão defluente nesta hora, 50% chega em  $t = 8$  e 40% chega em  $t=9$ , ambos os instante de tempo pertencentes ao período IPER. Observe que os 10% que chegam em  $t=10$  não devem ser computados, pois este instante de tempo pertence a IPER = 4, e estamos calculando os fatores para IPER = 3;
- **$t_{ant} = 6$ , localizado em IPERANT = 2:** A vazão defluente nesta hora corresponde a 1/3 da vazão total defluente em todo o período 2. Desta vazão defluente, 50% chega em  $t = 7$ , 40% chega em  $t=8$  e 10% chega em  $t=9$ . Todos esses instantes de tempo pertencem ao período IPER.

**Relatório Técnico – 1006 / 11**

Realizando-se o mesmo tipo de cálculo para cada período IPER, cada período anterior IPERANT e cada hora anterior  $t_{ant}$ , e somando todos os fatores pertencentes ao mesmo período IPERANT, obtêm-se os fatores de propagação para cada par de períodos IPER / IPERANT ao longo do horizonte de estudo, cujos valores são mostrados na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 - Composição final dos fatores considerando a superposição de todos os lags – discretização uniforme e tempo de viagem por curva de propagação.**

IPER	NLAG	IPERANT	$t_{ant}$	FATLAG
2	2	2	4 e 5	7/15
		1	1 a 3	8/15
3	2	3	7 e 8	7/15
		2	4 a 6	8/15
4	3	4	10 e 11	7/15
		3	7 a 9	8/15

Observe que, como se utilizou uma discretização temporal uniforme, o valor de NLAG e o vetor de valores de FATLAG é o mesmo para cada período IPER.

**4.1.2.3. Discretização temporal não uniforme**

Para uma discretização temporal não uniforme, o procedimento é semelhante ao da discretização uniforme, com a diferença de que o número de lags (NLAG) o vetor de fatores (FATLAG) para as horas anteriores não serão os mesmos para todos os períodos.

A composição final do acoplamento entre períodos para a modelagem do tempo de viagem por curva de propagação e a mesma discretização não uniforme considerada na Figura 4.2 é mostrada na Figura 4.5. O cálculo dos fatores das horas anteriores  $t_{ant}$  de cada período anterior IPERANT em cada período IPER é mostrada na Tabela 4.6, e a composição final para obtenção dos fatores em cada par IPER / IPERANT é mostrada na Tabela 4.7.

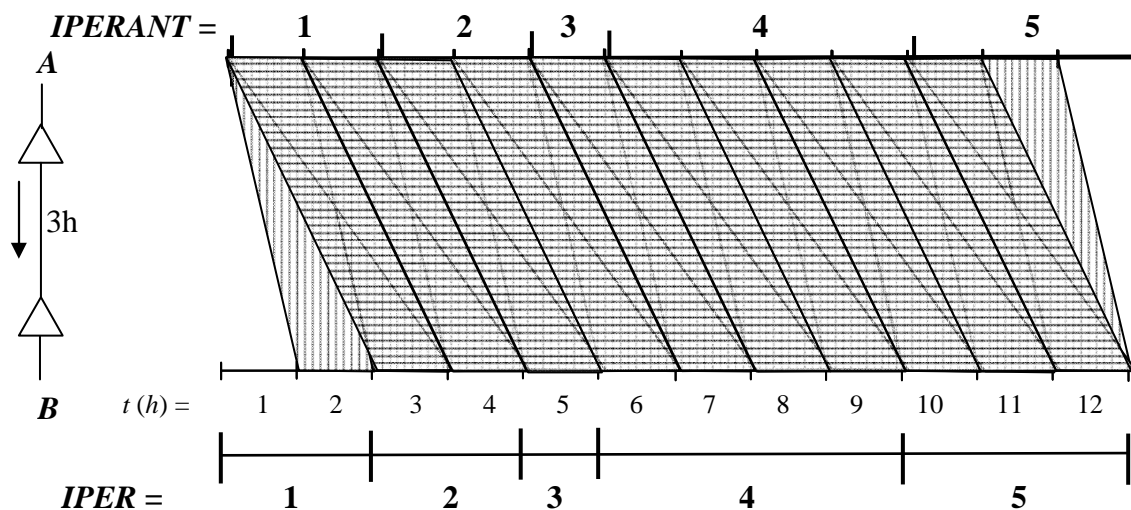


Figura 4.5 - Representação do acoplamento temporal ao longo do horizonte de estudo – exemplo para discretização temporal não uniforme e tempo de viagem por curva de propagação.

Tabela 4.6 - Cálculo dos fatores para cada lag – discretização não uniforme e tempo de viagem por curva de propagação.

IPER	NLAG	IPERANT	$t_{ant}$	FATLAG
2	3	2	3	$0,5 \times 1/2$
		1	2	$0,5 \times 1/2 + 0,4 \times 1/2$
			1	$0,4 \times 1/2 + 0,1 \times 1/2$
		-1	-1	$0,4 \times 1/1 *$
3	2	2	4	$0,5 \times 1/2$
			3	$0,4 \times 1/2$
		1	2	$0,1 \times 1/2$
4	3	4	8	$0,5 \times 1/4$
			7	$0,5 \times 1/4 + 0,4 \times 1/4$
			6	$0,5 \times 1/4 + 0,4 \times 1/4 + 0,1 \times 1/4$
		3	5	$0,5 \times 1/1 + 0,4 \times 1/1 + 0,1 \times 1/1$



IPER	NLAG	IPERANT	$t_{ant}$	FATLAG
		2	4	$0,4 \times 1/2 + 0,1 \times 1/2$
			3	$0,1 \times 1/2$
5	2	5	11	$0,5 \times 1/3$
			10	$0,5 \times 1/3 + 0,4 \times 1/3$
		4	9	$0,5 \times 1/4 + 0,4 \times 1/4 + 0,1 \times 1/4$
			8	$0,4 \times 1/4 + 0,1 \times 1/4$
			7	$0,1 \times 1/4$

**Tabela 4.7 - Composição final dos fatores considerando a superposição de todos os lags – discretização não uniforme e tempo de viagem por curva de propagação.**

IPER	NLAG	IPERANT	$t_{ant}$	FATLAG
2	3	2	3	1/4
		1	2	7/10
		-1	-1	0,4
3	2	2	4	9/20
		1	3	1/20
4	3	4	6 a 8	6/10
		3	5	1
		2	3 e 4	3/10
5	2	5	10 e 11	7/15
		4	7 a 9	4/10

Note que, neste caso com discretização não uniforme, o valor de NLAG e o vetor de valores de FATLAG não são os mesmos para cada período IPER, ao contrário do que havia acontecido na Tabela 4.5 para a discretização uniforme.

#### 4.2. Fatores de participação para as defluências anteriores ao início do estudo

Nos exemplos anteriores, omitiram-se os cálculos para IPER = 1 porque as defluências que chegam neste período são quase todas correspondentes a instantes  $t_{ant}$  anteriores ao horizonte de estudo, as quais **já são conhecidas**. Se estes instantes forem anteriores ao período de

simulação, essas vazões devem ser fornecidas pelo usuário em um arquivo específico de entrada (vide seção 3.2.5).

Para fins de cálculo dos fatores, considera-se que a discretização temporal anterior ao início do estudo é de meia-hora, uma vez que este é o intervalo de tempo mínimo considerado no arquivo DEFLANT.XXX para realizar mudanças nos valores de defluência ao longo do horizonte de tempo anterior ao início do estudo.

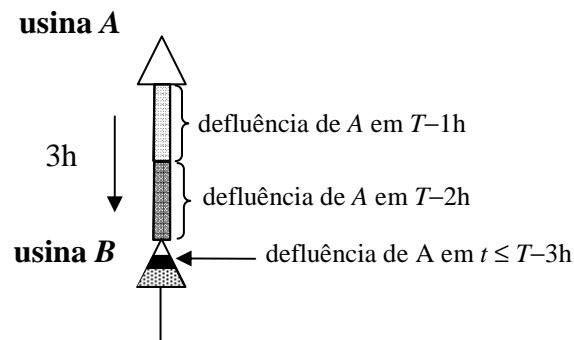
#### 4.3. Condição de contorno para o final do horizonte de estudo

Próximo ao final do horizonte de estudo, as vazões defluentes por uma usina de montante *A* com tempo de viagem não chegam à usina de jusante *B* antes do final do estudo. Portanto, este volume de água “some” da formulação do problema, pois sai da usina *A* sem que tenha chegado à usina *B*. Isto causa um problema na contabilização do valor da água desta vazão defluente de montante, já que o modelo enxerga o aumento do custo de operação ao se perder água na usina de montante, mas não enxerga a parcela de diminuição do custo de operação ocorrida ao se aumentar o volume armazenado na usina *B* (ou, se esta usina for a fio d’água, no próximo reservatório de jusante na cascata).

A consequência disso é que o modelo tenderá a evitar defluências das usinas de montante com tempo de viagem para jusante nos períodos posteriores a  $T - \tau$ , onde  $\tau$  é o tempo de viagem entre as usinas. Mesmo havendo benefício em turbinar a água em montante, a ausência da parcela referente ao aumento do volume armazenado a jusante na função de custo futuro pode fazer com que o valor da água defluente se torne muito alto. Este problema somente não ocorrerá nas seguintes situações:

- se não houver mais nenhum reservatório na cascata à jusante da usina de montante para o tempo de viagem considerado;
- se o tempo de viagem tiver sido considerado no modelo de otimização de curto prazo (DECOMP). Neste caso, a função de custo futuro (FCF) de acoplamento entre os modelos DECOMP e DESSEM conterà alguns termos referentes à vazão defluente da usina de montante, fruto do processo de decomposição de Benders realizado pelo modelo DECOMP.

Na prática, no instante final do estudo, a água defluída pela usina A se localiza na calha do rio entre as usinas A e B, e chegará, inevitavelmente, à usina de jusante no futuro bem próximo<sup>1</sup>, conforme ilustra a Figura 4.6. Portanto, para fins de avaliação do custo futuro de operação, pode-se contabilizar esta água como armazenada na usina B.



**Figura 4.6 - Esquema ilustrativo da condição do sistema entre as usinas A e B, no instante final do horizonte de estudo (exemplo para tempo de viagem de 3 horas).**

Portanto, uma forma de atenuar esse problema é adicionar, apenas para fins de acoplamento com a FCF do DECOMP, esse volume de água que está na calha do rio ao volume armazenado da usina B na função de custo futuro. Ou seja, em todas as restrições operativas do problema para o instante  $T$ , será considerado o volume real da usina de jusante no final desse instante, porém na composição do custo futuro de operação o coeficiente referente ao armazenamento nesta usina multiplicará também o volume que se encontra na calha do rio.

Esta proposta de acoplamento temporal para usinas com tempo de viagem consideradas somente no modelo DESSEM-PAT ainda não foi implementada na versão 7.0 do modelo DESSEM-PAT, mas pretende-se incluí-la no modelo no futuro.

#### **4.4. Consideração do tempo de viagem nos subproblemas de programação linear – modo PL-Único**

Nesta seção, descrevem-se os ajustes necessários na formulação matemática do problema para consideração do tempo de viagem da água entre duas usinas hidroelétricas (seção 4.4.1) e o tempo de viagem entre uma usina hidroelétrica e uma seção de rio (seção 4.4.3). Como a entidade “seção de rio” foi introduzida recentemente no modelo DESSEM-PAT, a partir da

<sup>1</sup> Considera-se como hipótese que, se esse tempo de viagem fosse grande, teria sido considerado no modelo DECOMP e este problema no acoplamento não ocorreria.

implementação do tempo de viagem por propagação, descreve-se na seção 4.4.2 como foi feita a modelagem desse tipo de elemento nos modelos SIMHIDR e DESSEM-PAT.

#### 4.4.1. Modelagem do tempo de viagem entre duas usinas hidroelétricas

No problema linear (PL) resolvido pelos modelos SIMHIDR / DESSEM-PAT, o tempo de viagem é considerado através da defasagem dos termos de turbinamento e vertimento das usinas de montante nas equações de balanço hídrico de montante e jusante. Ou seja, se  $v_{ij}^t$  é o número de lags entre  $i$  e  $j$  para o período  $t$ , teremos que, em cada período  $t$ , a usina de jusante  $i$  “perde” a água defluida por ela no mesmo período, mas recebe a vazão defluida pela usina de montante  $j$  nos períodos  $t, t-1, t-2, \dots, t-k_{ij}$ , multiplicadas pelos fatores correspondentes a cada lag, calculadas conforme descrito nas seções 4.1 e 0.

A equação (4.1) mostra o balanço hídrico de uma usina de jusante  $i$ , que pode ter várias usinas a montante, sendo um subconjunto delas sem tempo de viagem ( $M_i$ ) e um subconjunto delas com tempo de viagem ( $M_{TV_i}$ ). Para fins de simplicidade, foram ignorados diversos termos, como evaporação, retiradas de água, etc.

$$V_i^{t+1} = V_i^{t+1} + I_i^t - Q_i^t - S_i^t + \underbrace{\sum_{j \in M_i} (Q_j^t + S_j^t)}_{\text{defluências das usinas de montante SEM tempo de viagem}} + \underbrace{\sum_{j \in M_{TV_i}} k_{ij}^{t,t-\tau} (Q_j^{t-\tau_{ji}} + S_j^{t-\tau_{ji}})}_{\text{defluências das usinas de montante COM tempo de viagem}} \quad (4.1)$$

Cada termo  $k_{ij}^{t,t-\tau}$  corresponde ao fator de participação de cada período anterior (referenciado como IPERANT nas seções anteriores) ao período  $t$  (referenciado como IPER nas seções anteriores) para o tempo de viagem entre as usinas  $i$  e  $j$ . Estes fatores são mostrados na Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.5 e Tabela 4.7, para cada um dos exemplos considerados ao longo deste capítulo.

Caso o problema seja resolvido pelo método PL-Único, as vazões  $Q_j^{t-t_{ji}}$  e  $S_j^{t-t_{ji}}$  podem ser variáveis de decisão do PL ou valores conhecidos, fornecidos pelo usuário. No entanto, se o problema for resolvido por decomposição de Benders, cada variável  $Q_j^{t-t_{ji}}$  e  $S_j^{t-t_{ji}}$  que seja variável de decisão do problema como um todo (multi-período) pode ser uma variável de

decisão do próprio estágio  $E$  onde se encontra o período  $t$  ou de algum estágio anterior  $E-k$  anterior ao estágio  $E$ . Neste segundo caso, estas variáveis deverão ser consideradas convenientemente nos cortes de Benders construídos para se resolver o problema. Esta questão é discutida em [6], [7].

#### 4.4.2. Modelagem das seções de rio no problema de programação diária da operação

Esta seção descreve como é feita a modelagem da nova entidade – seção de rio - introduzida no modelo DESSEM-PAT a partir de sua versão 7.0. O objetivo principal da criação dessa entidade foi melhorar a representação da vazão na cota da régua 11 de Itaipu, permitindo a inclusão, de maneira mais fácil, da restrição de tempo de viagem por propagação entre Itaipu e a Régua 11. Além disso, permite-se que sejam adicionadas com mais facilidades restrições referentes a outras seções de rio, cuja necessidade de representação no modelo DESSEM-PAT possa surgir no futuro.

Adicionou-se à modelagem do problema de simulação ou otimização dos módulos SIMHIDR e DESSEM-PAT, respectivamente, variáveis associadas às vazões em seções de rio, denotadas por  $Q_{SRi}^t$ , onde  $i$  é o índice da seção e  $t$  o índice do tempo. Esta variável apresenta custo na função objetivo igual a zero, e limites inferior e superior iguais a zero e  $+\infty$ , respectivamente.

#### 4.4.3. Modelagem do tempo de viagem entre uma usina hidroelétrica e uma seção de rio

Para facilitar a modelagem da curva de propagação para o tempo de viagem da água para seções de rio, incluiu-se uma equação de balanço hídrico (ou conservação de água) para cada seção de rio em cada intervalo de tempo. A esta equação aplicam-se os coeficientes para tempo de viagem de água, de forma semelhante ao mostrado em (4.1). Estas equações são expressas por:

$$Q_{SRi}^t = \sum_{j=1}^{M_{SRi}} \sum_{\tau=0}^{\tau_{SRji}} \kappa_{SRji}^{\tau,t} (Q_j^{t-\tau} + S_j^{t-\tau}), \quad (4.2)$$

onde  $M_{SRi}$  é o conjunto de usinas hidroelétricas à montante da seção de rio  $i$ ,  $\tau_{SRji}$  é o tempo máximo de viagem entre a usina hidroelétrica  $j$  e a seção de rio  $j$ , e  $\kappa_{SRji}^{\tau}$  são os fatores de

propagação entre a usina hidroelétrica  $j$  e a seção de rio  $i$ , para o  $\tau$ -ésimo *lag* referente ao período  $t$ . Tais fatores são calculados com base na curva de propagação horária e na discretização temporal ao longo do horizonte de estudo, conforme descrito ao longo da seção 4.1.

## **5. RELATÓRIOS DE SAÍDA**

Não há relatórios de saída específicos para a modelagem do tempo de viagem da água. Os resultados de balanço hídrico das usinas hidroelétricas considerando-se o tempo de viagem da água são mostrados nos arquivos SIM\_OPERACAO, PDO\_OPERACAO, SIM\_HIDR e PDO\_HIDR.

Devido à representação de uma nova entidade “seção de rio” no modelo DESSEM-PAT, incluíram-se relatórios referentes ao eco dos dados e resultados de operação referentes a essa entidades, denominados respectivamente de ECO\_SECR.XXX e SIM/PDO\_SECR.XXX.

## 6. ESTUDO DE CASO

Nesta seção ilustra-se a utilização da funcionalidade de tempo de viagem da água nos módulos de otimização (SIMHIDR) e otimização do modelo DESSEM\_PAT, tomando-se como exemplo um estudo de caso com o modelo DESSEM-PAT, contendo ambos os horizontes de simulação e otimização.

### 6.1. Dados gerais do estudo

O estudo contém uma série de dados referentes à configuração do sistema e restrições operativas. Serão relacionados nesta seção apenas os dados referentes ao horizonte de estudo e discretização temporal para a simulação e otimização, os quais são necessários para o entendimento dos resultados da funcionalidade de enchimento de volume morto apresentados neste relatório. Os dados nos arquivos de entrada do modelo DESSEM-PAT referentes a estas informações são reproduzidos na Figura 6.1. A Tabela 6.1 mostra um resumo desses dados.

```

& DISCRETIZACAO DO ESTUDO
&
&X dd hr mh durac rede Patamar
& XX XX X XXXXX X
DISC
TM 31 0 0 2.0 LEVE
TM 31 2 0 2.0 MEDIA
TM 31 4 0 1.0 PESADA
TM 31 5 0 4.0 MEDIA
TM 31 9 0 3.0 LEVE
TM 31 12 0 12.0 MEDIA
FIM
TM 1 0 0 96.0 LEVE
    
```

**Figura 6.1 - Discretização temporal da simulação, à esquerda (bloco DISC do arquivo SIMUL.DAT) e da otimização, à direita (registros TM do arquivo ENTDAOS.XXX).**

**Tabela 6.1 - Dados resumidos do horizonte e discretização temporal.**

	Simulação	Otimização
Instante de Início	29/12/2009 – 00:00	31/12/2009 – 00:00
Instante de Término	31/12/2009 – 00:00	04/01/2010 – 00:00
Nº períodos	4	20
Duração dos períodos	12h cada	variável

Utilizou-se uma discretização um tanto quanto não usual para o módulo de otimização, porque se queria verificar a adequação da funcionalidade de tempo de viagem (em particular, o cálculo dos fatores de propagação) para situações onde:



**Relatório Técnico – 1006 / 11**

- Há muitos períodos com discretização curta (por exemplo, períodos 1 a 5 da otimização);
- Há períodos com duração muito longa (último período da otimização).

**6.2. Dados referentes a seções de rio**

Foram incluídos no arquivo ENTADADOS os registros SR mostrados na Figura 6.2, os quais definem duas seções de rio no problema:

- Seção de rio de número 11 e nome “Régua 11”, localizada à jusante das usinas Itaipu (66) e Salto Caxias (82), após a confluência entre os rios Paraná e Iguaçu. A composição da vazão nesta seção corresponde aos valores reais informados por Itaipu para a Régua 11: 1,03 para a usina de Itaipu e 1,17 para a usina de Salto Caxias;
- seção de rio de número 22 e nome “JUS\_SIMAVERM”, localizada à jusante das usinas de São Simão (33) e Água Vermelha (18). A vazão nesta seção corresponde à soma aritmética das vazões defluídas por ambas as usinas.

```

& Secoes de Rio
&
& Num Nome UH1 FAT1 UH2 FAT2 UH3 FAT3 UH4 FAT4 UH5 FAT5
&X XXX XXXXXXXXXXXXXXX XXX XXXXX XXX XXXXX XXX XXXXX XXX XXXXX
SR 011 REGUA11 066 1.03 082 1.17
SR 022 JUS_SIMAVERM 033 1.0 018 1.0
    
```

**Figura 6.2 - Registros SR incluídos no estudo, definindo seções de rio no problema.**

**6.3. Dados referentes ao tempo de viagem da água**

Foram incluídos no arquivo ENTADADOS registros TV definindo tempos de viagem da água para alguns pares “usina/usina” ou “usina/seção de rio” do sistema, conforme mostra a Figura 6.3. Estes registros definem os tempos de viagem no sistema mostrados na Tabela 6.2.

```

& Mont Jus Tpjus tij tipo
&X XXX XXX X XXX X
TV 006 007 H 5 1
TV 169 172 H 10 2
TV 033 022 S 10 1
TV 066 011 S 24 2
TV 018 034 H 3 2
TV 033 034 H 96 1
    
```

**Figura 6.3 - Registros TV definindo tempos de viagem ao longo de alguns pares de usinas / seções de rio nas cascatas.**

Tabela 6.2 - Tempos de viagem considerados no estudo

Índice do tempo de viagem	Elemento de montante	Elemento de jusante	Tempo de viagem máximo (horas)	Tipo de Modelagem
1	Usina 006 (Furnas)	Usina 007 (M. de Moraes)	5	translação
2	Usina 169 (Três Irmãos)	Usina 172 (Itaparica)	10	Curva de propagação
3	Usina 033 ( São Simão)	Seção de rio 22 (JUS_SIMAVERM)	10	Translação
4	Usina 066 (Itaipu)	Seção de rio 11 (Régua 11)	24	Curva de propagação
5	Usina 018 (A. Vermelha)	Usina 034 (I. Solt.)	3	Curva de propagação
6	Usina 033 ( São Simão)	Usina 034 (I. Solt.)	96	Translação

Observa-se que a defluência da usina de São Simão (33) possui tempo de viagem tanto para a seção de rio JUS\_SIMAVERM (22) como para a usina de Ilha Solteira (34). Além disso, a própria usina de Ilha Solteira recebe as defluências por tempo de viagem tanto da usina Água Vermelha (18) como da usina de São Simão. A Figura 6.4 ilustra a topologia nessa região. Ressalta-se que tanto a existência dessa seção de rio como os valores de tempos de viagem considerados nesse estudo são fictícios.

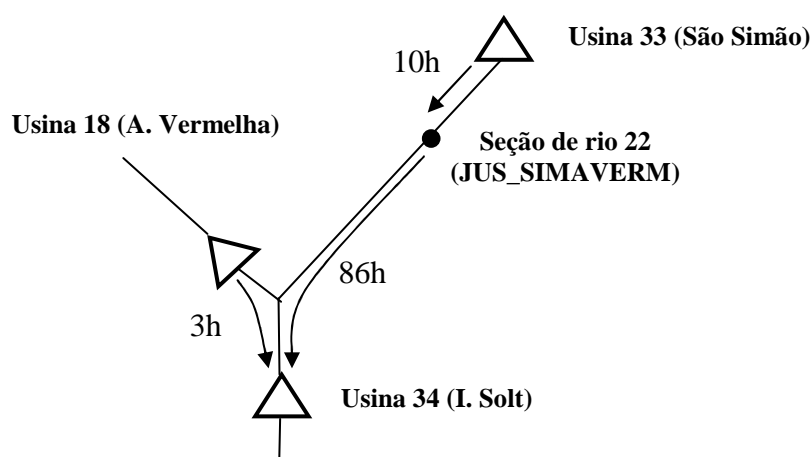


Figura 6.4 - Topologia da cascata envolvendo as usinas de Água Vermelha, Três Irmãos e Ilha Solteira, e a seção de rio JUS\_SIMAVERM.

### 6.4. Dados das curvas de propagação

Para os tempos de viagem de índice 2, 4 e 5 na Tabela 6.2, é preciso definir as curvas de propagação de vazões. Desta forma, foi introduzido um novo arquivo CURVTVIAG.DAT (cujo nome deve ser fornecido no arquivo índice DESSPAT.ARQ, vide [1]), cujos registros de dados são reproduzidos na Figura 6.5.

```

& Dados das curvas de propagação
&      Mont      Jus
&      Mont Jus TpJ      Hora      % Acum
&X      XXX  XXX  X      XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
CURVTV  066  011  S          1      10.0
CURVTV  066  011  S          2      21.0
CURVTV  066  011  S          3      30.0
CURVTV  066  011  S          4      37.0
CURVTV  066  011  S          5      44.0
CURVTV  066  011  S          6      50.0
CURVTV  066  011  S          7      56.0
CURVTV  066  011  S          8      62.0
CURVTV  066  011  S          9      67.0
CURVTV  066  011  S         10      72.0
CURVTV  066  011  S         11      77.0
CURVTV  066  011  S         12      81.0
CURVTV  066  011  S         13      85.0
CURVTV  066  011  S         14      89.0
CURVTV  066  011  S         15      92.0
CURVTV  066  011  S         16      93.0
CURVTV  066  011  S         17      93.5
CURVTV  066  011  S         18      94.0
CURVTV  066  011  S         19      95.0
CURVTV  066  011  S         20      96.0
CURVTV  066  011  S         21      97.0
CURVTV  066  011  S         22      98.0
CURVTV  066  011  S         23      99.0
CURVTV  066  011  S         24      100.0
CURVTV  169  172  H          2      60.0
CURVTV  169  172  H          5      84.0
CURVTV  169  172  H          7      94.0
CURVTV  169  172  H          8      94.0
CURVTV  169  172  H          9      97.0
CURVTV  169  172  H         10      100.0
CURVTV  018  034  H          1      50.0
CURVTV  018  034  H          2      90.0
CURVTV  018  034  H          3      100.0
    
```

**Figura 6.5 - Registros do arquivo CURVTVIAG.DAT, com os dados das curvas horárias de propagação para os tempos de viagem modelados dessa forma.**

Para o tempo de viagem entre Itaipu e a Régua 11, utilizaram-se os dados reais da curva de propagação mostrada na Figura 2.4. Após o processamento desses dados pelo modelo, as duas outras curvas de propagação apresentam os fatores semi-horários mostrados na Tabela 6.3 e Tabela 6.4. Note que, para obter os valores de meia em meia-hora, é feita uma interpolação dos percentuais acumulados entre as horas adjacentes para os quais foram fornecidos os fatores horários. Por exemplo, para o tempo de viagem entre as usinas 18 e 34, o percentual que chega na primeira hora é de 50%, resultando em um percentual de 25% para cada uma das meias-horas que compõem essa hora.

**Tabela 6.3 - Fatores semi-horários da curva de propagação entre as usinas de Sobradinho (169) e Itaparica (172) (tempo de viagem de 10h).**

Índice da meia hora	% que chega nessa meia-hora	Índice da meia hora	% que chega nessa meia-hora
1	15	11	2,5
2	15	12	2,5
3	15	13	2,5
4	15	14	2,5
5	4	15	0
6	4	16	0
7	4	17	1,5
8	4	18	1,5
9	4	19	1,5
10	4	20	1,5

**Tabela 6.4 - Fatores semi-horários da curva de propagação entre as usinas de Água Vermelha (018) e Ilha Solteira (034) (tempo de viagem de 3h).**

Índice da meia hora	% que chega nessa meia-hora	Índice da meia hora	% que chega nessa meia-hora
1	25	4	20
2	25	5	5
3	20	6	5

#### 6.4.2. Vazões defluentes anteriores ao início do estudo

Finalmente, devem ser informadas as vazões defluídas pelas usinas de montante nas horas anteriores ao início do estudo que, neste caso, correspondem aos instantes antes do início da simulação. Estes dados são fornecidos no arquivo DEFLANT.XXX, cujos registros para esse caso exemplo são mostrados na Figura 6.6.

ε Defluencias anteriores ao inicio do estudo										
ε	Mont	Jus								
ε	Mont	Jus	TpJ	di	hi	m	df	hf	m	defluencia
εX	XXX	XXX	X	XX	XX	X	XX	XX	X	XXXXXXXXXX
DEFANT	066	011	S	28	0	0	F			100.0
DEFANT	066	011	S	28	3	0	F			200.0
DEFANT	066	011	S	28	5	0	F			300.0
DEFANT	066	011	S	28	13	1	F			400.0
DEFANT	066	011	S	28	16	0	F			300.0
DEFANT	066	011	S	28	19	1	F			200.0
DEFANT	066	011	S	28	23	0	F			100.0
DEFANT	169	172	H	28	2	0	F			1000.0
DEFANT	169	172	H	28	2	1	F			1100.0
DEFANT	169	172	H	28	9	0	F			1200.0
DEFANT	169	172	H	28	14	1	F			1300.0
DEFANT	169	172	H	28	15	0	F			1400.0
DEFANT	169	172	H	28	16	0	F			1500.0
DEFANT	169	172	H	28	17	0	F			1600.0
DEFANT	169	172	H	28	22	1	F			1700.0
DEFANT	169	172	H	28	23	0	F			1800.0
DEFANT	006	007	H	28	12	0	F			400.0
DEFANT	006	007	H	28	18	0	F			600.0
DEFANT	006	007	H	28	20	0	F			800.0
DEFANT	033	022	S	28	14	0	F			300.0
DEFANT	033	022	S	28	17	0	F			600.0
DEFANT	033	022	S	28	20	0	F			900.0
DEFANT	033	022	S	28	23	0	F			1200.0
DEFANT	033	034	H	24	00	0	F			66.0
DEFANT	033	034	H	24	12	0	F			66.0
DEFANT	033	034	H	25	00	0	F			166.0
DEFANT	033	034	H	25	12	0	F			266.0
DEFANT	033	034	H	26	00	0	F			366.0
DEFANT	033	034	H	26	12	0	F			466.0
DEFANT	033	034	H	27	00	0	F			566.0
DEFANT	033	034	H	27	12	0	F			666.0
DEFANT	033	034	H	28	00	0	F			766.0
DEFANT	033	034	H	28	12	0	F			866.0

Figura 6.6 – Defluências das usinas com tempo de viagem da água para jusante ao longo do período anterior ao início do estudo.

### 6.5. Resolução do problema

Como o desempenho do método de Benders não é boa quando existem restrições com acoplamento temporal muito extenso, como é o caso do tempo de viagem da água, o caso foi executado no modo PL-Único. Os resultados de execução são mostrados na Figura 6.7.

**Relatório Técnico – 1006 / 11**

-----  
 RELATORIO DE EXECUÇÃO DA OTIMIZAÇÃO  
 -----

Cálculo da Programação Diária da Operação  
 Método: PL Único

Funcao objetivo do Problema Linear (FOBJ) : 49907493.3 (1000\$)  
 Custo futuro de operacao (ALFA) : 37148406.4 (1000\$)  
 Custo Presente (FOBJ-ALFA) : 12759086.9 (1000\$)

-----  
 RESOLUCAO DO PROBLEMA FINALIZADA COM SUCESSO  
 -----

**Figura 6.7 - Relatório de Execução – resolução do problema por PL-Único.**

**6.6. Operação das usinas hidroelétricas e seções de rio no módulo de simulação**

A Tabela 6.5 e a Tabela 6.6 mostram, respectivamente, trechos dos arquivos SIM\_HIDR e SIM\_SECR, contendo a operação das usinas hidroelétricas e seções de rio que estão relacionadas aos tempos de viagem considerados no caso e estudo, durante o horizonte de simulação. Observe que as aflúências às usinas de jusante que são provenientes das usinas de montante com tempo de viagem são indicadas na coluna “Qmontv”.

**Tabela 6.5 - Operação das usinas hidroelétricas do sistema indicadas na Figura 6.4, durante o horizonte de simulação.**

IPER	USIH	IBAC	Nome	SIST	Vol.Inic		Vol.Final		Qincr		Qmont		Qmontv	
					%	hm3	%	hm3	m3/s	hm3	m3/s	hm3	m3/s	hm3
1	18	6	A. VERMELHA	SE	80	4135,2	79,9	4130,94	409	17,67	693,61	29,96	0	0
2	18	6	A. VERMELHA	SE	79,9	4130,94	79,8	4122,67	409	17,67	889,08	38,41	0	0
3	18	6	A. VERMELHA	SE	79,8	4122,67	80,1	4139,27	501	21,64	830,65	35,88	0	0
4	18	6	A. VERMELHA	SE	80,1	4139,27	80,5	4158,48	501	21,64	954,37	41,23	0	0
1	33	6	SAO SIMAO	SE	80	4432	80,1	4435,03	1114	48,12	1428,41	61,71	0	0
2	33	6	SAO SIMAO	SE	80,1	4435,03	80,3	4450,27	1114	48,12	1710,42	73,89	0	0
3	33	6	SAO SIMAO	SE	80,3	4450,27	79,9	4426,95	830	35,86	1102,58	47,63	0	0
4	33	6	SAO SIMAO	SE	79,9	4426,95	79,5	4406,35	830	35,86	1166,19	50,38	0	0
1	34	6	I. SOLTEIRA	SE	80	10262,4	79,4	10184,65	961	41,52	47,52	2,05	166	7,17
2	34	6	I. SOLTEIRA	SE	79,4	10184,65	78,5	10065,66	961	41,52	47,5	2,05	398,89	17,23
3	34	6	I. SOLTEIRA	SE	78,5	10065,66	78,1	10019,29	1017	43,93	72,28	3,12	531,3	22,95
4	34	6	I. SOLTEIRA	SE	78,1	10019,29	77,4	9928,33	1017	43,93	72,26	3,12	570,35	24,64

**Tabela 6.6 - Operação das seções de rio durante o horizonte de simulação.**

Num	Nome	lper	Qmon		Qmontv	
			(m3/s)	(hm3)	(m3/s)	(hm3)
11	REGUA11	1	6224,37	268,9	139,91	6
11	REGUA11	2	7036,14	304	4710,58	203,5
11	REGUA11	3	5903,1	255	6008,27	259,6
11	REGUA11	4	6642,39	287	5568,65	240,6
22	JUS_SIMAVERM	1	1590,66	68,7	550	23,8
22	JUS_SIMAVERM	2	1878,69	81,2	2047,07	88,4
22	JUS_SIMAVERM	3	1337,05	57,8	2046,7	88,4
22	JUS_SIMAVERM	4	1400,15	60,5	2047,27	88,4

**6.7. Operação das usinas hidroelétricas e seções de rio no módulo de otimização**

A Tabela 6.5 e a Tabela 6.6 mostram, respectivamente, trechos dos arquivos PDO\_HIDR e PDO\_SECR, contendo a operação das usinas hidroelétricas e seções de rio que estão relacionadas aos tempos de viagem considerados no caso e estudo, durante o horizonte de otimização.

**Tabela 6.7 - Operação das usinas hidroelétricas do sistema indicadas na Figura 6.4, durante o horizonte de otimização.**

IPER	Pat	USIH	Nome	SIST	CONJ	Unid	Vagua			Vol.Final		Qincr		Qmont		Qmontv	
							\$/MWh	Hm3	%	m3/s	Hm3	m3/s	Hm3	m3/s	Hm3		
1	LEVE	18	A. VERMELHA	SE	99	99	232,39	4140,54	80,1	351	2,53	418	3,01	0	0		
2	MEDIA	18	A. VERMELHA	SE	99	99	232,4	4122,61	79,76	351	2,53	418	3,01	0	0		
3	PESADA	18	A. VERMELHA	SE	99	99	232,14	4114,8	79,61	351	1,26	418	1,5	0	0		
4	MEDIA	18	A. VERMELHA	SE	99	99	232,72	4078,93	78,91	351	5,05	418	6,02	0	0		
5	LEVE	18	A. VERMELHA	SE	99	99	234,05	4082,49	78,98	351	3,79	3238,4	34,97	0	0		
6	MEDIA	18	A. VERMELHA	SE	99	99	235,05	4096,73	79,26	351	15,16	3238,4	139,9	0	0		
7	LEVE	18	A. VERMELHA	SE	99	99	231,71	4169	100	351	121,31	3238,4	1119,19	0	0		
1	LEVE	33	SAO SIMAO	SE	99	99	219,7	4402,87	79,47	1556	11,2	393,23	2,83	0	0		
2	MEDIA	33	SAO SIMAO	SE	99	99	219,7	4399,4	79,41	1556	11,2	393,23	2,83	0	0		
3	PESADA	33	SAO SIMAO	SE	99	99	219,69	4397,66	79,38	1556	5,6	393,23	1,42	0	0		
4	MEDIA	33	SAO SIMAO	SE	99	99	219,94	4390,71	79,25	1556	22,41	393,23	5,66	0	0		
5	LEVE	33	SAO SIMAO	SE	99	99	221,11	4385,49	79,16	1556	16,8	393,23	4,25	0	0		
6	MEDIA	33	SAO SIMAO	SE	99	99	222,03	4364,64	78,78	1556	67,22	393,23	16,99	0	0		
7	LEVE	33	SAO SIMAO	SE	99	99	219,95	4881,9	88,12	1556	537,75	393,72	136,07	0	0		
1	LEVE	34	I. SOLTEIRA	SE	99	99	240,17	9937,03	77,46	1266	9,12	5759,23	41,47	1197,51	8,62		
2	MEDIA	34	I. SOLTEIRA	SE	99	99	240,16	9955,5	77,61	1266	9,12	5759,23	41,47	2555,43	18,4		
3	PESADA	34	I. SOLTEIRA	SE	99	99	240,15	9964,9	77,68	1266	4,56	5437,23	19,57	3413,08	12,29		
4	MEDIA	34	I. SOLTEIRA	SE	99	99	240,51	9998,45	77,94	1266	18,23	5759,23	82,93	1593,72	22,95		
5	LEVE	34	I. SOLTEIRA	SE	99	99	242,23	10012,04	78,05	1266	13,67	5759,23	62,2	2030,21	21,93		
6	MEDIA	34	I. SOLTEIRA	SE	99	99	243,57	10032,23	78,21	1266	54,69	5759,23	248,8	1032,05	44,58		
7	LEVE	34	I. SOLTEIRA	SE	99	99	241,97	10084,84	78,62	1266	437,53	1013,2	350,16	2084,64	720,45		

**Tabela 6.8 - Operação das seções de rio durante o horizonte de otimização.**

Num	Nome	lper	Qmon		Qmontv	
			(m3/s)	(hm3)	(m3/s)	(hm3)
11	REGUA11	1	989,26	7,1	10246,02	73,8
11	REGUA11	2	989,26	7,1	9327,85	67,2
11	REGUA11	3	668,79	2,4	9106,12	32,8
11	REGUA11	4	1849,17	26,6	7392,97	106,5
11	REGUA11	5	1713,54	18,5	7224,67	78
11	REGUA11	6	5190,62	224,2	4555,24	196,8
11	REGUA11	7	8998,69	*****	771,2	266,5
22	JUS_SIMAVERM	1	3253,8	23,4	2457,34	17,7
22	JUS_SIMAVERM	2	3253,8	23,4	2457,34	17,7
22	JUS_SIMAVERM	3	2931,8	10,6	2457,34	8,8
22	JUS_SIMAVERM	4	3253,8	46,9	2457,34	35,4
22	JUS_SIMAVERM	5	3253,8	35,1	2436,6	26,3
22	JUS_SIMAVERM	6	3658,17	158	2021,86	87,3
22	JUS_SIMAVERM	7	887,12	306,6	252,73	87,3

## **7. CONCLUSÕES**

Este relatório teve por objetivo descrever a funcionalidade do tempo de viagem da água entre usinas hidroelétricas e entre uma usina hidroelétrica e uma seção de rio, nos módulos de simulação e otimização do modelo DESSEM-PAT. Introduziu-se uma nova entidade no modelo, denominada seção de rio, necessária para modelar a curva de propagação para tempo de viagem entre uma usina hidroelétrica e uma seção de rio.

A grande diferença entre a modelagem do tempo de viagem apresentada neste relatório (implementada na versão 7.0 do modelo DESSEM-PAT) e a anteriormente utilizada no modelo DESSEM-PAT é a consideração do tempo de viagem por curva de propagação, que é um aprimoramento importante na representação dessa funcionalidade em relação à modelagem tradicional de tempo de viagem por translação.

Apresentou-se uma descrição detalhada de como calcular os fatores para tempo de viagem no problema de otimização, para ambos os casos de tempo de viagem por translação ou por propagação, e para uma discretização temporal uniforme ou não uniforme.

Finalmente, ilustrou-se a utilização do tempo de viagem por translação ou por curva de propagação para um estudo de caso com o sistema interligado nacional.



## **8. REFERÊNCIAS**

- [1] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Manual do Usuário – Modelo DESSEM-PAT, versão 6.0”, Relatório Técnico CEPEL, Abril / 2010.
- [2] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Uma estratégia de decomposição por relaxação Lagrangeana para a otimização da programação diária da operação de sistemas hidrotérmicos com modelagem detalhada da rede elétrica – aplicação ao sistema Brasileiro”, Relatório Técnico CEPEL DP/DEA – 9128/07, Julho 2007.
- [3] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Programa SIMHIDR - Simulação da Operação Hidroelétrica de Usinas Hidroelétricas em Cascata – Manual do Usuário, versão 1.0”, Relatório Técnico CEPEL DP/DEA – 14079/07, Abril 2007.
- [4] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Consideração do enchimento de volume morto nos modelos SIMHIDR e DESSEM-PAT”, Relatório Técnico CEPEL, Abril 2010.
- [5] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Consideração da evaporação nos reservatórios nos modelos SIMHIDR e DESSEM-PAT”, Relatório Técnico CEPEL, Abril 2010.
- [6] . CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Uma nova estratégia da definição dos estágios para a programação dinâmica dual determinística - aplicação ao problema da programação diária da operação”, Relatório Técnico CEPEL, setembro 2009.
- [7] T.N. Santos, A.L.Diniz, “A New Multiperiod Stage Definition for the Multistage Benders Decomposition Approach Applied to Hydrothermal Scheduling”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 24, n.3, pp. 1383-1392, Aug. 2009.