



Anexos:

- 1- Modelo Simples de Simulação de Sistemas Hidrelétricos (Nota Metodológica)**
- 2- Regulação Térmica na Simulação de Sistemas Hidrelétricos (Nota Metodológica)**
- 3- Cenário Macroeconômico de Referência (Resultados)**
- 4- Projeção de Demanda de Energia e da Geração Elétrica em Unidades de Serviço Público (Resultados)**

Equipe Técnica:

Carlos Feu Alvim (coordenador)

José Israel Vargas

Othon Luiz Pinheiro da Silva

Omar Campos Ferreira

Frida Eidelman

Versão de 22 de Abril 2005

Anexo 1: Modelo Simples de Simulação de Sistemas Hidrelétricos (Nota Metodológica)

Introdução

O propósito desta nota é apresentar uma rápida descrição do caráter sazonal da geração hidroelétrica no Brasil e, com ajuda de um modelo computacional simples, simular o funcionamento do sistema, visando subsidiar a discussão do efeito de eventual introdução de potência adicional, seja ela hídrica com menor acumulação relativa, seja térmica. Esta nota apresenta:

1. Descrição da sazonalidade do sistema existente;
2. Descrição do modelo simplificado para simular o comportamento da geração e armazenamento de energia;
3. Estudo de configurações do sistema, com diferentes tipos de armazenamento, visando definir algumas situações típicas bem como as existentes nos sistemas elétricos regionais brasileiros.

A Sazonalidade do Sistema Elétrico Brasileiro

Na Figura 1 é mostrada a variação anual da Energia Natural Afluyente (ENA)¹ relativa ao valor médio anual de cada região.

¹ Segundo a ONS, Energia Natural Afluyente a uma região é a soma das energias naturais afluentes a todas as usinas desta região. Energia natural afluyente a uma usina é o produto da vazão natural afluyente a esta usina pela sua produtividade, considerando que o volume do reservatório esteja a 65% de seu valor máximo.

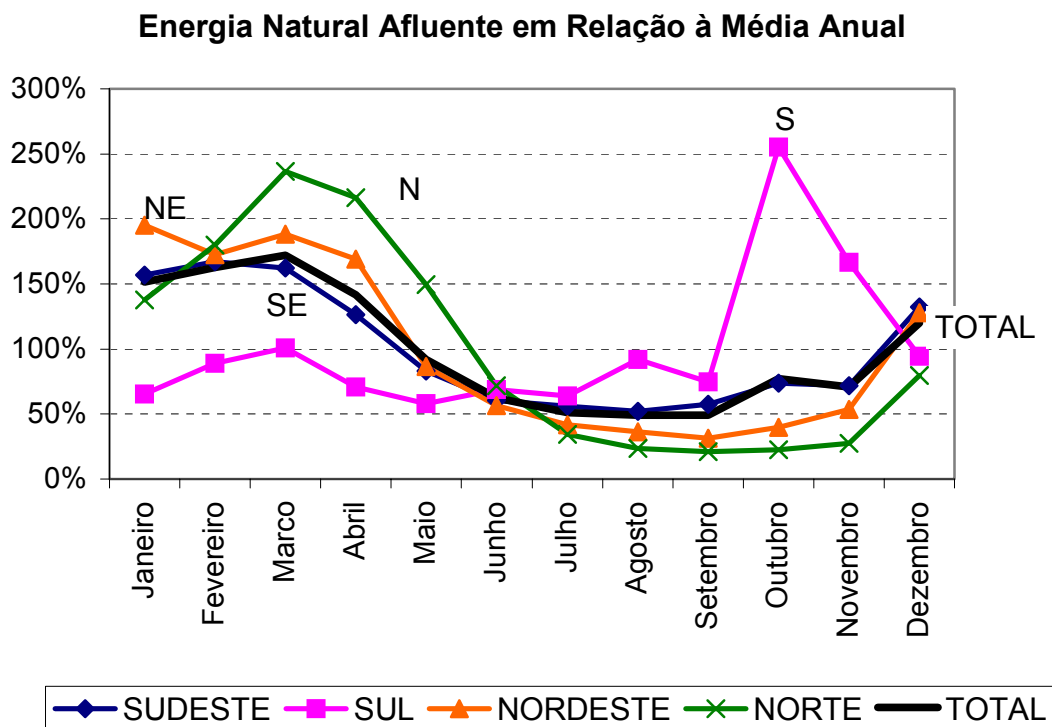


Figura 1: Energia Natural Afluente ao longo do ano (comportamento histórico usado pela ONS na projeção para 2000). Note-se que a sazonalidade da região Norte (nas usinas integradas) é bastante pronunciada sendo que a afluência de Agosto a Novembro é apenas 24% da média anual e cerca de 10% da máxima esperada (mês de Março).

Já no que concerne à geração (que reflete a demanda), as oscilações sazonais são menos importantes que as observadas em outros países como foi mostrado na Nota Técnica 1 (Características dos Sistemas Elétricos Integrados do Brasil). Como primeira aproximação, a demanda no Brasil pode ser considerada independente do fator sazonal.

A Simulação do Sistema

Para que uma simulação tenha transparência e possa servir à melhor compreensão de um problema, é indispensável que ela seja a mais simples possível e ainda assim capaz de descrever o passado do sistema².

A opção aqui adotada foi simular a energia anual afluente usando uma simples função co-seno (representando a oscilação periódica anual) sobreposta a um valor constante (igual à afluência natural mensal mínima). O primeiro mês na representação é o de maior afluência. Para comparações com a realidade, esse máximo é deslocado do intervalo de tempo necessário (em meses) para fornecer a melhor descrição do comportamento histórico médio.³

² Uma simulação deve ter a capacidade de “prever o passado” mas conservar sua capacidade de projetar o futuro. De uma maneira geral, quanto mais variáveis explicativas se acrescenta ao modelo, maior é sua capacidade de reproduzir dados do passado e menor sua capacidade de previsão.

³ Sendo n o mês considerado de afluência máxima (variando de zero a 11), a energia natural afluente e será: $e = (a/2)(\cos(n\pi/6) + 1) + b$ onde a e b são constantes representando a amplitude e a base, conforme mostrado na Figura 7.

Os valores usados na simulação são comparados com a média histórica mensal. (Figura 2).

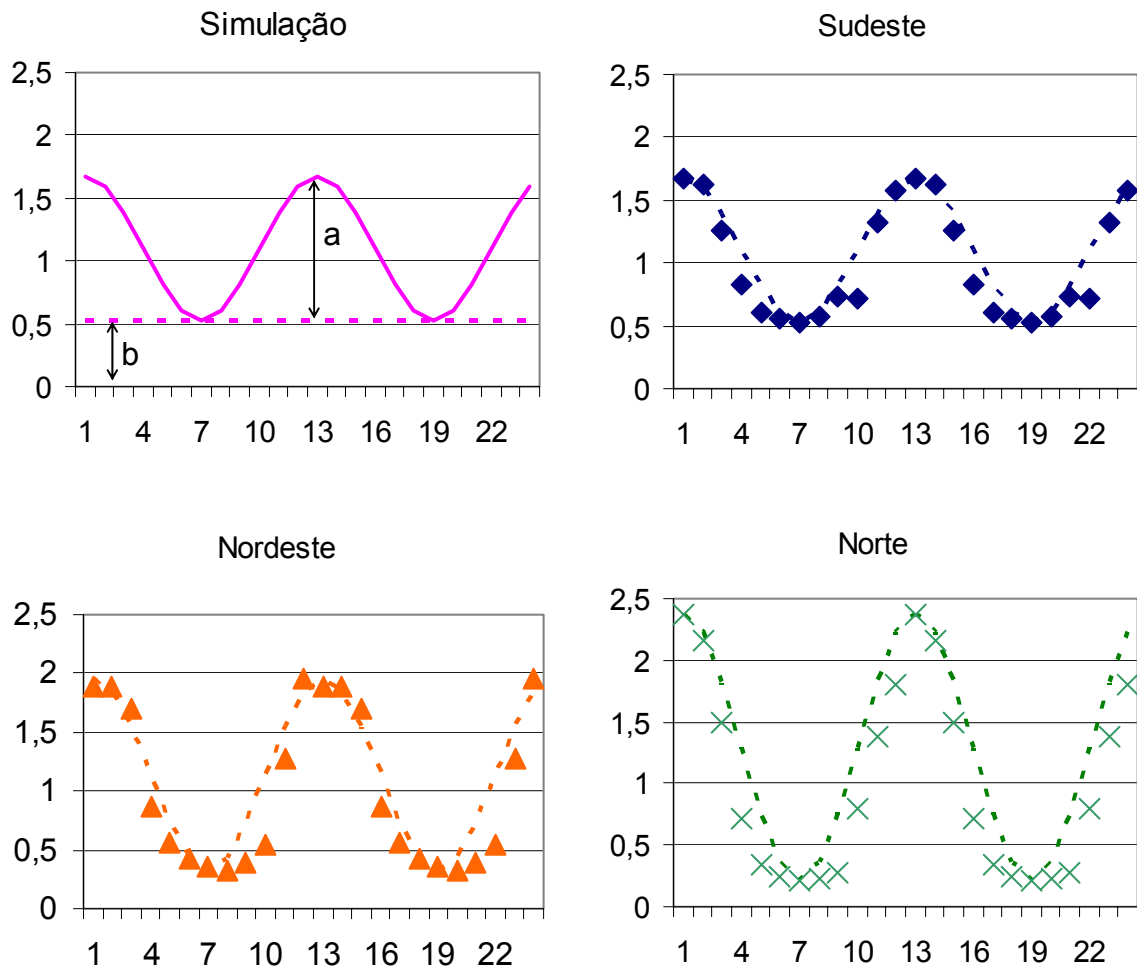


Figura 2: Simulação da energia natural afluyente por uma função tipo co-seno mais um valor constante. A representação é particularmente bem sucedida para a região Sudeste, fornecendo uma boa aproximação para a região Nordeste e um pouco pior para a Norte. Como pode ser observado nas figuras, a função não é aplicável ao comportamento esperado para a Região Sul.

Como o objetivo é fornecer necessariamente uma descrição semiquantitativa do problema, os resultados (Figura 2) são bastante satisfatórios

Também é bom lembrar que os pontos para os quais foi ajustada a curva já representam uma média de dados do passado⁴. Em um ano real, com os dados computados mês a mês, as variações são maiores que as obtidas quando os dados são comparados com a função usada, como é mostrado na Figura 3 para a região SE.

⁴ Na região Sudeste os valores esperados correspondem a uma média histórica de diversas usinas em diferentes bacias. Essa variedade resulta geralmente, na Natureza, em curvas “bem comportadas”. Já os dados da Região Norte praticamente estão restritos à Bacia do Tocantins e mostram uma estação seca de maior duração que a que resulta da aplicação de uma função co-senoidal.

Função de Projeção e Energia Natural Afluente Verificada na Região Sudeste

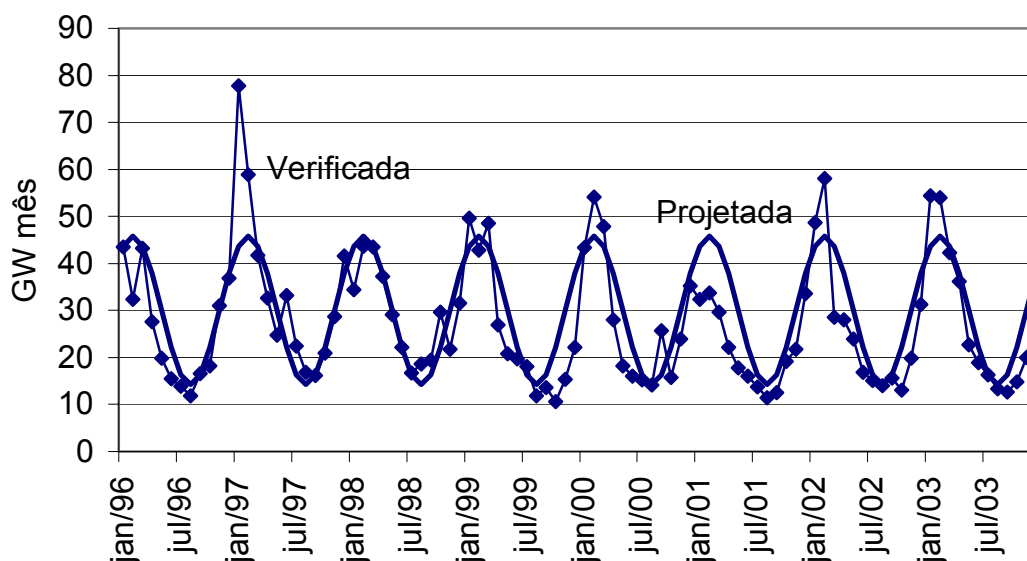
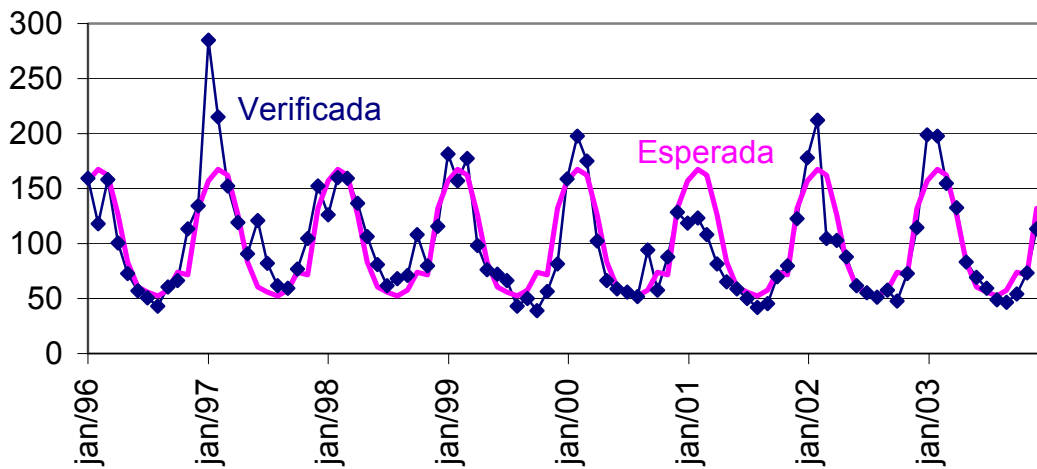


Figura 3: Comparação entre os dados verificados para a energia natural efluente e a projeção obtida a partir da curva demonstrativa da simulação adotada.

Na Figura 4, compara-se o regime de chuvas da Região Sudeste com o da Região Sul usando-se as curvas de projeção da ONS (baseadas no comportamento histórico). Quanto à região SE, a dispersão da curva usada pela ONS não é muito diferente da observada em relação à função de simulação (co-seno + constante).

Já no caso da Região Sul, o comportamento histórico não apresenta a regularidade sazonal mostrada pelas outras regiões. A curva “esperada” (usada nas projeções da ONS) não descreve bem o sistema de chuvas, já que os meses de maior precipitação não se repetem, ano a ano, como ocorre nas demais regiões. Em todo caso, a função usada pela ONS parece constituir uma alternativa válida para simular o comportamento da Região Sul.

SE: Energia Afluente Relativa à Média



SUL: Energia Afluente Relativa à Média

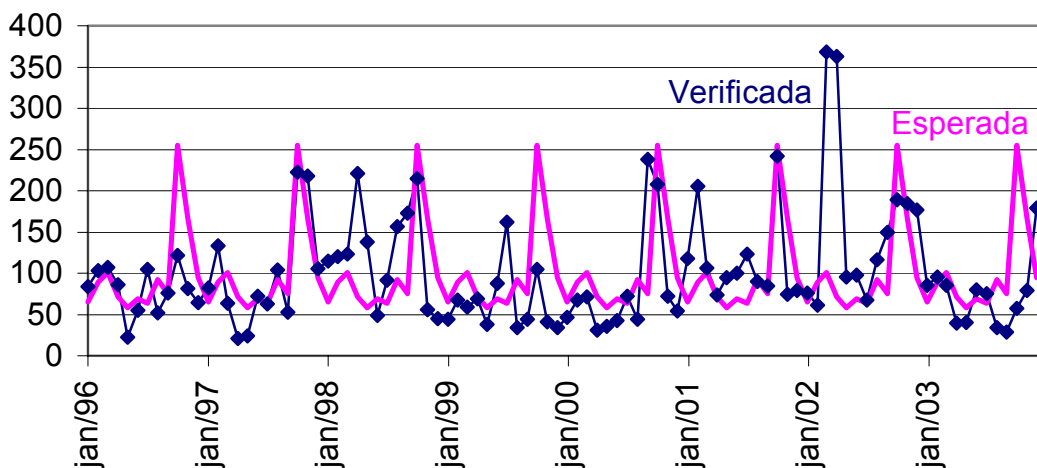


Figura 4: Comparação entre a sazonalidade do Sudeste e do Sul. No Sudeste existe uma boa regularidade; no Sul a afluência, ao longo do ano, oscila em torno de 70% da média apresentando picos de chuva, nem sempre coincidentes com o esperado.

Na simulação do sistema, os dados são expressos em GW mês, representando a produção efetiva ou a capacidade de gerar energia da água afluente ou armazenada. Nesta primeira abordagem, foi suposta uma situação estática (demanda, oferta e capacidade de armazenamento constantes). A mesma metodologia pode ser aplicada a situação em que essas variáveis acompanhem uma demanda crescente. A vantagem da atual abordagem é que ela permite separar conceitualmente o problema de armazenamento de energia do referente à dinâmica de crescimento.

No quadro a seguir são indicadas as equações usadas para descrever o sistema. Elas expressam uma relação de continuidade em que a água que aflui às barragens

é igual à utilizada no armazenamento (variação do estoque), na produção de eletricidade e vertida para outros usos ou evaporada.

Grandezas e relações utilizadas na descrição (*):

e - energia natural afluyente

d - demanda mensal

C - capacidade total de acumulação do sistema

c - estoque acumulado ao final do mês

v - energia vertida no mês

v_{min} – energia mínima vertida para outros fins (ou evaporada)

p – produção mensal

O estoque acumulado **c** será dado por

$$c_i = c_{i-1} + e - p - v_{\min}$$

onde **p** será igual à demanda **d**, salvo nos casos em que a energia afluyente do mês em curso e o estoque do mês anterior não sejam suficientes para atender à demanda, ou seja,

se $c_{i-1} + e - d - v_{\min} > 0$

$$p = d$$

caso contrário

$$p = c_{i-1} + e - v_{\min}$$

No caso em que o estoque obtido supere o valor máximo **C**, ou seja, quando

$$c_{i-1} + e - p - v_{\min} > C$$

teremos

$$c_i = C$$

e o volume vertido será o que exceder à capacidade de armazenamento

$$v = c_{i-1} + e - p - C$$

Para o mês inicial (zero) um valor do estoque e_0 pode ser arbitrado.

(*) As grandezas utilizadas são expressas para um mês genérico. Salvo indicação contrária, os dados referentes ao mês em estudo são expressos sem o índice exceto quando necessária à explicitação de dados referentes a outros meses.

Além da água usada para a geração, foi introduzida nos cálculos uma vazão mínima que buscou levar em conta a que se destina à evaporação, à regulação dos rios e à irrigação. Considerou-se um valor mínimo (**v_{min}**), para a energia vertida (e evaporada), já indicado nas equações descritas no quadro.

Também foi introduzida no programa de simulação a possibilidade de estabelecer-se uma vazão sazonalmente variável para descrever, por exemplo, o uso de águas para irrigação. Por conveniência de simplificação, a água evaporada está incluída no volume vertido⁵.

Foi considerada ainda a possibilidade de limitar (na modelagem) os volumes máximo e mínimo de armazenamento em valores diferentes dos nominais. Assim, o limite mínimo de operação pode não coincidir com o 0% nominal, mesmo sabendo-

⁵ Visando a simplificação pode-se, como foi feito nesta nota em alguns casos, subtrair da afluência a vazão para outros fins.

se que um volume de água não utilizável já foi considerado na contabilidade do sistema. De fato, o temor da ocorrência de cavitação tem levado, na prática, a que não se registrassem valores históricos de armazenamento zero. Além disto, existem razões ecológicas para manter um nível maior que o mínimo nos reservatórios. Por essa razão, na simulação, introduziu-se um mínimo exógeno diferente de zero (~ 10%) que leva em conta a experiência histórica de operação em tela⁶.

Não se deveria esperar também que as barragens atinjam 100% de sua capacidade (o que eliminaria seu poder de prevenir enchentes); além disso, na contabilidade mensal a barragem teria que permanecer cheia todo o tempo. Nas simulações pode-se estabelecer também um limite inferior ao máximo. No entanto, neste caso, a experiência de operação mostra valores de armazenamento até superiores a 100%, já que existe um volume extra de armazenamento que não é computado na capacidade de armazenamento e que às vezes é usado (provavelmente para remediar enchentes). Sendo assim, o valor máximo nominal foi considerado válido. Foi mantida, entretanto, a possibilidade de limitar, na simulação, o armazenamento máximo em valores inferiores a 100%.

Uma limitação do modelo é que ele trata toda uma região como se constituísse um único reservatório, com a conseqüente desconsideração na movimentação das águas, e de certos problemas na operação dos reservatórios. Isto pode explicar alguns valores negativos para a energia vertida (e evaporada). Neste caso, no entanto, a correção, embora possível, introduziria no sistema uma complexidade desnecessária tendo em vista que, ao trabalhar-se com médias mensais, boa parte destas diferenças perdem sentido prático. Para remediar esta situação, nos casos em que foi necessário apurar a energia vertida (incluindo, por simplificação, a evaporada), adotou-se a média trimestral móvel, obtendo-se então resultados satisfatórios (apenas valores negativos).

Simulações

Nas simulações aventadas, os cálculos foram efetuados para cinco anos. No terceiro ano, foi colocada a possibilidade de ocorrência de uma queda na energia natural afluente em ano seco. A simulação foi montada em uma planilha onde é possível variar diretamente os dados de entrada e observar os gráficos bianual e plurianual demonstrativos do comportamento durante os cinco anos em exame.

No que se segue, são apresentadas algumas simulações que servirão para alimentar a discussão sobre a demanda da complementação da energia hídrica no futuro.

Em relação à capacidade de armazenamento, podemos considerar as seguintes situações:

- Sistemas com regulação plurianual.
- Sistemas com regulação para um ano normal ou típico (afluências mensais dentro da média histórica)
- Sistemas sem armazenamento (fio d'água)

⁶ Quando se quer examinar o comportamento do sistema somente no que concerne à geração, pode-se usar na simulação somente o volume armazenado efetivamente utilizável ($C-v_{\min}$).

- Sistemas com regulação parcial (inferior a um ano).

O parâmetro armazenamento/produção, juntamente com a vazão mínima e a capacidade de produção determinam a estabilidade do sistema. Em 2003, a razão armazenamento/produção era cerca de 11 meses para o NE, 7 para o SE e apenas de 4 e 3 meses para o N e S, respectivamente.

A seguir, os quatro tipos de sistema são descritos. Dois deles correspondem aos sistemas regionais existentes no Brasil; os sistemas com “regulação exata para um ano normal de afluência” e o “a fio d’água”, embora não correspondam a nenhuma região específica, no entanto, são importantes, do ponto de vista conceitual, e por isso são descritos.

Sistema com Regulação Plurianual

Neste trabalho parte-se de uma situação real. De fato, tomou-se por base o comportamento da Região Sudeste no ano de 2003 como base⁷. Os valores usados na simulação são expressos em relação à energia afluenta média (=100) e estão indicados, para o Caso 1, na tabela de dados de entrada que precede o gráfico.

⁷ De acordo com a ONS, em Dezembro de 2003 a capacidade total de armazenamento era de 176,6 GW mês. A capacidade instalada no Sudeste era de 38,9 GW (ABINEE) que, para os fins desse trabalho, deve ser acrescida da parte paraguaia de Itaipu, atingindo 45,2 GW, coerentemente com o armazenamento considerado, que é o volume total. A energia natural afluenta/ mês (média) é de 27,4 GW e a geração de eletricidade mensal no Sistema SE/CO é de 16,3 GW mais 9,5 de Itaipu (dados ONS), totalizando uma produção de eletricidade/mês de 25,8 GW.

Caso 1

Fluxo Médio	100	Capacidade Acumulação	640	Estoque Mínimo	10%
Fluxo Mínimo Mensal	46			Estoque Máximo	100%
Produção Mensal	94			Estoque Inicial	60
Fluxo Máximo Mensal	154			Vazão Mínima	3

Sistema com Regulação Plurianual

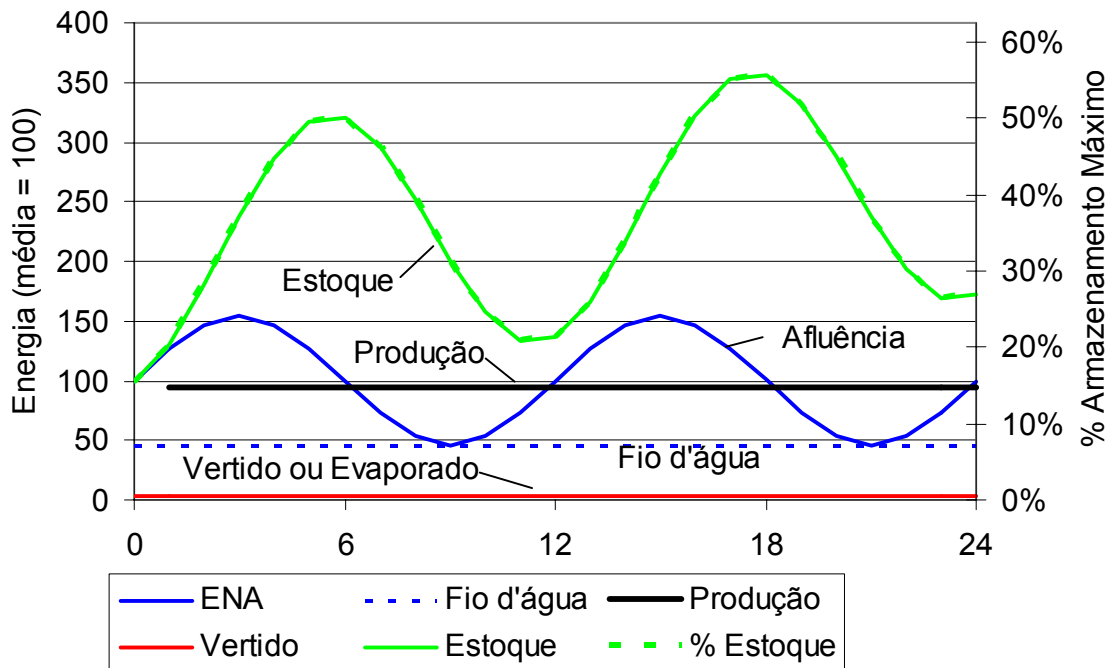


Figura 5: Evolução esperada do sistema em condições análogas às vigentes na Região Sudeste em 2003. A produção mensal é de 15% da capacidade de armazenamento (armazenamento de 6,9 meses de produção). A apresentação nesta figura é semelhante à tela do programa onde é possível modificar (células brancas) os dados de entrada. Além disso, é possível escolher o tipo de gráfico (bianual ou plurianual a ser representado).

Nos gráficos (Figura 5 e 6) estão representados, mês a mês, a afluência (energia natural afluente), o estoque acumulado, o volume vertido e a produção. No gráfico plurianual (Figura 6) é indicada ainda a afluência média anual (=100 em ano normal) assinalando o “ano seco”.

A Figura 6 mostra a evolução esperada para uma situação parecida com a da Região Sudeste onde um baixo estoque e uma queda na afluência anual geraram o “apagão” de 2001. Os resultados de simulação estão expressos em relação à afluência média.

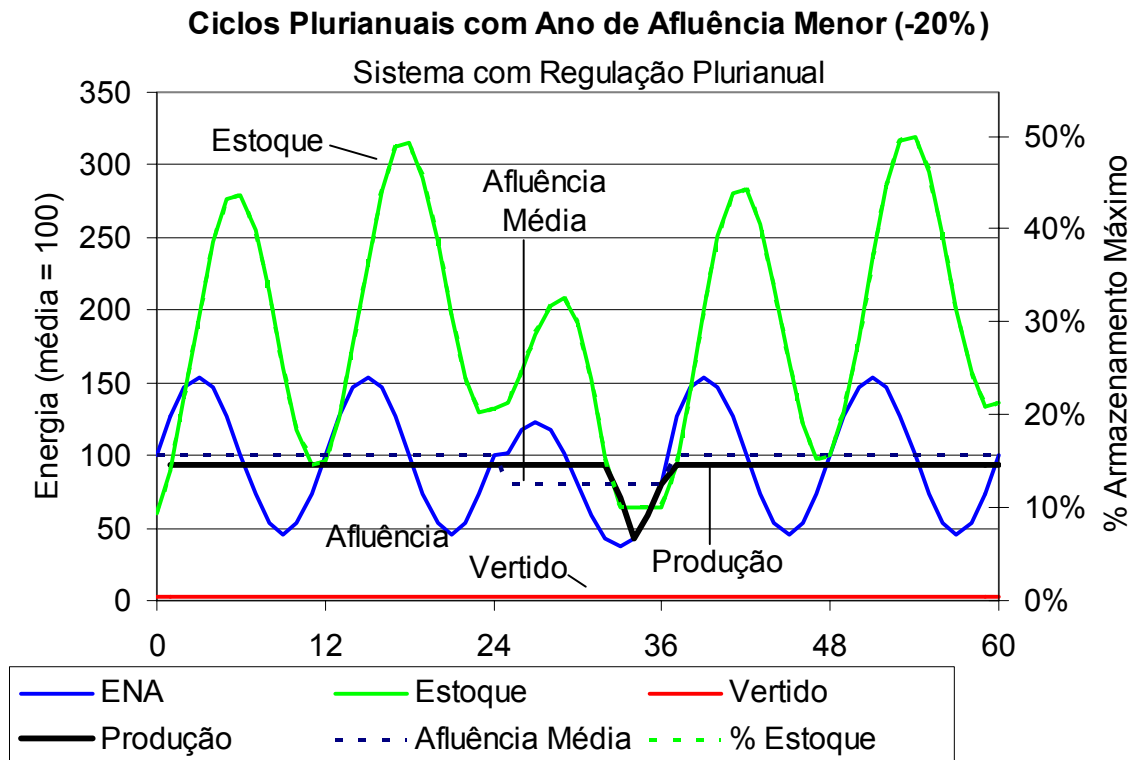


Figura 6: Simulação para situação de capacidades de armazenamento e produção semelhantes a vigente na Região Sudeste em 2003 e para um armazenamento inicial reduzido. Na simulação, os estoques existentes no início do terceiro ano eram insuficientes para enfrentar uma queda de 20% no nível da energia anual afluente.

Na simulação, tomou-se a demanda a ser atendida acrescida da vazão mínima (94 + 3) como sendo inferior à energia natural afluente média (100). Neste caso, a energia armazenada tenderia a crescer e, decorrido o tempo suficiente, a ser finalmente vertida. No entanto, na presença (como mostrado) de uma baixa precipitação atmosférica (20% inferior à habitual) não haveria estoque de energia suficiente para manter a produção para atender a demanda.

Como foi ressaltado anteriormente, a representação no modelo deve ser a mais simples possível mas que contudo ainda descreva o sistema adequadamente. Um bom teste das equações utilizadas consistiria em descrever, por diferença, o volume vertido + o evaporado. O resultado para a região Sudeste é mostrado na Figura 7. Resultados coerentes revelam que não foi esquecida nenhuma variável. Além disso, conhecer o comportamento das variáveis do modelo em situação real é um importante passo para elaborar as simulações do comportamento do sistema no futuro.

Ao comparar corretamente os resultados da simulação (Figura 6) com a realidade (Figura 7) para o sistema Sudeste, constata-se que, não obstante a simplicidade do modelo que considera ainda os mesmos valores relativos de produção, afluência e capacidade de estocagem nos cinco anos, a adequação ao sistema real assim obtida é boa.

Operação do Sistema - SUDESTE

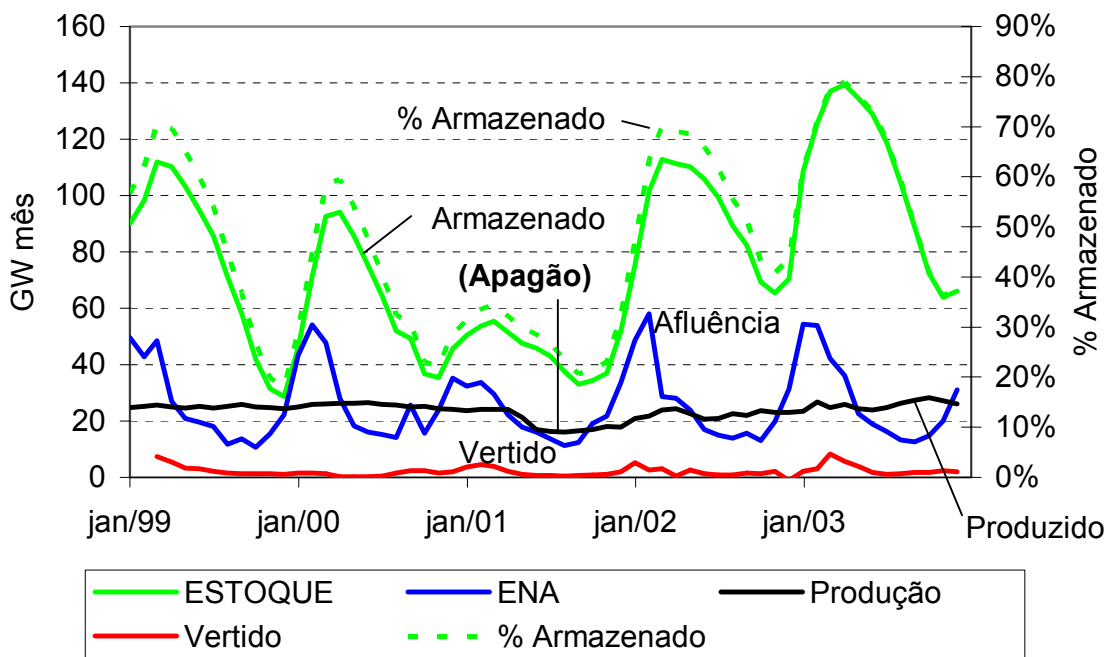


Figura 7: Valores para o Sudeste do estoque armazenado, da energia natural afluyente e da produção de energia que conduziram ao “apagão” de 2001.

Como na simulação da Figura 6, o ano de 2001 iniciou com baixos estoques de água nos reservatórios (Figura 7) e estimava-se que uma queda na afluência anual média provocaria o racionamento que, infelizmente, veio a se confirmar.

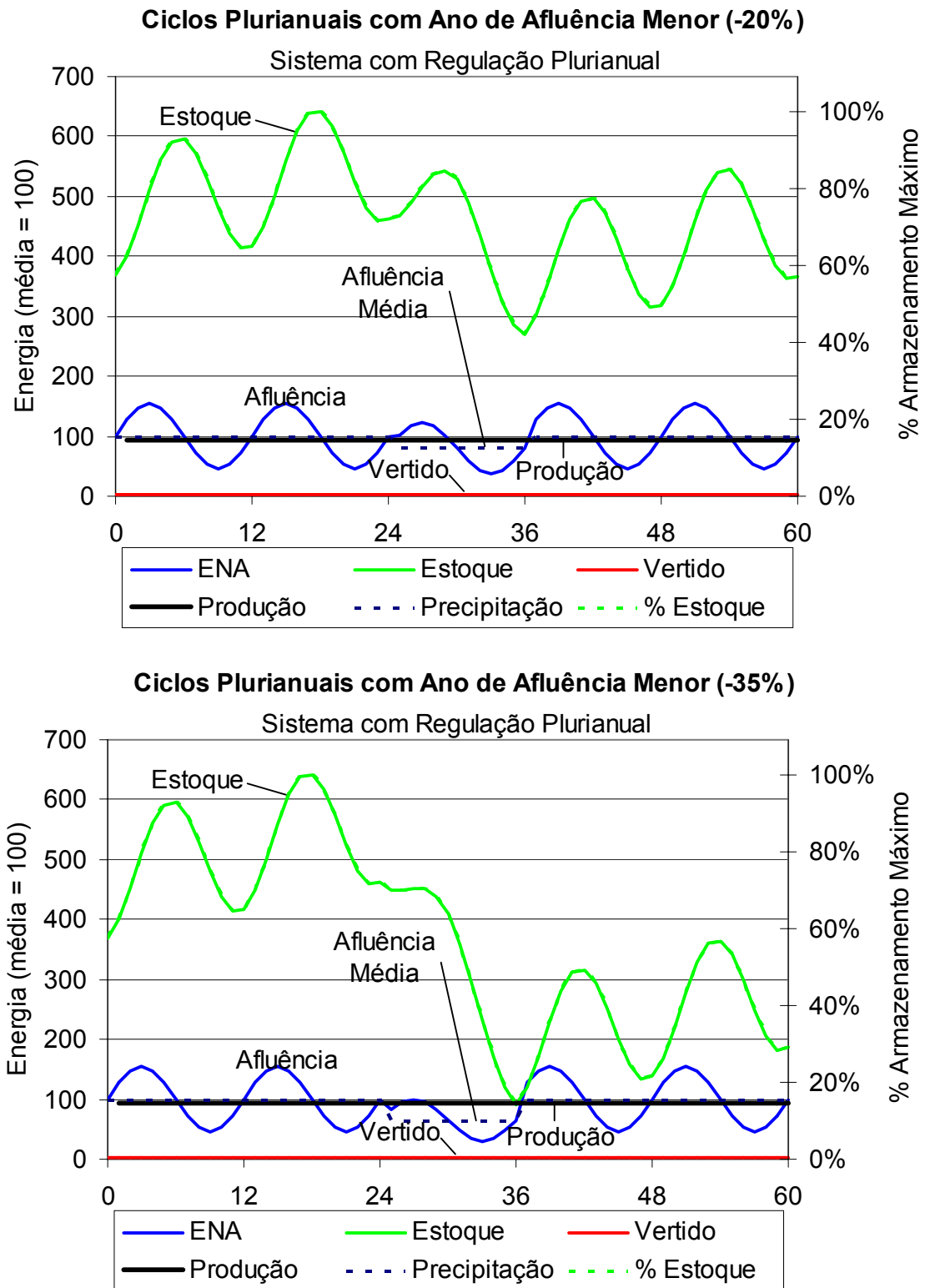


Figura 8: Se na situação da Figura 6 o sistema estivesse com seu estoque máximo no ano prévio ao ano “seco”, seria possível enfrentar, sem queda na produção, uma redução de 20% na energia afluente (gráfico de cima) ou até 35% de queda da afluência (gráfico de baixo).

Na Figura 8, com auxílio de simulações, compara-se o que teria ocorrido com a produção caso os estoques estivessem no máximo. Nesse caso, seria possível

enfrentar, sem problemas, a queda de 20% da energia afluyente e até mesmo uma queda de 35%.

Sistema com Regulação para um Ano

Um sistema poderia ser concebido para comportar a variação esperada em um ano (sazonal) sem regulação plurianual e com aproveitamento pleno da energia afluyente em ano de precipitação normal (dentro da média). Para que fosse aproveitada toda a energia afluyente, o reservatório poderia ter um volume consideravelmente menor que em um sistema com regulação plurianual. A situação seria a descrita na Figura 9 (Caso 2) onde, para facilitar a compreensão, consideraram-se nulos o estoque mínimo e a vazão mínima. Ou seja, foram contabilizados somente o afluxo e o armazenamento que pudessem, efetivamente, ser utilizados para a geração de eletricidade.

Caso 2:

Fluxo Médio	100	Capacidade Acumulação	202	Estoque Mínimo	0%
Fluxo Mínimo Mensal	46		Estoque Inicial	0	Estoque Máximo
Produção Mensal	100	Vazão Mínima	0	Perda no ano seco	20%
Fluxo Máximo Mensal	154				

Sistema com: Produção = Afluência Líquida Ano Normal

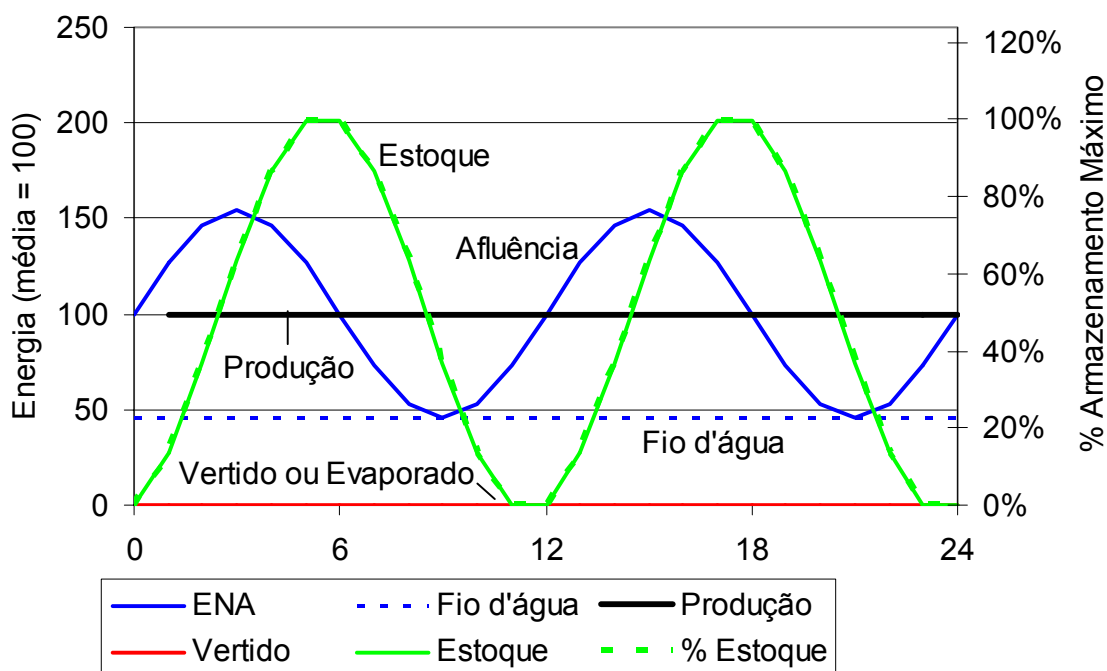


Figura 9: Em um sistema para atender um ano normal, como o representado acima, seria possível com um armazenamento de apenas 35% superior ao do mês de máxima afluência (volume do alagamento 35% acima do máximo anual normal) aproveitar 100% da energia afluyente em um ano típico. Em relação à afluência média, a capacidade de acumulação é de 2 meses. Em contrapartida, o sistema representado, como mostrado na figura seguinte, é altamente instável a variações do afluxo anual. Nota: Para facilitar a percepção, representou-se apenas a afluência líquida e os volumes de armazenamento efetivos (vazão mínima = 0 e estoque mínimo = 0). Per esta razão o volume vertido não aparece na representação gráfica

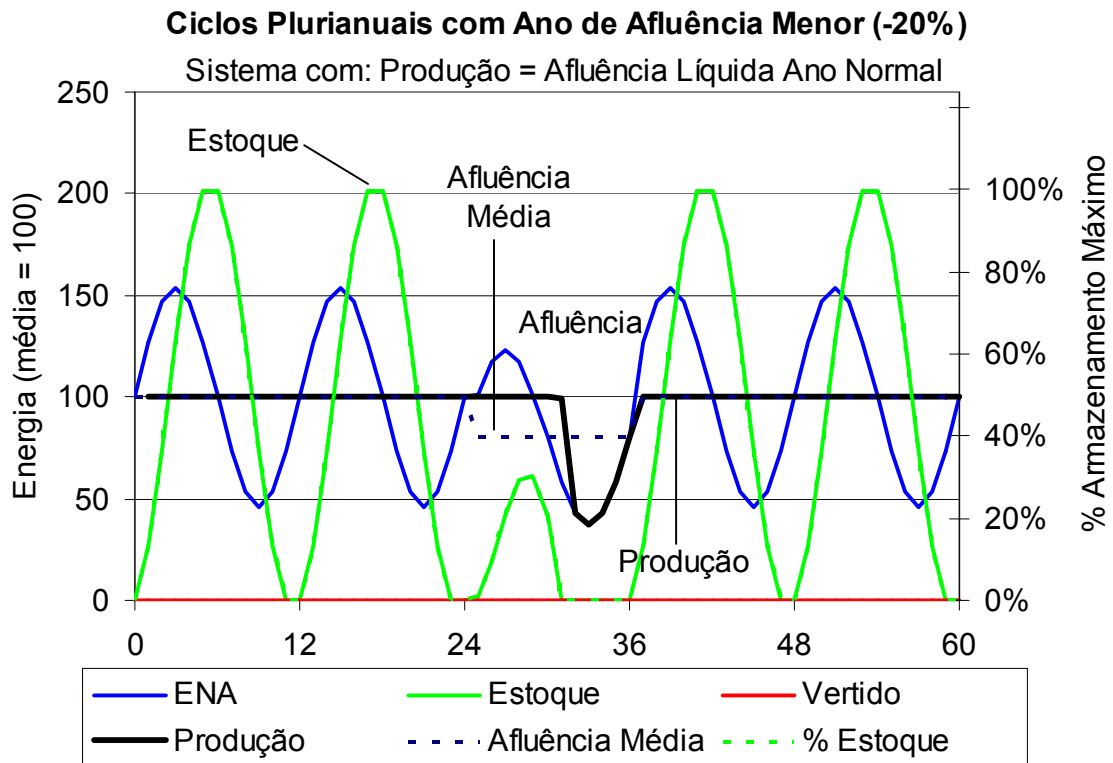


Figura 10: No sistema dimensionado para atender um ano normal, como o representado acima, uma variação (provável) de 20% na precipitação anual provocaria severo desabastecimento na ausência de uma complementação (externa à região ou não hídrica).

Em um sistema como o mostrado no Caso 2, o estoque de água armazenado seria “zerado” anualmente.

No sistema descrito, o armazenamento é exatamente o necessário para atender um ano normal. Toda a energia afluenta pode ser armazenada e ele seria o ótimo, não fora a previsível existência de anos de precipitação abaixo da média, quando o abastecimento sofreria uma severa redução. Para uma redução na precipitação de 20% (Figura 10), a produção de eletricidade cai em cerca de 60%.

Sistema a Fio d'Água

Pode-se também conceber um sistema sem acumulação em que toda a geração seria feita com a afluência natural. Dependendo do regime de chuvas esperado para a região, uma fração importante da energia disponível não seria utilizada. Esta fração seria tão maior quanto maior fosse a oscilação entre a vazão natural máxima e mínima. Em compensação, a intervenção no sistema fluvial seria mínima. Deve-se ressaltar que não se trata, no caso, de usinas de fio d'água com regulação por barragem à montante, mas de um sistema que fosse concebido para operar inteiramente com a vazão mínima anual esperada (média dos mínimos históricos), a fio d'água. O Caso 3 (Figura 11) ilustra este sistema.

Caso 3:

Fluxo Médio	100	Capacidade Acumulação	0	Estoque Mínimo	0%
Fluxo Mínimo Mensal	46	Estoque Inicial	0	Estoque Máximo	100%
Produção Mensal	46	Vazão Mínima	0	Perda no ano seco	20%
Fluxo Máximo Mensal	154				

Sistema com Produção a Fio d'Água

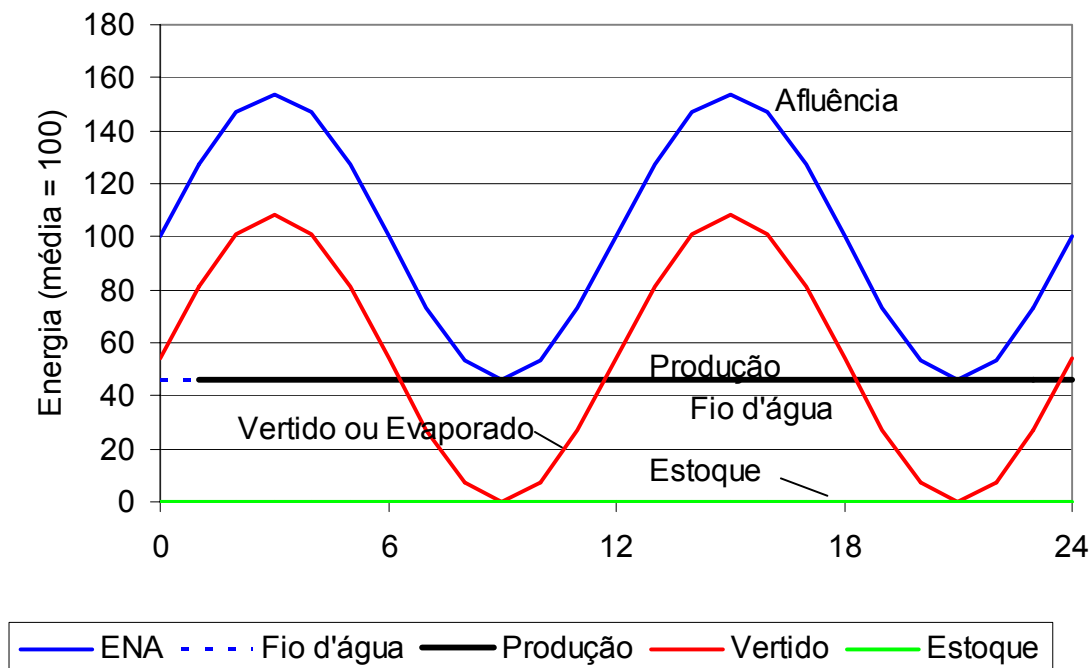


Figura 11: Sistema funcionando a fio d'água dimensionado para ano de precipitação normal (produção = fluxo mínimo mensal).

Como o sistema está dimensionado para operar na condição de mínima afluência em um ano normal, sua produção é bastante estável. No caso, ele foi dimensionado para operar na afluência mensal mínima de um ano normal e 46% da energia afluente anual seria aproveitada. Se ele fosse dimensionado para absorver um mínimo de precipitação que fosse 20% inferior ao normal (igual à produção mínima verificada na Figura 11), ele estaria aproveitando 37% da energia afluente. Note-se

que esse sistema com armazenamento nulo (ou quase nulo) é intrinsecamente menos sujeito a cortes nos anos mais secos que o anterior, apresentando uma redução na produção de eletricidade igual à da afluência (20%) e em um único mês (Figura 12).

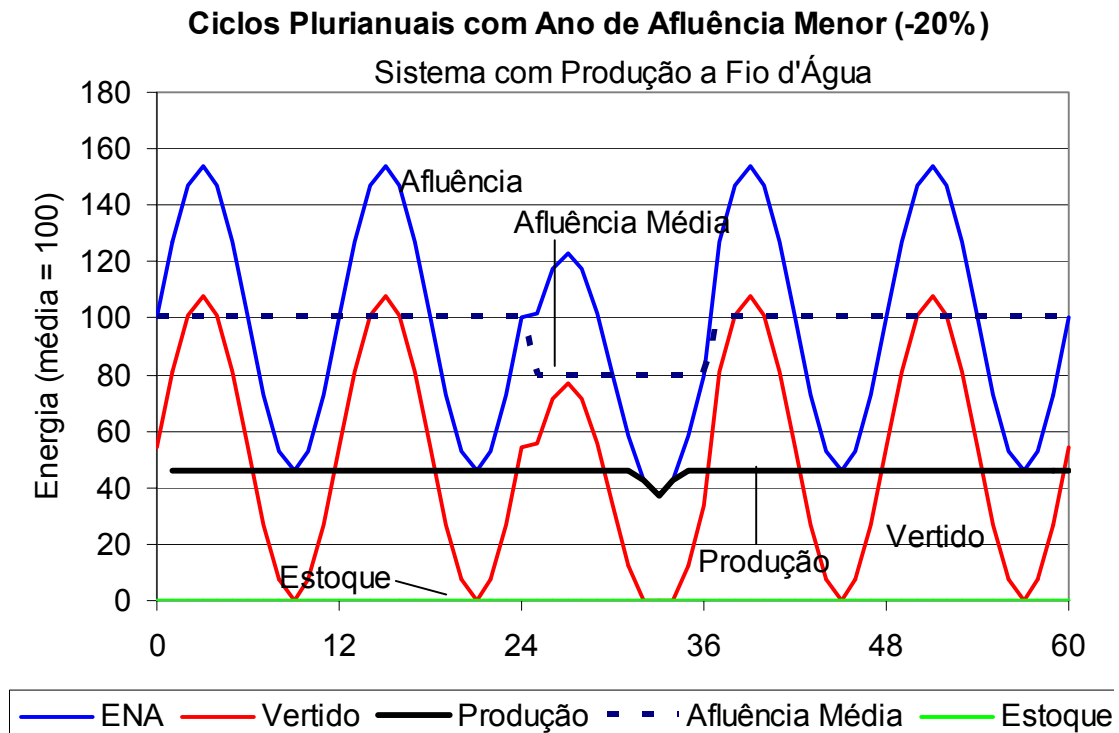


Figura 12: Em um sistema a fio d'água, o aproveitamento é fixado pela menor afluência mensal em um ano típico; no caso, o sistema aproveitaria 46% da média da energia disponível. Se ele fosse dimensionado para o mínimo mensal de um ano com precipitação 20% menor, o aproveitamento da energia anual disponível seria de 37% da anualmente disponível.

Deve-se considerar também que, para ter em conta a variação diária esperada, algum estoque deveria ser previsto, mas o volume necessário seria pequeno. Também a capacidade de geração deveria ser superior à demanda média (cerca de 20% no exemplo de São Paulo anteriormente citado). Algum armazenamento também seria requerido por razões operacionais.

A fração da energia afluente aproveitada, como foi dito, depende do ciclo de afluência. Para um sistema de vazão co-senoidal sobreposto a um valor mínimo constante (como o que foi suposto aqui), este valor pode ser facilmente obtido em função da razão entre as afluências mínima e máxima.

Na Figura 13, os valores calculados a partir da função usada e os reais (esperados) estão representados. Os valores reais correspondem ao ciclo anual médio de afluência e são representados para as quatro regiões. Os calculados com a função co-senoidal são ligeiramente inferiores aos reais, exceto para Região Sul, onde esta função não é adequada e o valor calculado é bem superior ao real.

Energia Natural Afluenta Aproveitada (Geração pela Vazão Mínima normal)

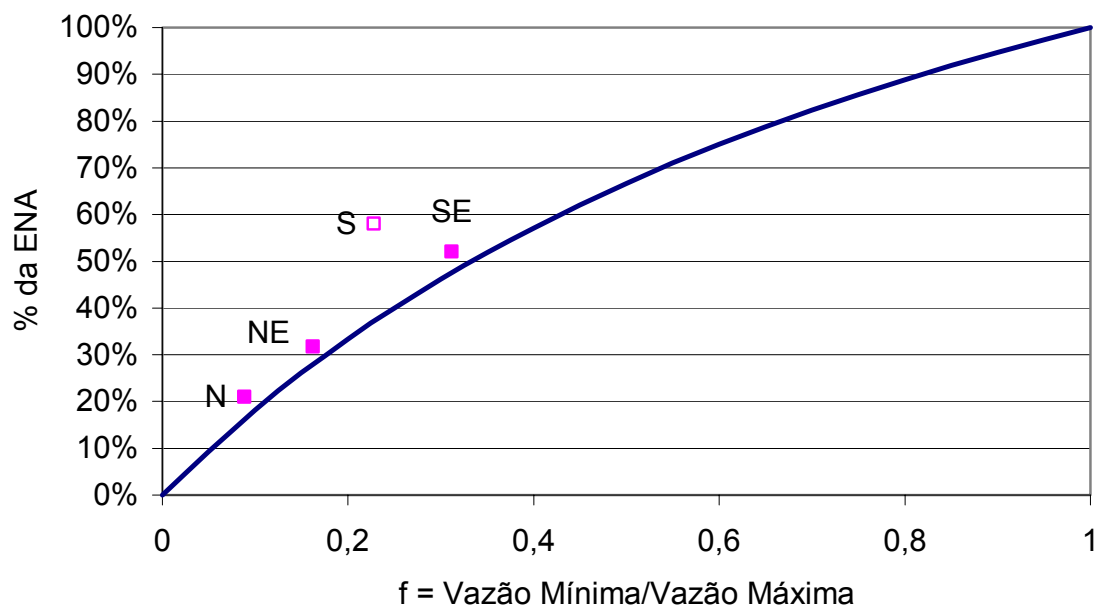


Figura 13: Fração aproveitada da energia natural afluenta em uma usina a fio d'água em função da razão entre as vazões mínima e máxima. Os pontos representam os valores esperados, baseados na média das vazões reais; a curva representa os valores obtidos com a função utilizada (co-seno + constante).

A Região Norte, onde se espera a maior expansão para geração no sistema integrado, apresenta o menor aproveitamento da energia afluenta total anual em usinas à fio d'água (20%). As restrições decorrentes da melhor compreensão dos problemas ambientais tornarão muito difícil a construção de barragens com capacidade de reservação nesta região..

Sistemas com Regulação Parcial

O Sistema com Regulação Parcial é de um tipo intermediário entre o Caso 2 (regulagem para um ano) e o Caso 3 (fio d'água). Esse tipo de sistema não tem capacidade de compensar as variações sazonais ao longo do ano, mas também não opera a fio d'água. Nele, verter água faz parte do procedimento normal e somente uma fração da energia é aproveitada.

O Caso 4 (Figuras 14 e 15) caracteriza-se também por apresentar uma afluência com maior variação ao longo do ano tentando-se, também nisto, reproduzir condições do atual Sistema da Região Norte⁸.

Caso 4:

Fluxo Médio	100	Capacidade Acumulação	130	Estoque Mínimo	0%
Fluxo Mínimo Mensal	18	Estoque Inicial	36	Estoque Máximo	100%
Produção Mensal	64	Vazão Mínima	0	Perda no ano seco	20%
Fluxo Máximo Mensal	182				

Sistema com Regulação Parcial

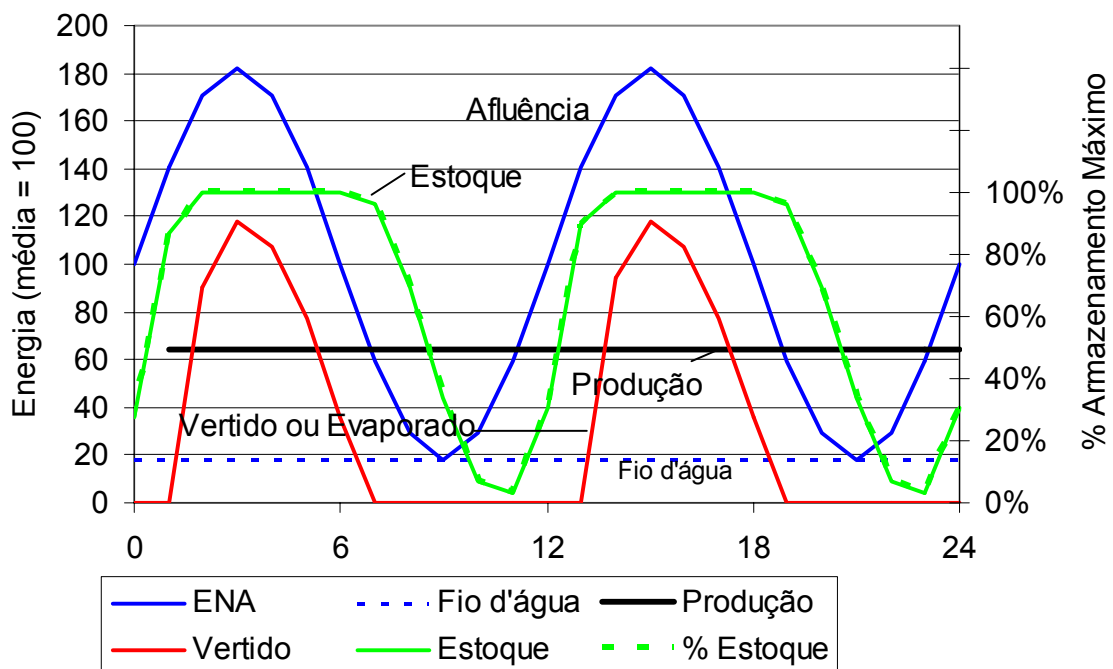


Figura 14: Simulação de sistema com regulação parcial onde o armazenamento de água é pouco mais que o operacional (inferior a um mês de afluência máxima). A regulação do sistema atende apenas há a alguns meses secos (três) onde o volume de água que afluí à usina é menor que o utilizado na produção. Não obstante o estoque ser de cerca de 2 meses de produção (como o simulado na Figura 13), a capacidade de regulação é menor neste caso em virtude da baixa afluência nos meses secos.

Além da perda na produção em virtude da queda uniforme na afluência mensal durante o ano, mostra-se (Figura 15) que uma variação da precipitação mensal ao longo do ano (sem redução da produção anual) pode também provocar uma queda importante na produção. Esse tipo de sistema apresenta, assim, grande instabilidade frente ao regime de chuvas, o que indica que a introdução de usinas com forte sazonalidade e baixo armazenamento torna imperiosa a complementação com usinas de outro tipo, capazes de fornecer estabilidade ao sistema.

⁸ No caso, a afluência mínima considerada foi de apenas 18% da média, enquanto nos casos anteriores foi tomada como 46% da afluência média anual.

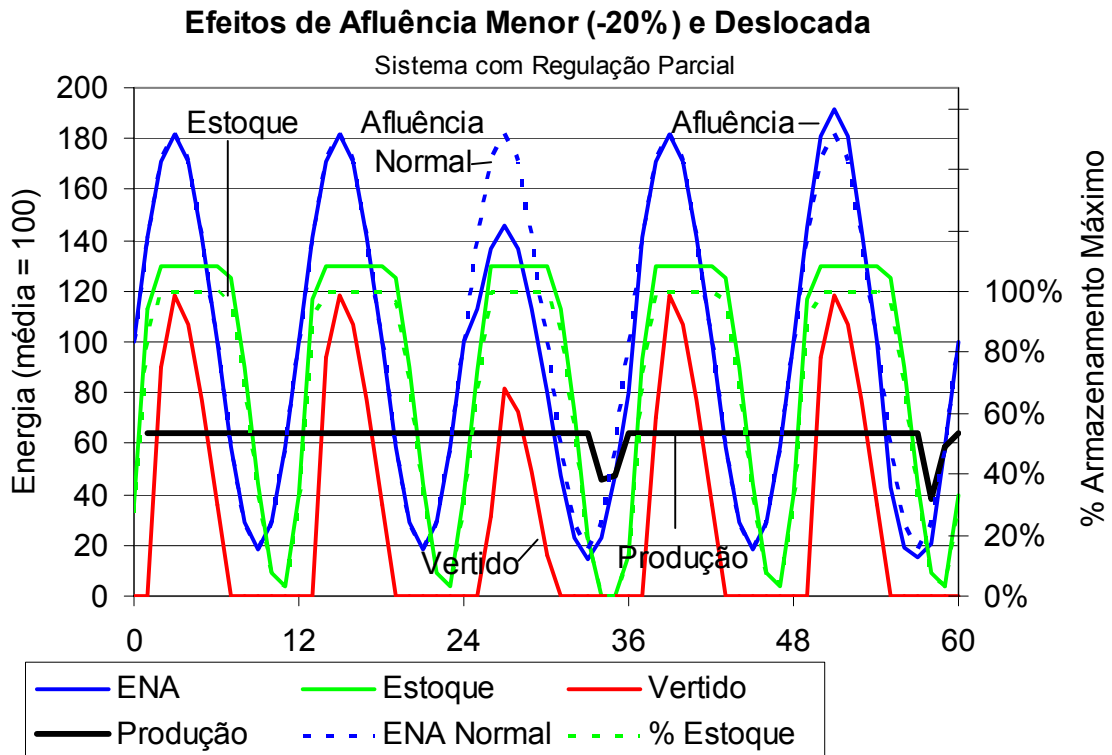


Figura 15: Na simulação de sistema com regulação parcial são mostrados dois fenômenos que podem provocar uma redução importante na produção: o primeiro é a redução uniforme de 20% da afluência ao longo de um ano seco, o segundo é constituído por uma variação da distribuição das chuvas (com o mesmo total anual); na simulação, uma pequena variação na distribuição da afluência provoca uma queda importante na produção (como a ocorrida na Região Norte no final de 2002).

Conclusão

Foi apresentado um modelo simples para a descrição de sistemas de geração, baseados em hidroeletricidade. Foram estudados casos típicos com simulações que procuram reproduzir alguns sistemas existentes no Brasil que forneceram resultados coerentes com a realidade. Também foram abordadas algumas situações que, embora não correspondam a situações verificadas nos sistemas regionais, fornecem informações úteis sobre configurações conceitualmente importantes.