

CAPÍTULO II – AS USINAS HIDRELÉTRICAS

2.1. Introdução

O objetivo deste capítulo é descrever todas as informações relacionadas às usinas hidrelétricas e que devem ser levadas em consideração nos estudos de planejamento e expansão dos sistemas elétricos.

Atualmente, o ONS (Operador Nacional do Sistema) é o agente responsável por gerenciar as informações das usinas hidrelétricas que fazem parte do SIN (Sistema Interligado Nacional). Antes da re-estruturação do SEB (Setor Elétrico Brasileiro), o gerenciamento destes dados ficavam sob a responsabilidade da Eletrobrás.

2.2. Banco de Dados

O ONS disponibiliza um arquivo de dados que geralmente possui o nome (HIDR.DAT) que é gravado em um formato denominado binário. Desta forma, não é possível se editar os seus dados através de editores de texto ou gerenciadores de banco de dados convencionais. Cada usina hidrelétrica possui armazenadas as informações descritas nas subseções a seguir.

2.1.1. Número de Referência

Cada uma das usinas possui um número que serve para identificá-la e funciona como se fosse uma carteira de identidade da usina. O número de referência corresponde também a posição da usina no arquivo HIDR.DAT.

Colocar que o número do registro é igual ao número de referência / FIGURA HIDR.

2.1.2 Nome da Usina

O nome da usina deve conter no máximo 12 caracteres alfa numéricos. Esta é uma restrição que foi herdada do tempo em que era importante estabelecer limites bem definidos para toda variável alfa-numérica tratada por programas computacionais.

2.1.3. Posto de Medição de Vazão

Como já foi abordado anteriormente, o Sistema Interligado Nacional é composto predominantemente por usinas hidrelétricas e isto faz com que o planejamento da operação no médio e longo prazo deva levar em consideração o comportamento hidrológico das suas bacias hidrográficas. Logo, o estudo de modelos estocásticos³ que

³ Modelos Estocásticos: A partir de uma série temporal, que neste caso é conhecida como registro histórico de vazões, são construídos modelos estatísticos capazes de reproduzir séries similares com as

consigam reproduzir de forma adequada o registro histórico de afluições aos reservatórios das usinas hidrelétricas está intrínseco ao problema de planejamento da operação de médio e longo prazo.

O ONS – Operador Nacional do Sistema – disponibiliza aos agentes um banco de dados contendo o registro histórico de vazões de todas as usinas hidrelétricas que compõem o SIN (Sistema Interligado Nacional). O posto de medição de vazões é um código que cada usina possui para acessar as informações do seu registro histórico de vazões neste banco de dados.

Muitas usinas possuem o seu número de referência igual ao código do posto de medição de vazões, mas esta não é uma regra que pode ser aplicada a todas as usinas.

Os dados do registro histórico de **vazões naturais** das usinas hidrelétricas são correspondentes às médias mensais e, atualmente, o seu primeiro registro é referente ao mês de janeiro de 1931 para todas as usinas.

O formato do banco de dados disponibilizado pelo ONS é denominado binário de acesso direto. A Figura 8 ilustra o formato de gravação deste arquivo, onde cada registro corresponde a um mês do histórico, como, por exemplo, o Registro 1 corresponde as médias das vazões naturais afluentes no mês de janeiro de 1931, o Registro 2 ao mês de fevereiro de 1931 e assim sucessivamente. Cada registro contém um vetor de 320 posições e o índice do vetor corresponde ao posto de medição. Dessa forma, o campo em preto na Figura 8 corresponde à vazão natural média no mês de março de 1931 da usina cujo posto de medição é 3. O número máximo de postos de medição permitido é 320 postos⁴.

Melhorar explicação vazão natural / incremental.

principais características do registro histórico, como, por exemplo, secas de longa duração. As séries reproduzidas a partir de modelos estocásticos são denominadas séries sintéticas.

⁴ Em estudos especiais conduzidos pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) é utilizado um banco de dados com o histórico de vazões que permite a utilização de até 600 postos de medição. Isto ocorre porque em estudos de longo prazo, 10 a 20 anos de horizonte, é necessário utilizar um arquivo com registro histórico mais amplo.

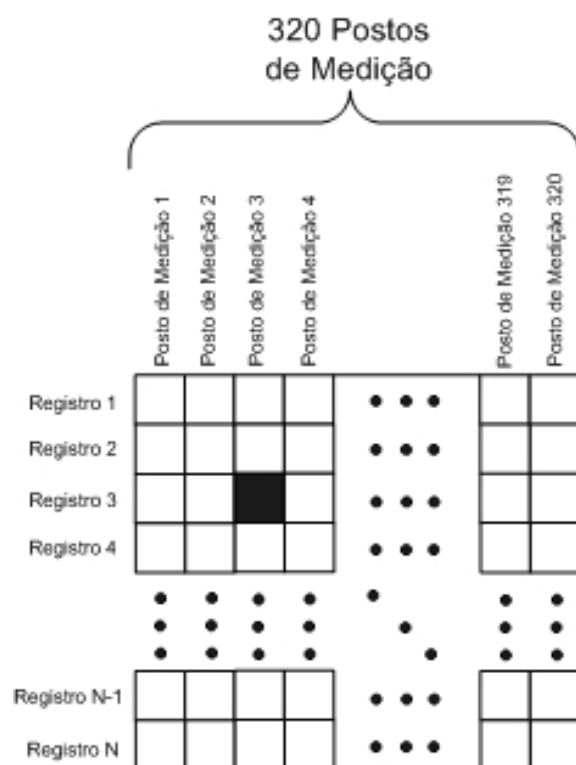


Figura 8 - Formato do Arquivo com Banco de Dados do Histórico de Vazões Naturais

A **vazão natural** afluente a uma usina hidrelétrica é a vazão que seria observada naquele posto de medição considerando o rio na sua condição natural, ou seja, imaginando que não existe nenhum reservatório capaz de regularizar a vazão em nenhum ponto do rio.

A partir do conceito de vazão natural pode ser introduzido o conceito de **vazão incremental** que é aquela correspondente a toda vazão lateral captada entre um posto de medição e todos os postos de medição imediatamente a montante deste.

A Figura 9 mostra um trecho da Bacia do Paranaíba onde podem ser observados os reservatórios de Corumbá, Emborcação, Nova Ponte e Miranda. As vazões naturais e incrementais aos mesmos para o mês de janeiro de 1931 estão representadas na Tabela 1. A vazão incremental à usina de Miranda é oriunda da afluência lateral ao Rio Araguari entre os postos de medição das usinas de Nova Ponte e Miranda e é igual a $88 \text{ m}^3/\text{s}$. Já a vazão incremental da usina de Itumbiara é toda afluência lateral que ocorre entre a usina de Itumbiara e todos os seus aproveitamentos imediatamente à montante que são Miranda, Emborcação e Corumbá. Todas as usinas de cabeceira têm suas vazões incrementais dadas diretamente pela suas vazões naturais.

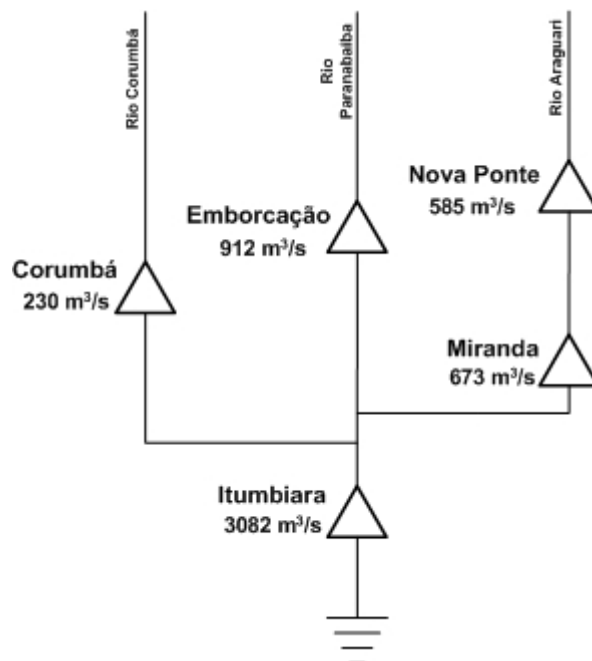


Figura 9 - Vazões Naturais em um Trecho da Bacia do Paranaíba (Janeiro de 1931)

Tabela 1 - Exemplo de Procedimento de Cálculo das Vazões Incrementais

Usina Hidrelétrica	Vazão Natural (m³/s)	Vazão Incremental (m³/s)	Procedimento de Cálculo da Vazão Incremental
Corumbá	230	230	Cabeceira
Emborcação	912	912	Cabeceira
Nova Ponte	585	585	Cabeceira
Miranda	673	88	673 – 585
Itumbiara	3082	1267	3082 – 230 – 912 – 673

Uma questão importante é em relação aos novos aproveitamentos hidrológicos que surgem no decorrer dos anos. No momento em que passam a ser representados nos modelos de planejamento da operação ou expansão, o seu registro histórico deve ser do mesmo tamanho que os demais aproveitamentos, ou seja, deve começar no mês de janeiro de 1931. Existem diversas técnicas para se reconstituir a vazão natural em um determinado ponto do rio a partir de dados históricos conhecidos em outros pontos. Uma delas é denominada transposição de vazões, ilustrada na Figura 10. Conhecida a média histórica mensal no posto de medição A (Q_A), é possível reconstruir o histórico médio mensal no posto de medição B (Q_B) através da equação [1] .

$$Q_B = Q_A \cdot \frac{\text{Área}(B)}{\text{Área}(A)} \quad [1]$$

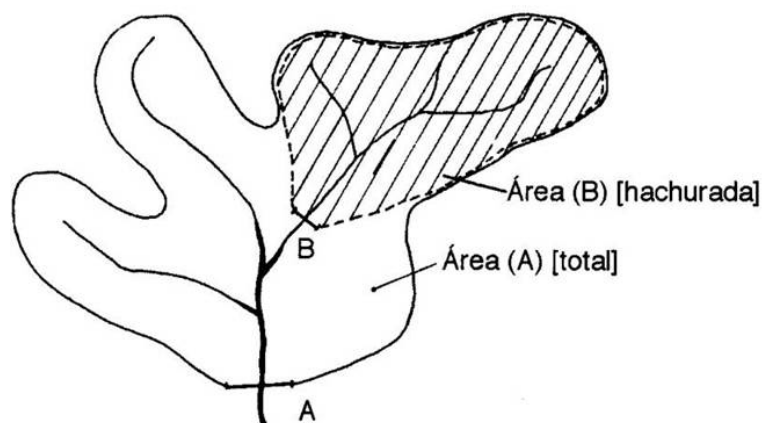


Figura 10 - Técnica de Transposição de Vazões

2.1.4. Número de Referência da Usina à Jusante

A topologia de um conjunto de usinas hidrelétricas é a forma como as mesmas estão dispostas ao longo dos rios e bacias hidrográficas. Logo, toda usina hidrelétrica deve possuir a informação de qual usina está imediatamente a sua jusante.

A Tabela 2 mostra os números reais utilizados para número de referência, posto de medição e número de referência da usina à jusante para o mesmo trecho da bacia do Paranaíba ilustrado na Figura 9. Pode-se observar que a usina de Corumbá cujo número de referência é o 29 tem como usina a jusante a usina de Itumbiara cujo número de referência é 31.

Tabela 2 - Exemplo de Utilização do Número de Referência da Usina à Jusante

Número de Referência da Usina	Nome da Usina Hidrelétrica	Posto de Medição de Vazão	Número de Referência da Usina à Jusante
29	Corumbá	205	31
24	Emborcação	24	31
25	Nova Ponte	25	26
26	Miranda	206	31
31	Itumbiara	31	0

Uma determinada usina deve conter somente uma usina a sua jusante. Por outro lado, diversas usinas independentes podem ter a sua jusante a mesma usina. Quando uma determinada usina não possui outra a sua jusante, a informação de número de referência da Usina à Jusante é preenchida com o valor zero.

Somente em condições especiais, uma determinada usina pode ter a sua jusante dois aproveitamentos distintos. Estas usinas são denominadas usinas de bombeamento e, normalmente, são representadas de forma simplificada nos estudos de médio/longo prazo e de forma mais detalhada nos estudos de curto prazo. Isto ocorre, por exemplo, no desvio do Jordão na Bacia do Iguaçu e na Bacia do Rio Paraíba do Sul.

2.1.5. Volume Mínimo e Volume Máximo

A capacidade de armazenamento ou volume útil, em hm^3 , de cada uma das usinas hidrelétricas pode ser calculada através destas duas informações.

O **volume mínimo** corresponde a menor quantidade de água que deve estar armazenada num determinado reservatório e ainda assim a usina preserva sua capacidade de geração. Se o volume de água armazenado no reservatório for inferior ao mínimo, a usina não será capaz de gerar energia, ou porque não existe uma queda mínima entre a superfície do reservatório as turbinas ou porque a cota da superfície de água do reservatório é inferior à cota de tomada d'água do reservatório. O volume mínimo é também chamado de volume morto do reservatório, pois toda a quantidade de água abaixo da cota referente ao volume mínimo não pode ser efetivamente utilizada para a produção de energia nas turbinas hidráulicas. A Figura 11 ilustra o volume mínimo ou morto na região hachurada. A água é captada do reservatório para as turbinas através da **tomada d'água** e do **conduto forçado**, e após o acionamento das turbinas ela retorna ao leito do rio.

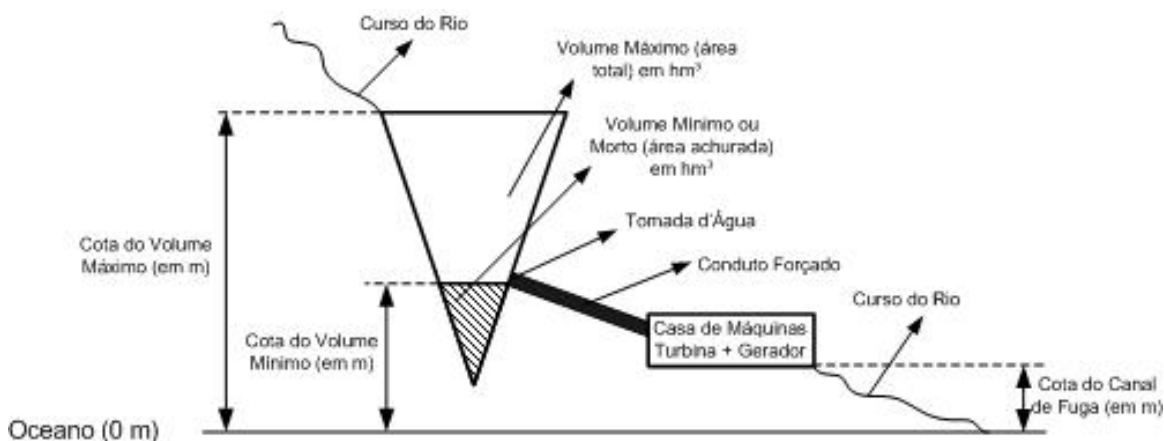


Figura 11 – Volumes Mínimo e Máximo de um Aproveitamento Hidrelétrico

O **volume máximo** correspondente a quantidade total de água que pode ser armazenada no reservatório incluindo o volume mínimo e é dado em hm^3 . O volume útil, em hm^3 , do reservatório é calculado a partir da Equação [2], onde VMAX é o volume máximo do reservatório e VMIN é o volume mínimo do reservatório.

$$V_{UTIL} = V_{MAX} - V_{MIN}$$

[2]

Tanto para o volume máximo, como para o volume mínimo, têm-se as cotas que são as diferenças verticais em metros entre a superfície do reservatório e a superfície do oceano. A diferença de altura entre a superfície do leito do rio imediatamente após a saída da turbina e a superfície do oceano é denominada **cota do canal de fuga**. Para se calcular a altura de queda de um aproveitamento hidráulico basta computar-se a diferença entre a cota do canal de fuga e a cota da superfície do lago. Obviamente, a altura de queda é máxima quando o reservatório está com o seu volume máximo e é mínima quando o reservatório está com seu volume mínimo. Quanto maior for a altura de queda, maior será a capacidade de geração do conjunto turbina gerador.

No médio/longo prazo, os aproveitamentos podem ser classificados da seguinte forma e ilustrados na Figura 12:

- ✓ Usina com reservatório: Neste caso o volume máximo é superior ao volume mínimo e existem conjuntos turbina/gerador para a geração de energia elétrica.
- ✓ Somente reservatório: Neste caso o volume máximo é superior ao mínimo, mas o objetivo do aproveitamento é somente regularizar a vazão num trecho do rio.
- ✓ Usina a Fio D'Água: Neste caso o volume máximo é igual ao volume mínimo, e toda a vazão afluyente ao reservatório deve ser turbinada respeitando-se o engolimento máximo das turbinas do aproveitamento.

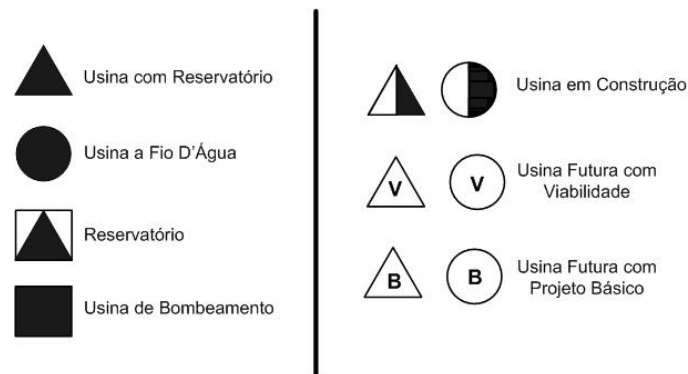


Figura 12 - Simbologia para os Aproveitamentos Hidráulicos

A Figura 12 mostra também a simbologia utilizada para as usinas de bombeamento que são empregadas nas estações de desvio d'água como, por exemplo, na Bacia do Paraíba do Sul. Adicionalmente, existe uma simbologia especial para as usinas que estão em construção e para aquelas que têm o estudo de viabilidade ou o projeto básico concluídos, mas não começaram a ser construídas.

2.1.6. Volume para Vertimento

A **vazão defluente** de uma usina hidrelétrica é composta por duas parcelas: a **vazão turbinada** e a **vazão vertida**. A vazão turbinada é aquela que passa pelas turbinas e gera energia e a vazão vertida é aquela que passa pelos vertedouros da usina e não gera energia. Por razões óbvias, o vertimento não é desejado, uma vez que uma determinada quantidade de água que poderia ser utilizada para gerar energia retorna ao rio por um caminho alternativo sem acionar as turbinas. No entanto, em determinadas situações o vertimento é necessário, dentre elas pode-se destacar as seguintes:

- ✓ Quando não existe capacidade de armazenamento no reservatório e a vazão afluyente à usina é superior ao turbinamento. Logo, não existe espaço para armazenar o excedente de água no reservatório.
- ✓ Quando devido às restrições operativas ou de manutenção, o turbinamento da usina é nulo ou muito baixo, mas necessita-se garantir uma vazão mínima da usina devido aos usos múltiplos da água a jusante do aproveitamento. Entre os usos múltiplos da água está a irrigação, navegação, meio ambiente, etc.
- ✓ Quando devido às restrições operativas ou de manutenção, o turbinamento da usina é nulo ou muito baixo, mas precisa-se garantir uma afluência alta em um aproveitamento de jusante para a geração de energia.

A definição do **volume de vertimento** é similar a definição do volume mínimo. O volume de vertimento corresponde a todo o volume do reservatório que está abaixo da cota dos canais de vertimento da usina.

Logo, o volume de vertimento está sempre entre o volume mínimo e o volume máximo da usina. Sendo que, em algumas usinas, quando o canal de vertimento se encontra na crista do reservatório, o volume de vertimento é igual ao volume máximo do reservatório.

Colocar exemplos!

2.1.7. Polinômios

Cada usina hidrelétrica possui 3 polinômios de quarto grau com as seguintes propriedades:

- Polinômio Cota-Volume:** A partir do volume em hm^3 armazenado no reservatório é possível calcular-se a cota da superfície do reservatório em relação ao oceano. Através dele, é possível em qualquer estágio do planejamento avaliar-se a altura de queda do reservatório. Logo, para cada usina são disponibilizados os parâmetros a_{PCV} , b_{PCV} , c_{PCV} , d_{PCV} e e_{PCV} . A equação [3] mostra como a COTA da superfície do reservatório ou do lago pode ser calculada a partir do volume (VOL).
- Polinômio Cota-Área:** A partir da cota do reservatório em metros é possível calcular-se a área, em km^2 , da superfície do reservatório. Através da área da superfície do lago, que depende do volume armazenado, é possível avaliar-se o volume de água que é perdido devido à evaporação. Para cada usina são disponibilizados os parâmetros a_{PCA} , b_{PCA} , c_{PCA} , d_{PCA} e e_{PCA} . A equação [4] mostra como a AREA pode ser obtida através da COTA da superfície do reservatório ou do lago em relação ao oceano.
- Polinômio Vazão-Nível Jusante:** A partir da vazão deplecionada (que é igual a vazão turbinada mais a vertida), em m^3/s , é possível calcular a cota do canal de fuga da usina em metros (Figura 11). Logo, para cada usina são disponibilizados os parâmetros a_{PVNJ} , b_{PVNJ} , c_{PVNJ} , d_{PVNJ} e e_{PVNJ} . A equação [5] mostra como a cota do canal de fuga (CFUGA) pode ser calculada a partir da vazão deplecionada do reservatório (QDEF). Através da associação dos polinômios cota-volume e vazão-nível jusante é possível calcular-se a **altura de queda bruta** (QUEDABRUTA) do reservatório que é igual a diferença entre a cota do reservatório (superfície do lago) – COTA e a cota do canal de fuga (CFUGA) conforme demonstrado na equação [6].

$$COTA = a_{PCV} + b_{PCV} \cdot VOL + c_{PCV} \cdot VOL^2 + d_{PCV} \cdot VOL^3 + e_{PCV} \cdot VOL^4 \quad [3]$$

$$AREA = a_{PCA} + b_{PCA} \cdot COTA + c_{PCA} \cdot COTA^2 + d_{PCA} \cdot COTA^3 + e_{PCA} \cdot COTA^4 \quad [4]$$

$$CFUGA = a_{PVNJ} + b_{PVNJ} \cdot QDEF + c_{PVNJ} \cdot QDEF^2 + d_{PVNJ} \cdot QDEF^3 + e_{PVNJ} \cdot QDEF^4 \quad [5]$$

$$QUEDABRUTA = COTA - CFUGA \quad [6]$$

A

Tabela 3 mostra os parâmetros dos Polinômios Cota-Volume e Cota-Área da Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa que tem como volume mínimo 11.150 hm^3 e volume

máximo 54.400 hm³. Através da Equação [3] pode-se obter o gráfico mostrado na Figura 13, a qual permite verificar a cota da superfície do lago que pode variar de 417 até 460 metros em relação ao nível do mar, dependendo do volume do reservatório. Ou seja, do volume mínimo ao máximo, a cota da superfície do lago de Três Marias varia em até 43 metros. A cota média do canal de fuga da Usina Hidrelétrica de Três Marias é de, em média, 334,10 metros, com isto percebe-se que quando o reservatório está no volume mínimo a altura de queda bruta da usina é igual a 82,90 metros (Equação [6]). Já se o reservatório estiver com armazenamento máximo, a altura de queda será de 125,9 metros (Equação [6])

Tabela 3 - Parâmetros do Polinômio Cota-Volume e Cota-Área da Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa

Parâmetros	Polinômio Cota-Volume	Parâmetros	Polinômio Cota-Área
a _{PCV}	391.40478515625	a _{PCA}	159666
b _{PCV}	0.002772160107269883	b _{PCA}	-986.244873046875
c _{PCV}	-4.35724984981789E-008	c _{PCA}	1.949939966201782
d _{PCV}	2.903039950357538E-013	d _{PCA}	-0.001200149999931455
e _{PCV}	0	e _{PCA}	0

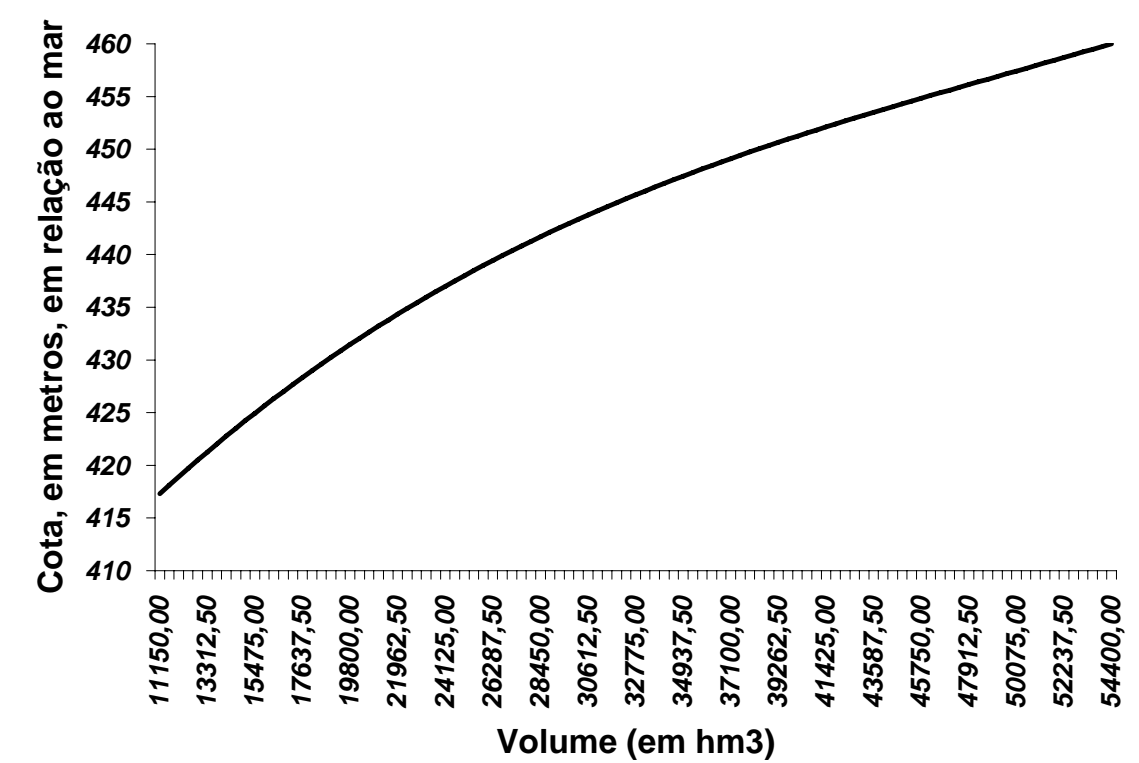


Figura 13 - Polinômio Cota-Volume da Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa

A Tabela 3 também mostra os coeficientes do polinômio cota-área, os quais, a partir da Equação [4], permitem a verificação do comportamento da área da superfície do lago em função da cota do reservatório. Observa-se na Figura 14 que a superfície do lago completamente cheio é cerca de cinco vezes maior que a superfície do lago em seu volume mínimo.

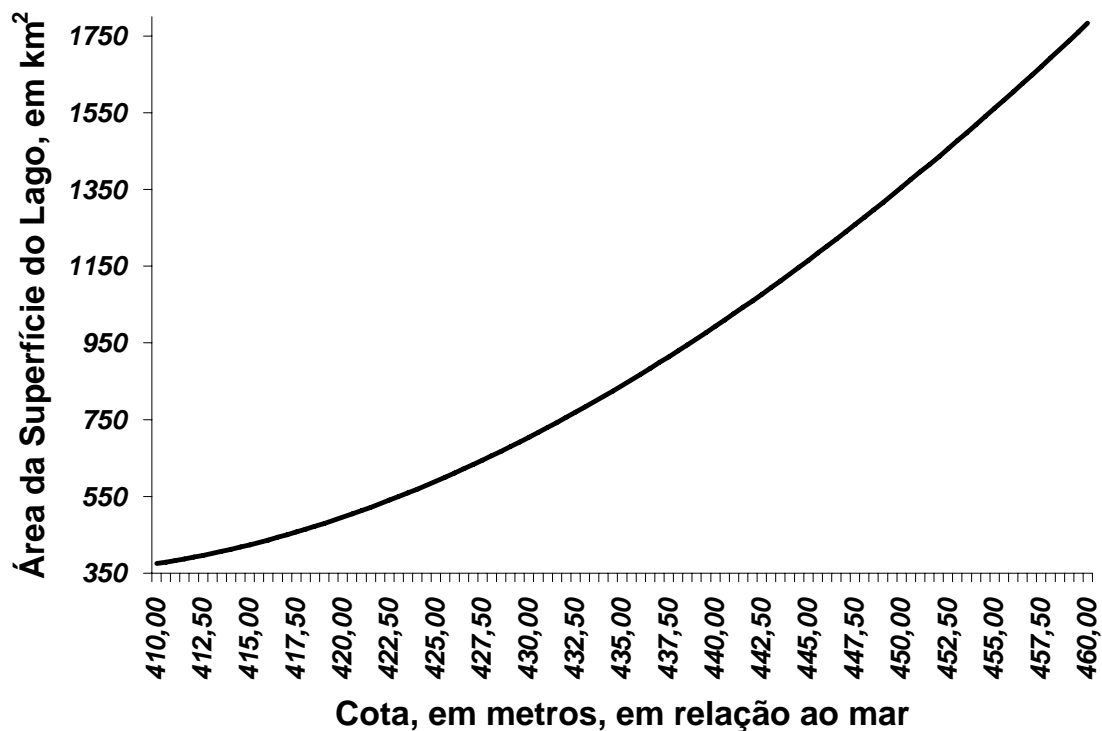


Figura 14 - Polinômio Cota-Área da Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa

A vazão turbinada nominal total da Usina Hidrelétrica de Três Marias com suas três turbinas em operação é de $1215 \text{ m}^3/\text{s}$. Obviamente, o turbinamento varia em torno deste valor, pois o operador pode decidir quanto de água irá turbinar em cada turbina e quantas turbinas irão operar em função de restrições técnicas e de acordo com o planejamento da operação. A vazão defluente é composta pela vazão turbinada mais a vazão vertida.

A Tabela 4 apresenta os coeficientes do polinômio vazão-nível jusante das usinas hidrelétricas de Serra da Mesa e Tucuruí.

A Figura 15, construída utilizando-se a Equação [5], mostra a variação da cota do canal de fuga da Usina de Serra da Mesa em função da sua vazão defluente. Para calcular a faixa de variação da vazão defluente desta usina foi utilizado o seguinte critério: (1) Imaginando que cada uma das três máquinas da Usina Hidrelétrica de Serra de Mesa tenha uma vazão turbinada nominal igual a $1/3$ da total, quando existir somente uma turbina operando, a vazão turbinada média total será em torno de $405 \text{ m}^3/\text{s}$. Utilizou-se $1/3$ deste valor que é igual a $135 \text{ m}^3/\text{s}$ como vazão mínima. (2) Imaginando uma vazão defluente total igual a três vezes a vazão turbinada média total, que é igual a $3.645 \text{ m}^3/\text{s}$ como vazão defluente máxima. Para a Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa não existe uma grande variação na cota do canal de fuga.

Tabela 4 - Coeficientes do Polinômio Vazão-Nível Jusante para as Usinas Hidrelétricas de Serra da Mesa e Tucuruí

Coeficientes	Serra da Mesa	Tucuruí
a_{PVNJ}	332.7979125976562	2.673949003219604
b_{PVNJ}	0.001342969946563244	0.0007414569263346493
c_{PVNJ}	8.819557706374325E-008	-2.223960038350014E-008
d_{PVNJ}	-1.627669006520893E-011	4.07816006442116E-013
e_{PVNJ}	0	-2.865818930978249E-018

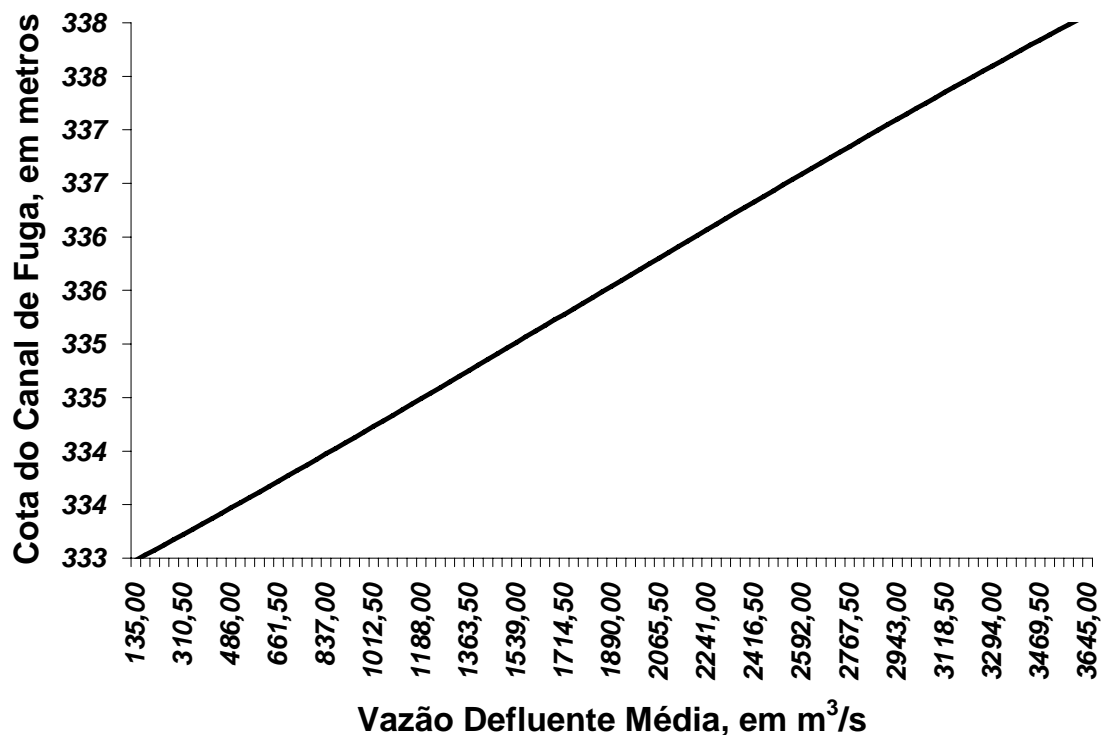


Figura 15 - Cota do Canal de Fuga em Função da Vazão Defluente da Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa

Utilizando-se os mesmos critérios, foi construído o gráfico da Figura 16 para a Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Para esta usina percebe-se uma forte variação na cota do canal de fuga em função da vazão defluente. Neste caso a cota pode variar de 3 a 18 metros de acordo com a vazão defluente da usina (turbinamento + vertimento).

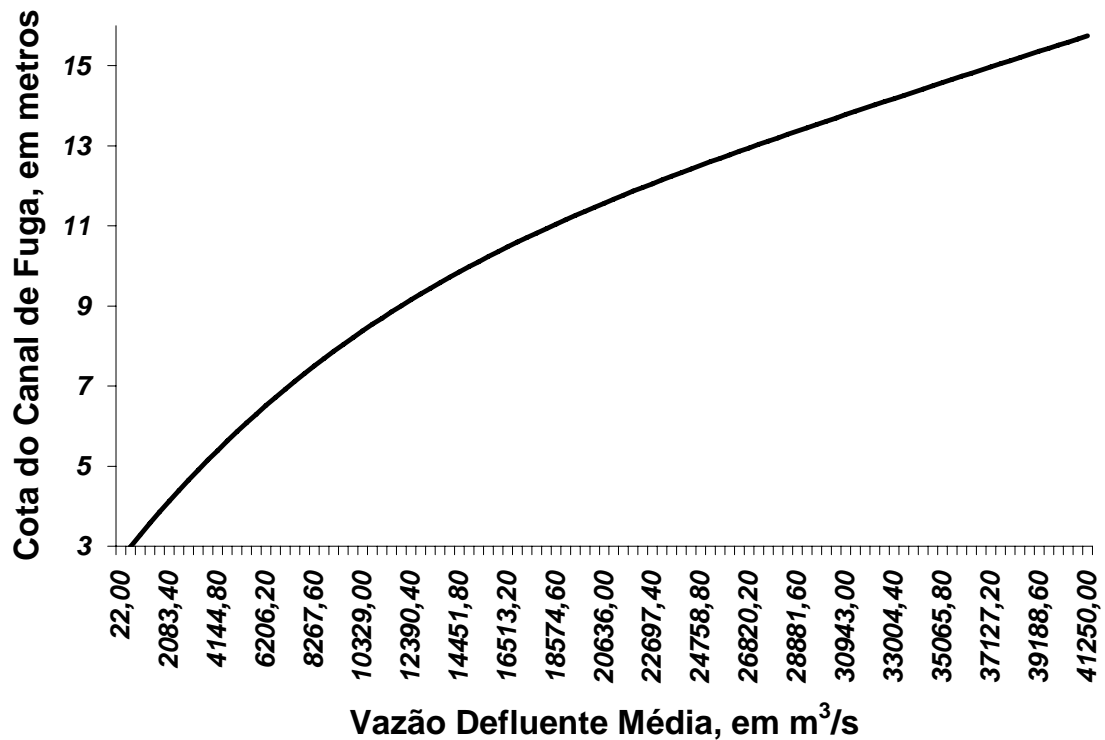


Figura 16 - Cota do Canal de Fuga em Função da Vazão Defluente da Usina Hidrelétrica de Tucuruí

2.1.8. Índices Médios de Evaporação

De acordo com o mês do ano e a localização geográfica do reservatório, o fenômeno da evaporação faz com que a cota da superfície do lago seja reduzida. Logo, para cada usina hidrelétrica, são disponibilizados 12 índices médios de evaporação correspondentes aos meses do ano. Estes índices são dados em milímetros.

De acordo com a localização, estes índices podem ser negativos. A

Tabela 5 mostra os coeficientes médios de evaporação (em mm) para os doze meses do ano das Usinas Hidrelétricas de Serra da Mesa e Tucuruí. Nesta tabela, fica evidente a sinergia existente entre regiões num país de dimensões continentais como o Brasil. Enquanto na usina de Serra da Mesa (Nordeste) observa-se que o reservatório é fortemente deteriorado pela evaporação nos meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro, no reservatório de Tucuruí (Norte), o reservatório recebe intensas chuvas nos meses de Maio, Junho, Julho e Agosto e não sofre com a evaporação.

A Equação [7] mostra como se deve calcular o volume de água que é perdido do reservatório (VEVAP) em função do fenômeno da evaporação. O coeficiente de evaporação no mês i é dado por $CEVAP_i$. A constante 10^2 tem a função de transformar a área dada em km^2 para hm^2 e a constante 10^{-5} tem a função de transformar o coeficiente de evaporação dado em mm para hm. Logo, o volume de água perdido por evaporação (VEVAP) será dado em hm^3 que é a unidade mais utilizada para se avaliar o volume armazenado nos reservatórios. A partir daí, resume-se o cálculo do volume de água perdido devido a evaporação através da Equação [8].

$$VEVAP = AREA \cdot 10^2 \cdot CEVAP_i \cdot 10^{-5} \quad [7]$$

$$VEVAP = 10^{-3} \cdot AREA \cdot CEVAP_i \quad [8]$$

Tabela 5 - Coeficientes de Evaporação das Usinas Hidrelétricas de Serra da Mesa e Tucuruí

Mês	SERRA DA MESA (em mm)	TUCURUÍ (em mm)
Janeiro	27	12
Fevereiro	8	5
Março	16	4
Abril	26	1
Mai	52	-9
Junho	70	-17
Julho	85	-8
Agosto	93	-4
Setembro	105	22
Outubro	60	31
Novembro	45	41
Dezembro	36	21

Como exemplo, no mês de junho, se a usina de Serra da Mesa estiver com seu volume armazenado máximo (54.400 hm³), a área da superfície do lago será igual a 1783 km² (Figura 14). Como, em junho, o coeficiente de evaporação médio é igual a 70 mm. O volume evaporado será igual a:

$$VEVP = 1783 \cdot 10^2 \cdot 70 \cdot 10^{-5} = 124,81 \text{ hm}^3$$

Para efeito de comparação, o volume útil da Usina de Miranda é igual 146 hm³, um pouco maior que o volume perdido por evaporação na Usina de Serra da Mesa na simulação acima.

2.1.9. Número de Conjuntos de Máquinas e Número de Máquinas por Conjunto

Para cada usina hidrelétrica existe um determinado **número de conjuntos de máquinas** que é estabelecido de acordo com o tipo e disposição das turbinas/geradores existentes em uma determinada usina. Em função da época na qual o banco de dados das usinas foi concebido, foi estabelecido um limite de no máximo cinco conjuntos de máquinas para cada usina hidrelétrica.

Cada conjunto de máquinas reúne um determinado número de turbinas/geradores igual ao **número de máquinas por conjunto**.

Aqui, traduz-se máquina por conjunto (ou grupo) turbina/gerador.

A Tabela 6 mostra o número de conjuntos de máquinas e o respectivo número de máquinas por conjunto das usinas hidrelétricas do sistema interligado nacional já utilizadas nos exemplos anteriores. Adicionalmente, aparece a usina de Itaipu que tem

dois conjuntos de máquinas, os quais foram separados devidos as suas características técnicas diferentes, como, por exemplo, a frequência de operação que é de 60 Hz para as máquinas brasileiras e de 50Hz para as máquinas paraguaias.

Tabela 6 - Número de Conjuntos de Máquinas e Máquinas por Conjunto de Alguma UHEs

Usina	Número de Conjuntos De Máquinas	Número de Máquinas Por Conjunto
Corumbá	1	Conj. 1: 3 Máquinas
Emborcação	1	Conj 1: 4 Máquinas
Nova Ponte	1	Conj 1: 3 Máquinas
Miranda	1	Conj 1: 3 Máquinas
Itumbiara	1	Conj 1: 6 Máquinas
Serra da Mesa	1	Conj 1: 3 Máquinas
Tucuruí	3	Conj 1: 2 Máquinas; Conj. 2: 12 Máquinas Conj. 3: 11 Máquinas
Itaipu	2	Conj. 1: 10 Máquinas; Conj. 2: 10 Máquinas

2.1.10. Vazão e Potência Efetiva do Conjunto

A **Vazão Efetiva do Conjunto** é o turbinamento nominal de cada máquina de um determinado conjunto de máquinas. No entanto, de acordo com o projeto da Usina Hidrelétrica, o turbinamento pode variar dentro de determinados limites.

De maneira análoga, a **Potência Efetiva do Conjunto** é a potência nominal de cada máquina de um determinado conjunto de máquinas da usina. No entanto, de acordo com a altura de queda e com a vazão turbinada, a potência gerada varia dentro de determinados limites.

A partir das informações descritas nesta seção, torna-se possível calcular a potência nominal (PNOM) de uma usina hidrelétrica que depende do seu número de conjuntos de máquinas (NCJMAQ), do número de máquinas que compõem cada conjunto i (NMAQCJ $_i$) e da potência efetiva de cada máquina de cada conjunto i (PEFCJ $_i$). A Equação [9] resume este procedimento.

De forma análoga, é possível avaliar-se a vazão nominal (QNOM) de uma hidrelétrica que depende do seu número de conjuntos de máquinas (NCJMAQ), do número de máquinas que compõem cada conjunto i (NMAQCJ $_i$) e da vazão efetiva de cada máquina de cada conjunto i (QEFCJ $_i$). A Equação [10] sintetiza este procedimento.

$$PNOM = \sum_{i=1}^{NCJMAQ} NMAQCJ_i \cdot PEFCJ_i \quad [9]$$

$$QNOM = \sum_{i=1}^{NCJMAQ} NMAQCJ_i \cdot QEFCJ_i \quad [10]$$

A partir das Equações [9] e [10], Tabela 6 e da Tabela 7, é possível exemplificar o cálculo da vazão nominal e da potência nominal de uma usina hidrelétrica utilizando-se os dados da UHE Tucuruí.

Tabela 7 - Vazões e Potências Efetivas dos Conjuntos de Máquinas da UHE de Tucuruí

Tucuruí	Vazão Efetiva (m³/s)	Potência Efetiva (MW)
Conjunto de Máquinas 1	33	20
Conjunto de Máquinas 2	582	350
Conjunto de Máquinas 3	662	375

$$PNOM_{TUCURUI} = 2 \cdot 20 + 12 \cdot 350 + 11 \cdot 375 = 8.365 MW$$

$$QNOM_{TUCURUI} = 2 \cdot 33 + 12 \cdot 582 + 11 \cdot 662 = 14.332 m^3/s$$

2.1.11. Queda Nominal do Conjunto

De acordo com o projeto da usina e da conseqüente disposição das turbinas no interior da casa de máquinas, cada conjunto tem uma altura de queda nominal, denominada **queda nominal do conjunto**. Como já foi descrito anteriormente a altura de queda é dada pela diferença entre a cota da superfície do reservatório e da cota do canal de fuga.

Uma máquina (grupo turbina/gerador) quando submetido a uma altura de queda nominal e a sua vazão efetiva deverá gerar a sua potência efetiva em MW.

A Tabela 8 mostra as quedas nominais por conjunto das UHEs de Tucuruí e Serra da Mesa. Como foi visto na Seção 2.1.7. a altura de queda da UHE de Serra da Mesa está entre 82,90m (associada ao volume mínimo) e 125,90m (associada ao volume máximo), e, obviamente, entre estes dois valores está a queda nominal da usina que é de 117,20m.

Tabela 8 - Quedas Nominais por Conjunto (UHES de Tucuruí e Serra da Mesa)

Usina	Queda Nominal (m)
Serra da Mesa	Conjunto 1: 117,20
Tucuruí	Conjunto 1: 65,50
	Conjunto 2: 65,50
	Conjunto 3: 61,70

Para cada máquina, que é o sinônimo de grupo turbina/gerador, existe uma curva denominada de **curva colina**. A curva colina relaciona a capacidade de geração da máquina com a vazão turbinada e a altura de queda. A Figura 17 mostra um exemplo da curva colina que relaciona o rendimento da turbina com a vazão turbinada e a altura de queda.

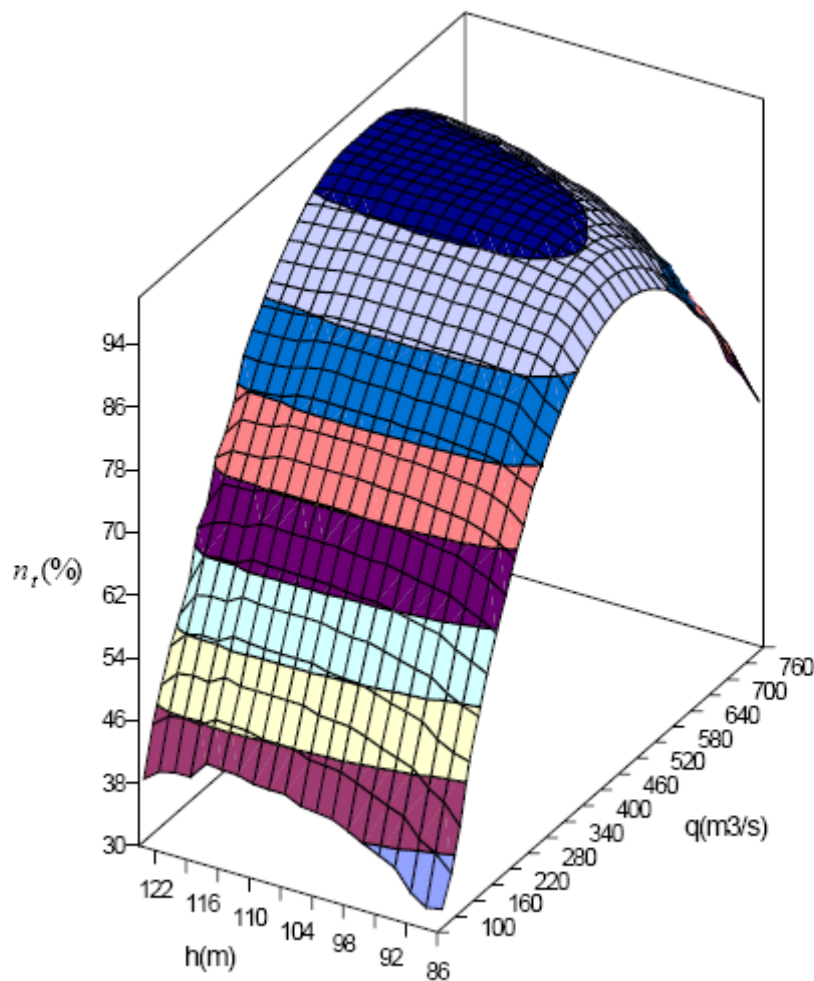


Figura 17 - Curva de Rendimento de uma Turbina Hidráulica (Curva Colina)

2.1.12. Produtibilidade Específica

2.1.13. Perda Hidráulica e Tipo de Perda Hidráulica

Como foi definido anteriormente, a altura de queda bruta mede a diferença entre o a cota da superfície de água do reservatório e a cota do canal de fuga. Esta altura não considera as perdas hidráulicas existentes na tubulação. A **perda hidráulica** é definida de acordo com os detalhes construtivos (geometria, tipo de material, inclinação, etc) do conduto forçado que leva a água do reservatório para as turbinas.

A perda hidráulica pode ser disponibilizada no banco de dados ou em metros ou em percentual. No banco de dados existe um outro campo, denominado **Tipo de Perda Hidráulica**, que quando é igual a ??? informa que a perda hidráulica é dada em metros e quando é igual a ??? informa que a perda hidráulica é dada em percentual.

$$QUEDALÍQUIDA = QUEDABRUTA - PHID$$

$$QUEDALÍQUIDA = QUEDABRUTA \cdot \left(1 - \frac{PHID}{100} \right) \quad [12]$$

A Tabela 9 mostra a perda hidráulica de algumas usinas do Sistema Interligado Nacional.

Tabela 9 - Exemplos de Perda Hidráulica e Tipo de Perda Hidráulica

Usina	Perda Hidráulica (metros ou %)	Tipo de Perda Hidráulica
Serra da Mesa	3,5	2 (m)
Emborcação	1,27	1 (%)
Nova Ponte	0,93	2 (m)
Miranda	2,4	2 (m)
Corumbá	1,24	2 (m)
Itumbiara	1,20	1 (%)
Tucuruí	0,60	2 (m)

2.1.14. Cota Média do Canal de Fuga

Como foi visto anteriormente, o polinômio vazão-nível jusante permite calcular a cota do canal de fuga da usina a partir da sua defluência. Considerando-se que a defluência é a soma da vazão turbinada e vertida, as quais não são conhecidas a priori em muitas situações, a **cota média do canal de fuga** em relação a superfície do mar é disponibilizada no banco de dados.

2.1.15. Número de Unidades de Base

As usinas hidrelétricas recebem um certificado de energia garantida. Os contratos de venda de energia são lastreados (limitados) pelo certificado de energia garantida. O cálculo da sua energia garantida, que tem o risco de 5%, será discutido numa seção posterior e envolve a incorporação do risco hidrológico e de uma análise conjuntural do sistema.

O **número de unidades de base** é o número mínimo de máquinas que devem estar em operação para que a usina possa conseguir gerar sua energia garantida.

Uma usina é dita como **submotorizada** quando o número de máquinas em operação ainda não garante a geração da sua energia garantida.

A Tabela 10 mostra alguns exemplos do número de unidades de base de algumas usinas hidrelétricas. A UHE de Itaipu que tem um total de 20 máquinas ficou classificada como submotorizada até antes que a 15ª máquina entrasse em operação. Normalmente, na otimização da operação de médio/longo prazo, as usinas submotorizadas não são representadas de forma explícita no problema. Elas são agrupadas e a geração conjunta destas usinas é deduzida do mercado de energia a ser atendido.

Tabela 10- Exemplos de Número de Unidades de Base das Usinas Hidrelétricas

Usina	Número de Unidades de Base
Itaipu	15
Serra da Mesa	2
Emborcação	2
Nova Ponte	2
Miranda	2
Corumbá	2
Itumbiara	3
Tucuruí	8

2.1.16.Tipo de Turbina Hidráulica

As turbinas hidráulicas podem ser classificadas em turbinas de ação e de reação. As turbinas de ação têm a propriedade de transformar a energia cinética portada por um fluido em energia mecânica. Já as turbinas de reação trabalham submersas e aproveitam a energia cinética e de pressão do fluido para obter energia mecânica.

No banco de dados convencionou-se a seguinte codificação:

- ✓ 1: Turbina Francis (Reação) – Exemplos: Itaipu, Ilha Solteira
- ✓ 2: Turbina Kaplan (Reação) – Exemplos: Jupia e Barra Bonita
- ✓ 3: Turbina Pelton (Ação) – Exemplo: Henry Borden

As turbinas pelton são adequadas para elevadas alturas de queda, ou seja, quedas acima de 350m, e por isto são muito comuns em países montanhosos. No Sistema Interligado Nacional a maior parte das usinas é do tipo reação devido as características dos aproveitamentos hidráulicos. A turbina francis tem maior eficiência para alturas entre 40 e 400m, já as turbinas Kaplan são adequadas para funcionarem com alturas de queda entre 20m e 50m

2.1.17. Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada

De acordo com o histórico de taxas de falha devido a fenômenos aleatórios da usina hidrelétrica é definida a **taxa equivalente de indisponibilidade forçada (TEIF)**. Este índice é construído com base em estatística de falhas e é dado em valores percentuais.

Nos problemas de planejamento da operação e expansão, como a base de tempo é mensal (discretização mensal), a taxa equivalente de indisponibilidade forçada é convertida em tempo. Ou seja, a TEIF reflete o percentual do tempo que a usina fica fora de operação devido a indisponibilidade forçada.

2.1.18. Indisponibilidade Programada

A **Indisponibilidade Programada (IP)** é um índice que reflete o percentual do tempo que a usina fica fora de operação devido a procedimentos de manutenção programados.

Com a indisponibilidade programada (IP) e a taxa equivalente de indisponibilidade forçada (TEIF) é possível calcular o fator de capacidade máximo (FCMAX) dado pela Equação [13] .

$$FCMAX = \left(1 - \frac{TEIF}{100}\right) \cdot \left(1 - \frac{IP}{100}\right) \quad [13]$$

Logo, é possível calcular a potência nominal líquida da usina hidrelétrica (PNOMLIQ) que é a potência nominal dada pela Equação [9] considerando-se o tempo médio fora de operação por manutenção programada e por indisponibilidade forçada. A Equação [14] a seguir mostra o este procedimento de cálculo.

$$PNOMLIQ = PNOM \cdot FCMAX \quad [14]$$

2.1.19. Volume de Referência

2.1.20. Regularização

2.1.21. Vazão Mínima Obrigatória

Na operação de uma usina hidrelétrica, deve-se assegurar uma **vazão mínima obrigatória** média mensal a jusante do reservatório para que ocorra a preservação do meio ambiente, ocorra a garantia de sustentabilidade da população que utiliza o rio para garantir sua subsistência, para garantir a navegabilidade, irrigação e demais usos múltiplos da água.

Com base nisto, a defluência média mensal (turbinamento + vertimento) de uma usina hidrelétrica deve ser maior ou igual a sua vazão mínima obrigatória.

Normalmente, observa-se que este valor é estabelecido como a menor observação de vazão natural média mensal naquele posto de medição ao longo do histórico.