

## REGULARIZAÇÃO DE VAZÃO

### 1. GENERALIDADES

A regularização<sup>1</sup> das vazões naturais é um procedimento que visa a melhor utilização dos recursos hídricos superficiais. Para esse fim, é necessário promover-se o represamento das águas, através da construção de barragens em seções bem determinadas dos cursos d'água naturais.

Com a regularização das vazões por meio da construção de barragem (formação de reservatório) visa-se, ainda, atingir vários outros objetivos, destacando-se: o atendimento às necessidades do abastecimento urbano ou rural (irrigação); o aproveitamento hidroelétrico (geração de energia); a atenuação de cheias (combate às inundações); o controle de estiagens; o controle de sedimentos; a recreação; e, também, permitir a navegação fluvial.

Toda vez que o aproveitamento dos recursos hídricos prevê a retirada de uma vazão de uma dada magnitude de um rio, deve-se confrontar este valor com as vazões naturais deste curso d'água. Se as vazões naturais forem significativamente maiores que a retirada, mesmo durante os períodos de estiagem (vazões naturais mínimas), não haverá a necessidade da regularização de vazão. Neste caso, somente se justificaria a implantação de um reservatório de acumulação para, por exemplo, atenuar os efeitos de enchentes a jusante (controle de vazões máximas), e o controle de níveis d'água e de transporte de sedimentos. Contudo, se a vazão a ser retirada é superior à mínima do curso d'água, necessário se torna a reservação dos excessos sobre a vazão derivada para atender aos períodos cujas vazões naturais são menores que aquelas derivadas.

A operação de um reservatório de acumulação, que recebe vazões muito variáveis no tempo, quando se deseja retirar uma vazão constante, ou não muito variável, é, de fato, uma regularização de vazões. Entretanto, os métodos aqui tratados aplicar-se-ão, também, ao caso de um reservatório de água de abastecimento, que recebe uma vazão constante de uma adutora e entrega uma vazão variável para a rede de abastecimento. Esse último caso seria, a rigor, uma "desregularização", que será tratada como regulação. A título de ilustração, a Figura 1 representa esquematicamente as duas situações acima mencionadas.

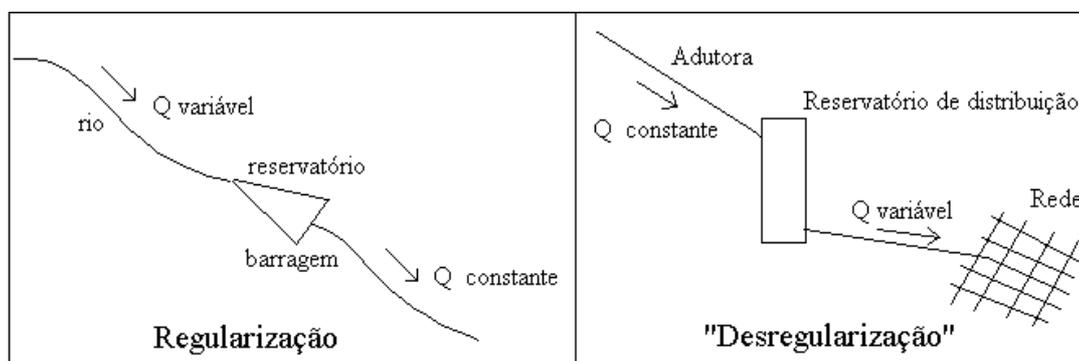


Figura 1 – Reservação para regularização de vazão em um curso d'água natural e reservação de água para o atendimento ao consumo variável em uma rede de distribuição de sistema urbano de abastecimento.

Os conceitos que se desenvolvem neste capítulo são básicos para o tratamento de três tipos de problemas. O primeiro considera conhecidas as vazões naturais do curso d'água (vazões de entrada no reservatório) e visa calcular o volume do reservatório para atender a uma determinada lei das vazões regularizadas (vazões de saída do reservatório). No segundo tipo de problema, uma vez dado o reservatório, objetiva-se determinar a lei das vazões regularizadas que mais se aproxima da regularização total, isto é, da derivação da vazão média (constante). No último problema, são dados o reservatório e a lei de regularização e visa-se calcular os volumes de água existente no reservatório em função do tempo.

<sup>1</sup> O termo *regularização*, aqui empregado, deve ser entendido como sinônimo de regulação.

As soluções dos três problemas mencionados são básicas para o projeto e operação de reservatórios de regularização de vazões. Aqui, pela limitação de tempo, tratar-se-á do problema do primeiro tipo.

## 2. CURVAS COTA-ÁREA E COTA-VOLUME DE UM RESERVATÓRIO

Quando se constrói um barramento em uma seção de um curso d'água para a formação de um reservatório de acumulação, a altura do muro é determinada a partir do pré-estabelecimento do volume a ser armazenado ou da cota do NA que deve ser atingida. Nesses casos, nos estudos preliminares são construídos os gráficos de cota versus área e cota versus volume.

Para o traçado da curva cota versus área requer-se o emprego de mapa topográfico em escala adequada. Para cada cota referida a uma dada curva de nível, *planimetra-se* a área limitada pela curva de nível. Os pares de valores cota (m) x área (m<sup>2</sup>, km<sup>2</sup> ou ha) são lançados em um gráfico e uma curva suave é esboçada através dos pontos (V. Figura 2)

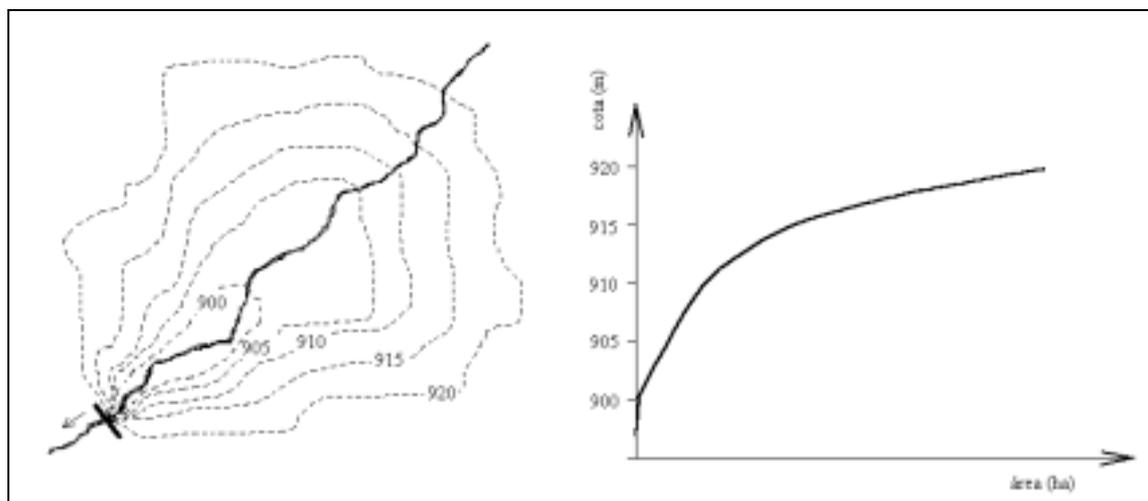


Figura 2 – curva cota x área do espelho d'água em um reservatório de acumulação

A curva cota versus volume é o resultado da integração da curva cota versus área. Esta integração é realizada numericamente, determinando-se os volumes  $\Delta\text{Vol}$  entre duas curvas de nível consecutivas. Este volume é obtido, numa aproximação, multiplicando a média das áreas correspondentes às curvas de nível consecutivas pela diferença de cota destas curvas de nível. A título de exemplo, considera-se o cálculo do volume armazenado até a cota 910m referida à Figura 2, conforme ilustrado na Figura 3.

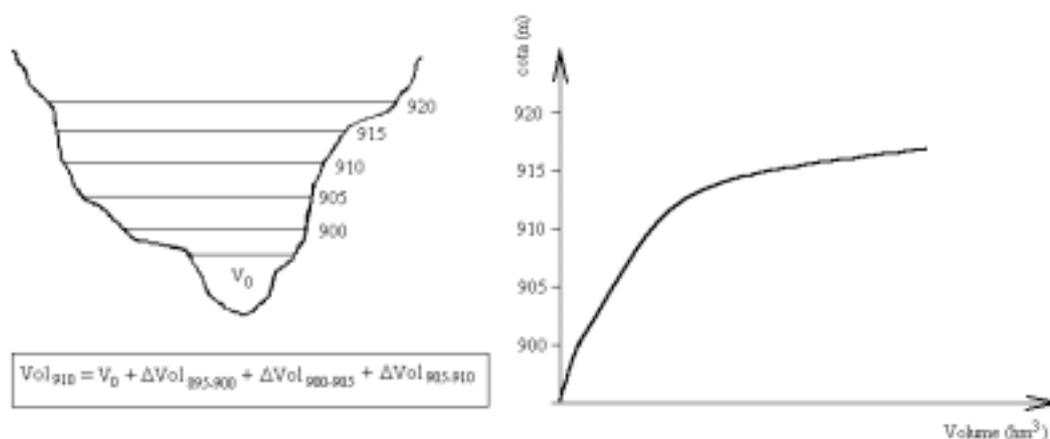


Figura 3 – Curva cota x volume em um reservatório de acumulação d'água

### 3. ZONAS DE ARMAZENAMENTO DE UM RESERVATÓRIO - TERMINOLOGIA

Considere as barragens representadas na Figura 4: a primeira com extravasor não controlado, e a segunda com uma comporta de setor (extravasor controlado). Tem-se, nestes casos, diferentes zonas de armazenamento e, conforme a Figura 4, as seguintes definições:

- NA máximo normal de operação (NA máx.n.o.): cota máxima até a qual as águas se elevam, nas condições normais de projeto. Corresponde à cota da crista vertente, no caso de extravasor não controlado ou de crista livre, ou à cota da borda superior das comportas, no caso de extravasor controlado.
- NA mínimo normal de operação (NA mín): cota mínima até a qual as águas abaixam, em condições normais de operação. Corresponde à cota do conduto de saída mais baixo da barragem, ou à cota mínima capaz de permitir as melhores condições operacionais de equipamentos, como as turbinas.
- Volume útil ( $V_u$ ): volume armazenado entre o NA máx.n.o. e o NA mín.
- Volume morto ( $V_m$ ): volume armazenado abaixo do NA mín., destinado a acomodar a carga de sedimentos afluentes ao reservatório, durante a sua vida útil.
- Sobrearmazenamento devido à cheia de projeto do extravasor: volume acima do NA máx.n.o., devido à sobreelevação causada pelo amortecimento da cheia de projeto pelo reservatório. Corresponde ao NA máximo maximorum (NA máx). O sobrearmazenamento não é aproveitado, pois persiste somente durante a cheia.
- Borda livre: diferença de cotas entre o coroamento da barragem e o NA máximo maximorum, suficientemente grande para conter a arrebentação de ondas devidas ao vento.

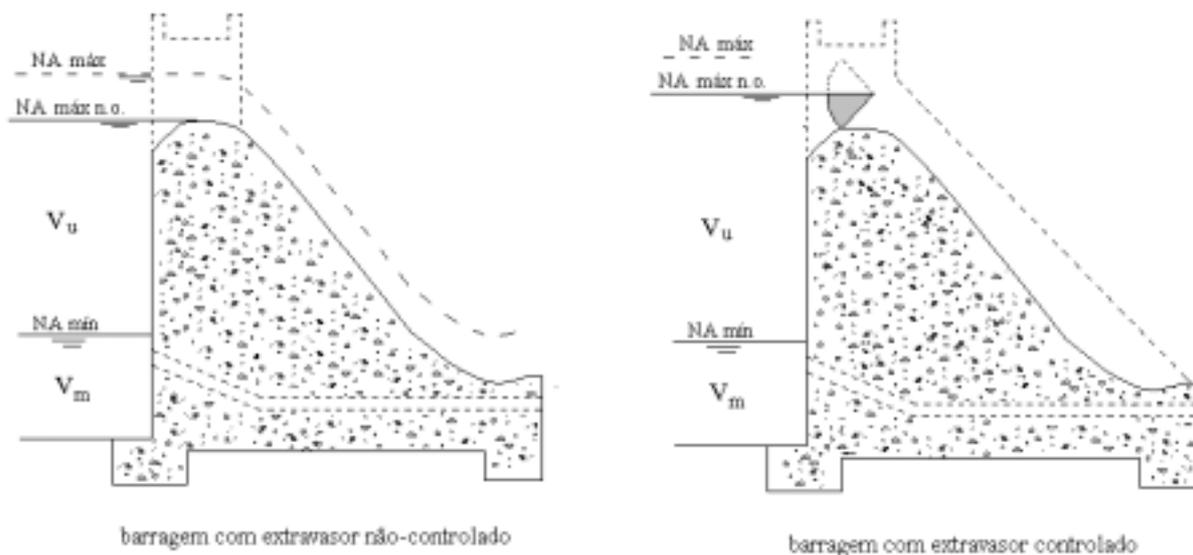


Figura 4 – Zonas de armazenamento em reservatório com e sem controle do extravasor

### 4. CÁLCULO DO VOLUME DO RESERVATÓRIO DE ACUMULAÇÃO

A regularização de vazões através de reservatório é efetuada acumulando-se, total ou parcialmente, os deflúvios da enchente visando a atender às demandas durante o período de estiagem. Tais reservatórios são ditos de acumulação de água, e diferem dos reservatórios de distribuição e de atenuação de cheias.

Para se determinar o volume do armazenamento em um reservatório é aplicada a equação do balanço hídrico, considerando-se a demanda em um período de estiagem prolongada, normalmente denominado período crítico.

A equação do balanço hídrico em um reservatório se escreve como

$$P + Q_{in} - E - \Sigma Q_d - Q_{out} - I = \frac{\Delta Vol}{\Delta t} \quad (1)$$

onde as contribuições são:  $P$  = precipitação;  $Q_{in}$  = vazões afluentes;  $E$  = perdas por evaporação;  $\Sigma Q_d$  = demandas (vazões derivadas);  $Q_{out}$  = vazão de restituição;  $I$  = perdas por infiltração;  $Vol$  = volume do armazenamento;  $\Delta t$  = intervalo considerado. Para o período de estiagem, considera-se  $P=0$ . Além disso, para maior simplicidade, as perdas por evaporação podem ser descontadas na vazão afluente.

Define-se a lei de regularização através da função  $y$ , adimensional, dada por

$$y = \frac{Q_r}{\bar{Q}} \quad (2)$$

onde,  $Q_r$  é a vazão regularizada e  $\bar{Q}$  é a vazão média no período considerado.

Dada a seqüência no tempo das vazões naturais,  $Q_{in} = Q(t)$ , e conhecida a lei de regularização  $y$ , é possível determinar a *capacidade mínima* do reservatório para atender a essa lei.

A vazão regularizada  $Q_r$  da Eq. (2) corresponderá à soma de todas as vazões que saem do reservatório:  $Q_r = Q_{out} + \Sigma Q_d$ . Na análise, em geral, a evaporação é calculada em função da área líquida exposta e de dados climatológicos. As perdas por evaporação podem ser consideradas subtraindo-se das vazões naturais os valores calculados, convertidos para  $m^3/s$ .

A capacidade mínima de um reservatório para atender a uma dada lei de regularização ( $Cr$ ) é obtida pela diferença entre o volume acumulado necessário para atender àquela lei no período mais crítico de estiagem ( $Vol_{nec}$ ) e o volume acumulado que aflui ao reservatório no mesmo período ( $Vol_{af}$ ), isto é:

$$Cr = (Vol_{nec} - Vol_{af})_{\text{período crítico}} \quad (3)$$

Considerados vários períodos de estiagem, o mais crítico será aquele que resulta na maior capacidade do reservatório. Assim, deve-se calcular a capacidade do reservatório para vários períodos de estiagem e adotar o maior valor encontrado.

Seja, por exemplo, um ano com hidrógrafa dada conforme a Figura 5. Suponha-se que se queira atender à lei de regularização total:  $y = 1$ . Isso significa que se deseja obter uma vazão regularizada constante e igual à vazão média  $\bar{Q}$ . Nota-se que, para essa lei de regularização, o período crítico é definido pelos meses de maio a outubro, inclusive<sup>2</sup>. O volume necessário para manter a vazão  $\bar{Q}$  durante os meses de maio a outubro (período crítico) é:

$$Vol_{nec} = \int_{\text{mai}}^{\text{out}} Q_r \cdot dt = \bar{Q} \cdot (\Delta t_{\text{mai}} + \Delta t_{\text{jun}} + \Delta t_{\text{jul}} + \Delta t_{\text{ago}} + \Delta t_{\text{set}} + \Delta t_{\text{out}}),$$

onde  $\Delta t_{\text{mai}}$  é o número de segundos do mês de maio,  $\Delta t_{\text{jun}}$  é o número de segundos do mês de junho e assim por diante. A vazão  $\bar{Q}$ , nesse caso, deve ser dada em  $m^3/s$  para encontrar  $Vol_{nec}$  em  $m^3$ .

O volume afluente acumulado  $Vol_{af}$ , isto é, o volume que chega ao reservatório no mesmo período é:

$$Vol_{af} = \int_{\text{mai}}^{\text{out}} Q \cdot dt \cong \bar{Q}_{\text{mai}} \cdot \Delta t_{\text{mai}} + \bar{Q}_{\text{jun}} \cdot \Delta t_{\text{jun}} + \bar{Q}_{\text{jul}} \cdot \Delta t_{\text{jul}} + \bar{Q}_{\text{ago}} \cdot \Delta t_{\text{ago}} + \bar{Q}_{\text{set}} \cdot \Delta t_{\text{set}} + \bar{Q}_{\text{out}} \cdot \Delta t_{\text{out}}.$$

Com os valores de  $Vol_{nec}$  e  $Vol_{af}$ , a capacidade mínima do reservatório,  $Cr$ , é calculada Eq. (3). Esta capacidade crítica corresponderá, naturalmente, à área representada em cinza na Figura 5.

<sup>2</sup> Não é necessário que o período crítico esteja todo dentro de um ano civil, como na Figura 1. Contudo, a hidrógrafa mostrada é típica de rios perenes.

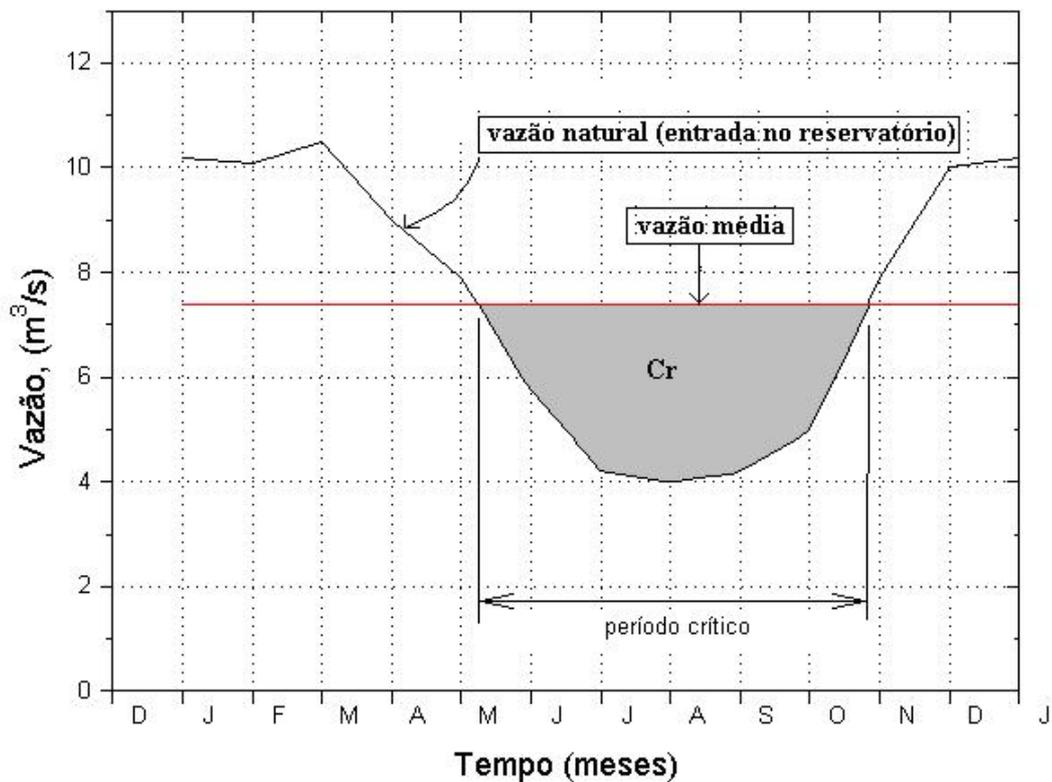


Figura 5 – Hidrógrafa de entrada em um reservatório, vazão de regularização e volume do reservatório.

#### EXEMPLO 1

Calcular a capacidade mínima de um reservatório no Rio X, na Estação Y, para atender à lei de regularização  $y = 1$  (demanda regularizada,  $Q_r = \bar{Q} = 4,703 \text{ m}^3/\text{s}$ ), com base nas vazões médias mensais para o período de dois anos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Vazões afluentes e de regularização na Estação Y do Rio X, no período de janeiro de 1966 a dezembro de 1967, para o cálculo da capacidade mínima do reservatório de acumulação de água

período	Q (afluente) ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Qr (demanda) ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	período	Q (afluente) ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Qr (demanda) ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
Jan-66	9,13	4,703	Jan-67	5,12	4,703
Fev-66	5,76	4,703	Fev-67	7,97	4,703
Mar-66	5,43	4,703	Mar-67	8,42	4,703
Abr-66	3,74	4,703	Abr-67	5,25	4,703
Mai-66	3,45	4,703	Mai-67	4,12	4,703
Jun-66	2,94	4,703	Jun-67	3,83	4,703
Jul-66	2,61	4,703	Jul-67	3,55	4,703
Ago-66	3,65	4,703	Ago-67	3,68	4,703
Set-66	2,21	4,703	Set-67	3,16	4,703
Out-66	2,79	4,703	Out-67	4,02	4,703
Nov-66	4,45	4,703	Nov-67	5,23	4,703
Dez-66	5,96	4,703	Dez-67	6,41	4,703

#### Solução:

Observa-se, na Tabela 1, a existência de dois períodos críticos.

- Primeiro período crítico → abril 1966 a novembro 1966 (inclusive)

- volume necessário para atender à demanda neste período crítico:

$$\text{Vol}_{\text{nec}} = 4,703 \times (30 + 31 + 30 + 31 + 31 + 30 + 31 + 30) \times 86400 = 99,147 \times 10^6 \text{ m}^3$$

- volume afluente no primeiro período crítico:

$$\text{Vol}_{\text{af}} = (3,74 \times 30 + 3,45 \times 31 + 2,94 \times 30 + 2,61 \times 31 + 3,65 \times 31 + 2,21 \times 30 + 2,79 \times 31 + 4,45 \times 30) \times 86400$$

$$\text{Vol}_{\text{af}} = 68,057 \times 10^6 \text{ m}^3$$

- capacidade mínima do reservatório no primeiro período crítico:

$$\text{Cr}_1 = \text{Vol}_{\text{nec}} - \text{Vol}_{\text{af}} \Rightarrow \text{Cr} = 31,09 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

- Segundo período crítico → maio 1967 a outubro 1967 (inclusive)

- volume necessário para atender à demanda no segundo período crítico:

$$\text{Vol}_{\text{nec}} = 4,703 \times (31 + 30 + 31 + 31 + 30 + 31) \times 86400 = 74,766 \times 10^6 \text{ m}^3$$

- volume afluente neste período crítico:

$$\text{Vol}_{\text{af}} = (4,12 \times 31 + 3,83 \times 30 + 3,55 \times 31 + 3,68 \times 31 + 3,16 \times 30 + 4,02 \times 31) \times 86400 = 59,285 \times 10^6 \text{ m}^3$$

- capacidade mínima do reservatório no segundo período crítico:

$$\text{Cr}_2 = \text{Vol}_{\text{nec}} - \text{Vol}_{\text{af}} \Rightarrow \text{Cr}_2 = 15,481 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

Os cálculos indicam que o período de abril a novembro de 1966 é o mais crítico. Logo, a capacidade mínima do reservatório deverá ser de 31,09 milhões de metros cúbicos.

#### 4.1 DIAGRAMA DE MASSA OU DE RIPPL

O diagrama de massa, ou diagrama de Rippl, é definido pela integral da hidrógrafa. Isto é, corresponde a um diagrama de volumes acumulados.

Uma hidrógrafa de vazões naturais, como a mostrada na Figura 5, dá origem a um diagrama de massa como o da Figura 6. Este diagrama informa que:

- num tempo  $t$  qualquer, a inclinação da tangente à curva dos volumes acumulados fornece a vazão naquele tempo;
- o volume acumulado num dado intervalo de tempo é obtido pela diferença entre as leituras das ordenadas correspondentes aos tempos considerados.

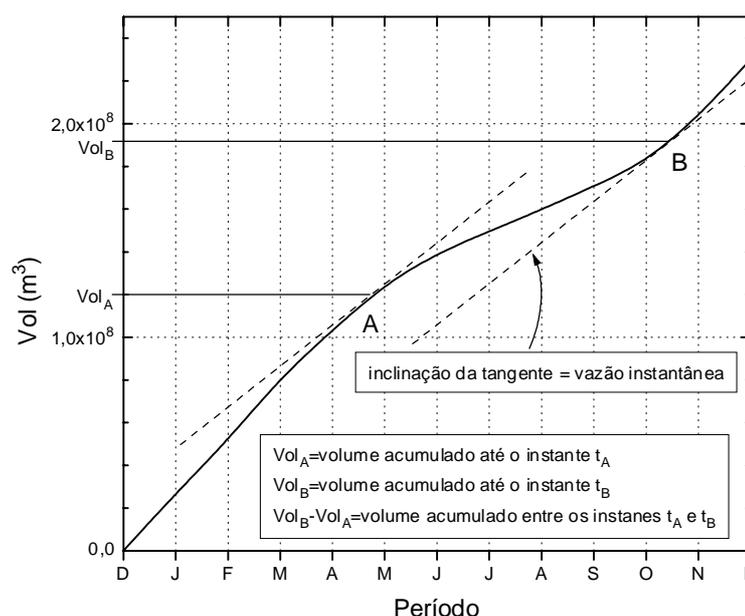


Figura 6 – Diagrama de massa correspondente ao hidrograma da Figura 5



**EXEMPLO 2**

Repetir o cálculo da capacidade mínima do reservatório do Exemplo 1, utilizando a construção do diagrama de Rippl.

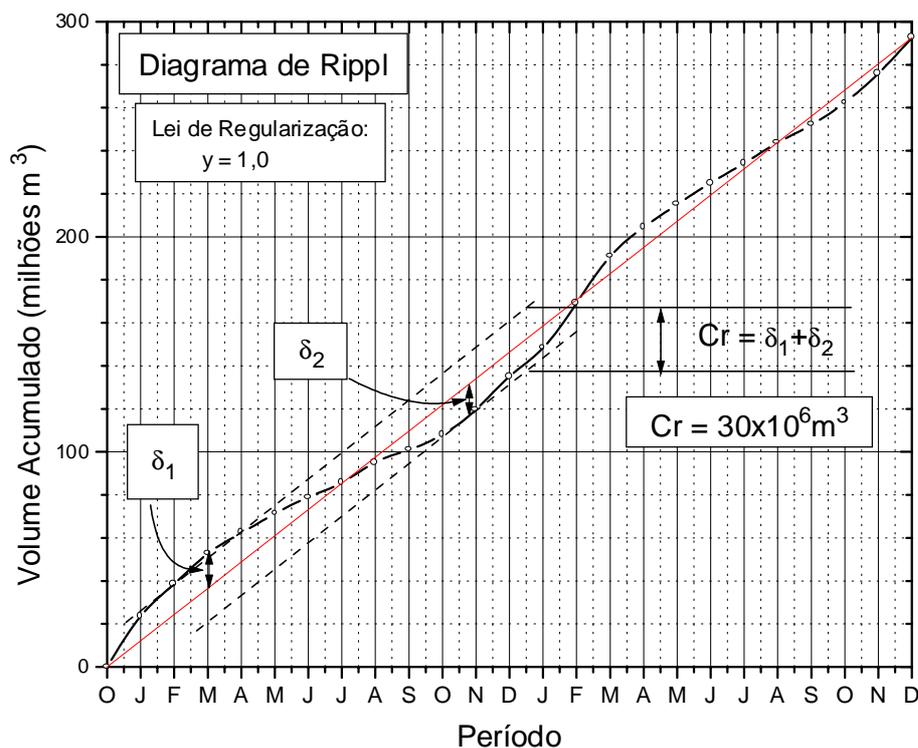
**Solução:**

Para a demanda regularizada de  $4,703\text{m}^3/\text{s}$ , os volumes acumulados correspondentes à vazão regularizada são representados pela linha em vermelho (cheia) na Figura 8. Nesta mesma figura, os volumes afluentes acumulados são representados na forma da linha sinuosa.

A capacidade mínima do reservatório pode ser prontamente obtida traçando-se, pelos pontos que identificam o início e o fim do período crítico, duas tangentes à linha sinuosa, paralelas à reta das demandas acumuladas. A distância vertical entre estas paralelas, que corresponde à soma  $\delta_1 + \delta_2$ , dá a capacidade mínima do reservatório. No caso,

$$C_r = \delta_1 + \delta_2 \cong 30 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

Obs.: Pela Figura 8 nota-se um segundo período crítico aproximadamente entre maio e outubro de 1967. Contudo, é fácil perceber que a distância vertical entre as duas tangentes deverá ser inferior à calculada acima.



**Figura 8 – Diagrama de Rippl para a obtenção da capacidade mínima do reservatório (exemplo 2)**

**EXERCÍCIOS**

1. Calcular a capacidade mínima do reservatório no Rio Jaguari, em Igaratá, para atender à seguinte lei de regularização:  $y = Q_r/\bar{Q} = 0,75$ . Tomar por base as vazões médias mensais referidas aos anos de 1966 e 1967, fornecidas na tabela abaixo.

Período		Q		
Ano	Mês	m <sup>3</sup> /s		
	Janeiro	9,13		
	Fevereiro	5,76		
	Março	5,43		
	Abril	3,74		
	Maio	3,45		
<b>1966</b>	<b>Junho</b>	2,94		
	<b>Julho</b>	2,61		
	<b>Agosto</b>	3,65		
	<b>Setembro</b>	2,21		
	<b>Outubro</b>	2,79		
	<b>Novembro</b>	4,45		
	<b>Dezembro</b>	5,96		
	Janeiro	5,12		
	Fevereiro	7,97		
	Março	8,42		
	Abril	5,25		
	Maio	7,12		
<b>1967</b>	<b>Junho</b>	8,83		
	<b>Julho</b>	4,55		
	<b>Agosto</b>	5,68		
	<b>Setembro</b>	4,16		
	<b>Outubro</b>	5,02		
	<b>Novembro</b>	4,23		
	<b>Dezembro</b>	5,41		

2. Repetir o exercício anterior, para a lei de regularização total, isto é,  $y = \frac{Q_r}{Q} = 1,00$