

Agência Nacional de Águas-ANA
Departamento de Águas e Energia Elétrica -DAEE

**PARTE C - ESTUDOS SOBRE A DISPONIBILIDADE HÍDRICA DOS
RESERVATÓRIOS DO SISTEMA CANTAREIRA E A DEFINIÇÃO
DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DE SEUS RESERVATÓRIOS**

Relatório Final
Julho 2004 – V 1.0

ÍNDICE

1. OBJETIVOS E DEFINIÇÕES	003
2. DADOS DO SISTEMA CANTAREIRA	004
2.1. Séries de Vazões Naturais Médias Mensais nos Aproveitamentos	004
2.2. Relações Cota x Volume dos Reservatórios	004
2.3. Níveis de água mínimos e máximo operacionais e Volumes Úteis dos Reservatórios	004
3. SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DO SISTEMA CANTAREIRA	007
3.1. Modelagem Matemática e Computacional	007
3.2. Simulação da Operação do Sistema Cantareira	008
3.3. Síntese dos Resultados	011
4. CONCEPÇÃO DO MODELO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA CANTAREIRA	014
4.1. Introdução	014
4.2. Curvas de Aversão a Risco	016
4.3. Concepção do Modelo de Operação	016
4.4. Modelagem Matemática e Computacional da Operação	018
5. SIMULAÇÃO DAS REGRAS OPERACIONAIS DO SISTEMA CANTAREIRA	020
5.1. Seleção da Alternativa Operacional	020
5.2. Resultados da Alternativa Selecionada	023
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	025

ANEXO C-I – AJUDA A MEMÓRIA DA REUNIÃO DO DIA 13 DE JULHO

**ANEXO C-II – LIMITES DE VAZÃO DE RETIRADA EM FUNÇÃO DO
ARMAZENAMENTO DO SISTEMA EQUIVALENTE**

1. Objetivos e Definições

Nesta parte C da Nota Técnica são apresentados os estudos referentes à disponibilidade hídrica dos reservatórios do Sistema Cantareira e a definição das condições de operação dos reservatórios. São apresentados os seguintes elementos:

- os dados do Sistema Cantareira necessários para a simulação da operação de seus reservatórios;
- a modelagem matemática e computacional desenvolvida para a simulação da operação dos reservatórios do Sistema Cantareira;
- a simulação da operação do Sistema Cantareira;
- a síntese dos resultados das simulações, indicando os riscos associados, os impactos na bacia do rio Piracicaba e os benefícios para o suprimento da Região Metropolitana de São Paulo-RMSP;
- o detalhamento da alternativa operacional selecionada com a definição dos seus critérios;
- os resultados das simulações considerando a alternativa operacional selecionada;
- conclusões e recomendações quanto às condições de operação a serem adotadas;
- recomendações a serem contempladas na Resolução/Portaria para melhor a disponibilidade de dados e a operação do sistema equivalente.

Conforme descrito na parte A deste relatório, o Sistema Cantareira é formado por uma série de reservatórios, túneis e canais, que captam e desviam água de alguns dos cursos de água da bacia do rio Piracicaba, para o rio Juqueri, na bacia do Alto Tietê, donde, no reservatório de Paiva Castro, as águas são bombeadas para o reservatório de Águas Claras, tendo como finalidade o abastecimento de parte da Região Metropolitana de São Paulo

Para fins de definição das condições de operação dos reservatórios e tendo em vista que os reservatórios Jaguari–Jacareí, Cachoeira e Atibainha são os únicos que permitem uma regularização das vazões para período de tempo significativo, ficam definidos os seguintes conceitos:

- Sistema Equivalente: representa a soma dos volumes úteis dos reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha;
- demanda RMSP: representa a demanda requerida no túnel 5 que transfere as águas da bacia do rio Piracicaba para a bacia do Alto Tietê, desaguando no reservatório Paiva Castro;
- demanda da bacia do rio Piracicaba: representa a demanda requerida na bacia do rio Piracicaba, que deverá ser suprida pela soma das vazões efluentes dos reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha.

O reservatório de Paiva Castro, em função da sua localização, já na bacia do Alto Tietê, e do seu tamanho, deve ser operado em tempo real de modo a otimizar a utilização dos recursos hídricos do Sistema Cantareira.

2. Dados do Sistema Cantareira

2.1 Séries de Vazões Naturais Médias Mensais nos Aproveitamentos

Os estudos hidrológicos desenvolvidos em 1995 pelo consórcio HIDROPLAN no âmbito do “Plano Integrado de Aproveitamento e Controle dos Recursos Hídricos das Bacias Alto Tietê, Piracicaba e Baixada Santista” permitiram a definição das séries de vazões naturais médias mensais dos rios Jaguari e Jacareí, Cachoeira e Atibainha nos aproveitamentos homônimos, bem como do rio Juqueri no aproveitamento Paiva Castro. Essas séries de vazões foram determinadas para o período de janeiro de 1930 a dezembro de 1993.

Os estudos hidrológicos apresentados na parte B deste relatório permitiram a complementação das séries de vazões naturais médias mensais para o período de janeiro de 1994 a dezembro de 2003. Esta complementação mostrou-se fundamental para as análises operacionais, uma vez que o período de 1998 a 2003 caracterizou-se pela baixa disponibilidade de recursos hídricos.

As séries de vazões naturais médias mensais são apresentadas no Anexo BI da parte B deste relatório e resultam em uma vazão média de longo termo de 40,2 m³/s para a bacia do Piracicaba, nos aproveitamentos do Sistema Cantareira, e de 44,8 m³/s, quando incluída a bacia do rio Juqueri em Paiva Castro.

2.2 Relações Cota x Volume dos Reservatórios

A SABESP forneceu as relações cota x volume dos reservatórios que compõem o Sistema Cantareira. As Figuras 1 a 4 apresentam as curvas cota x volume dos reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro, respectivamente.

2.3 Níveis de água mínimos e máximos operacionais e Volumes Úteis dos Reservatórios

A SABESP forneceu o documento intitulado “7. Tabelas “Resumo” – 7.1 Características Notáveis dos Mananciais”, indicando os níveis de água mínimos e máximos operacionais e os respectivos volumes mínimos, máximos e úteis dos reservatórios do Sistema Cantareira. A Tabela 1 apresenta estes dados.

TABELA 1 – NÍVEIS DE ÁGUA MÍNIMOS E MÁXIMOS OPERACIONAIS E VOLUMES DOS RESERVATÓRIOS DO SISTEMA CANTAREIRA

Reservatórios	NA mínimo	NA máximo	Volume Mínimo (hm ³)	Volume Máximo (hm ³)	Volume Útil (hm ³)
Jaguari-Jacareí	820,80	844,00	229,49	1.037,35	807,86
Cachoeira	811,72	821,78	44,05	114,60	70,55
Atibainha	781,88	786,86	201,35	301,51	100,16
Paiva Castro	743,80	745,61	18,1	27,6	9,44
Total com Paiva Castro:			493,01	1.481,03	988,02
Total sem Paiva Castro:			474,89	1.453,46	978,57

Figura 1 - Relação Cota x Volume do Reservatório Jaguari-Jacareí

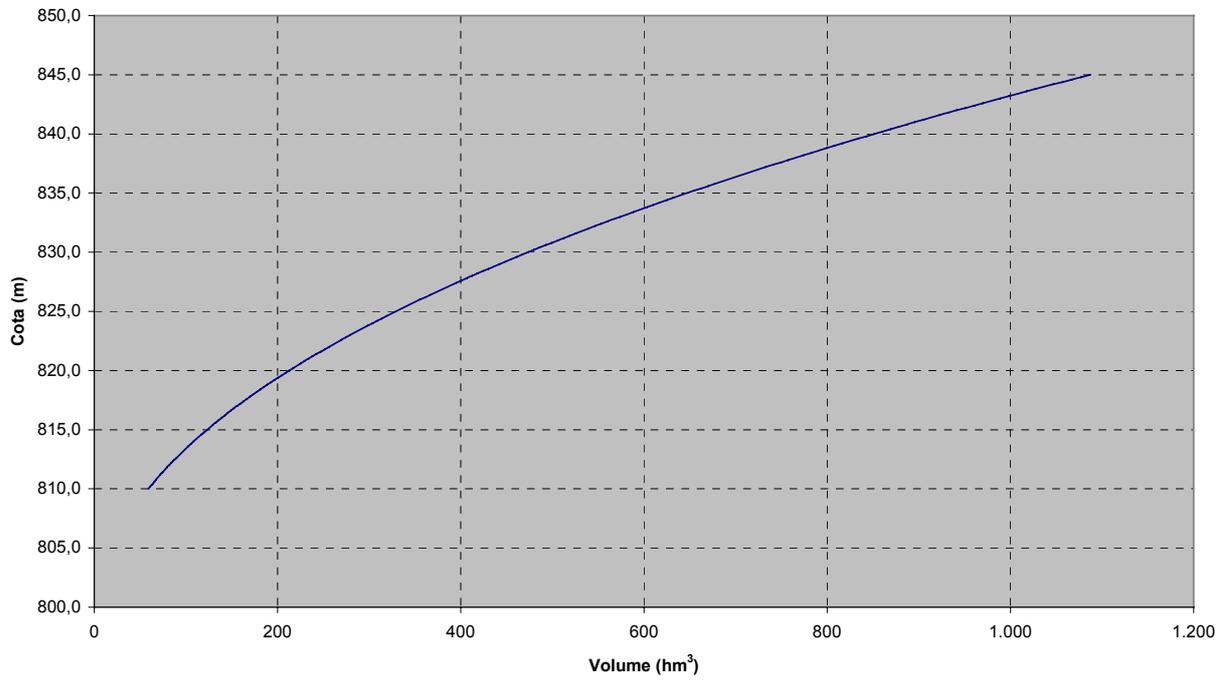


Figura 2 - Relação Cota x Volume do Reservatório Cachoeira

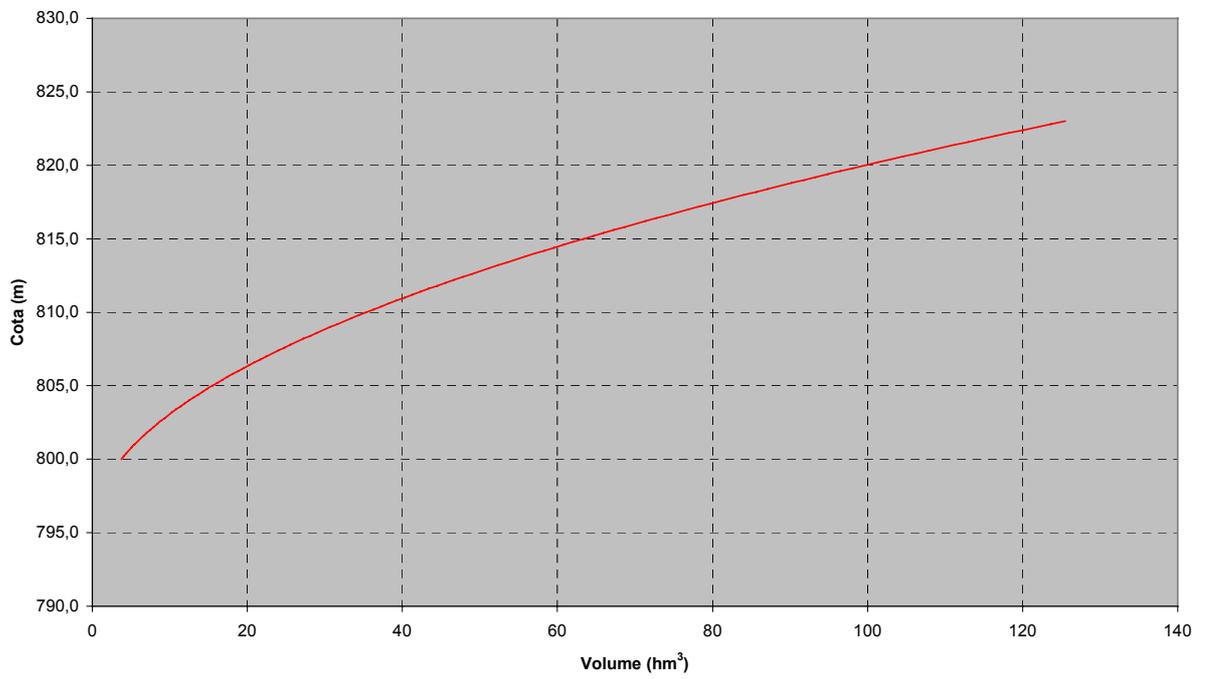


Figura 3 - Relação Cota x Volume do Reservatório Atibainha

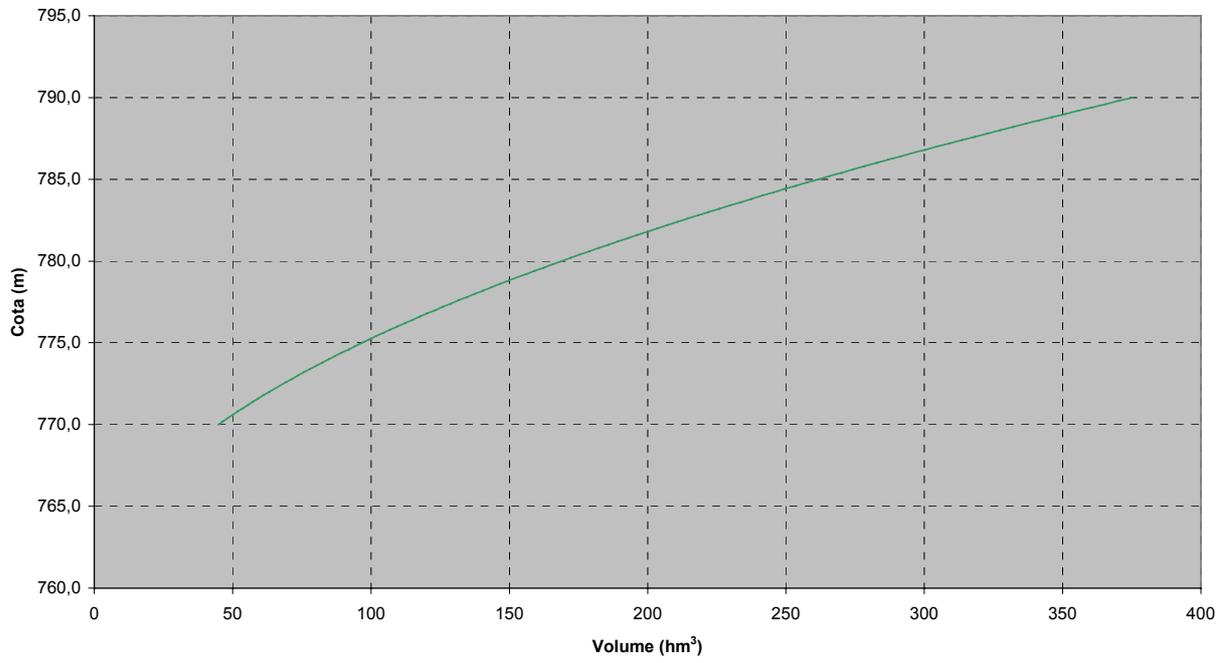
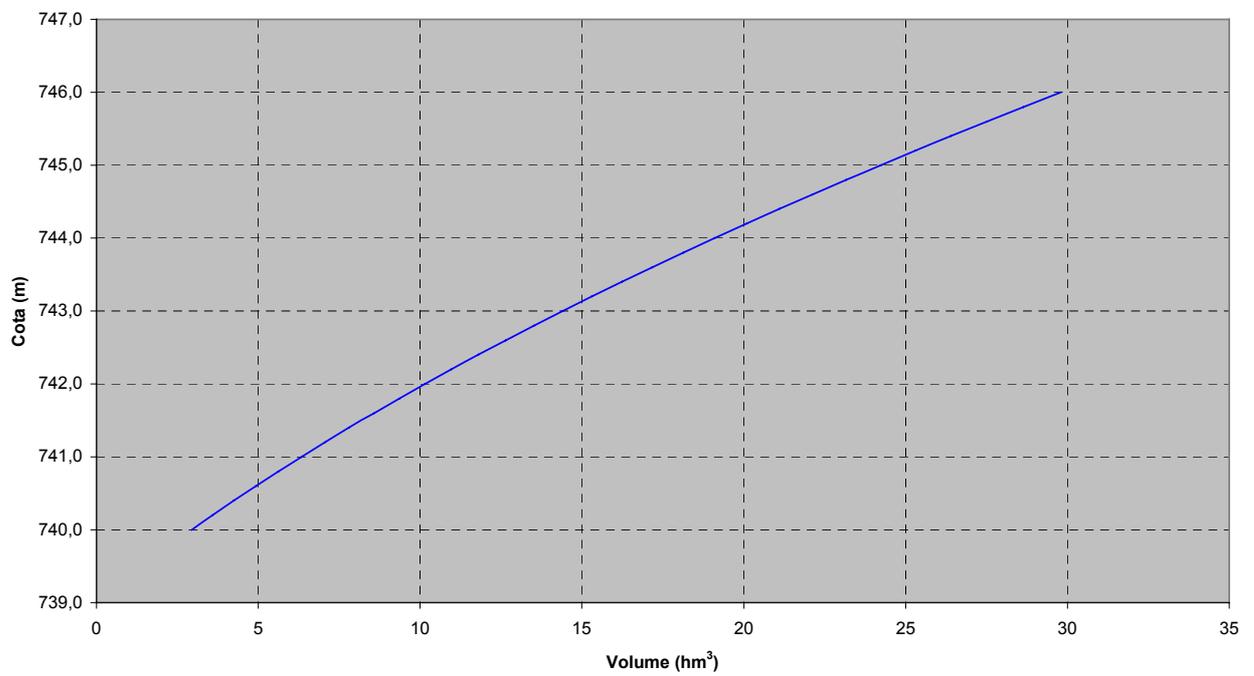


Figura 4 - Relação Cota x Volume do Reservatório Paiva Castro



3. Simulação da Operação do Sistema Cantareira

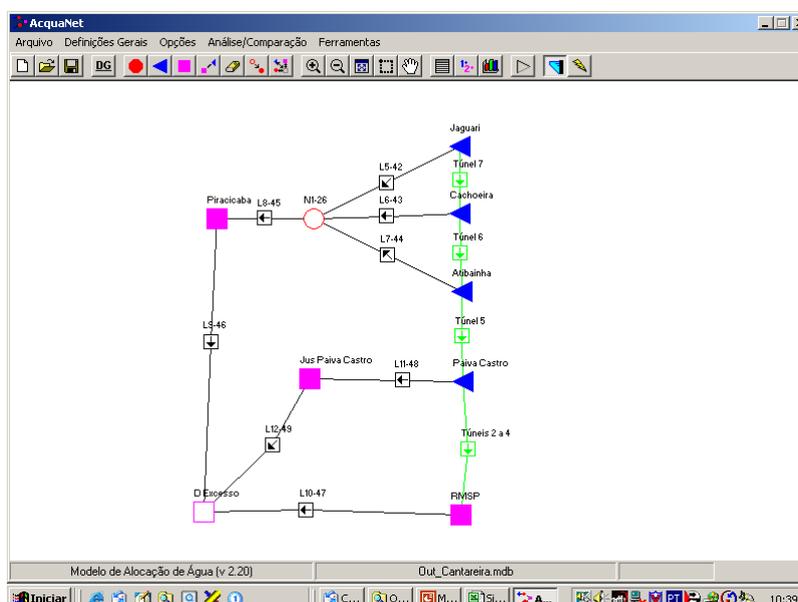
3.1 Modelagem Matemática e Computacional

Para a avaliação da disponibilidade hídrica do Sistema Cantareira, isto é, da vazão que pode ser regularizada por cada um dos seus reservatórios e pelo conjunto de reservatórios, para diferentes níveis de garantia, procedeu-se à modelagem matemática e computacional do Sistema Cantareira, utilizando o modelo de rede de fluxo denominado **AcquaNet**, desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões da Escola Politécnica da USP (LabSid). A decisão pela utilização do modelo AcquaNet teve como critérios:

- a sua versatilidade, que facilita a inclusão, exclusão e modificação dos diferentes elementos que compõem o Sistema;
- a utilização pela SABESP do modelo ModSimP32, desenvolvido pelo LabSid, com características similares ao AcquaNet;
- a sua consistência, que vem sendo testado em diversos sistemas, incluindo os sistemas operados pela SABESP para abastecimento da RMSP.

O módulo AlocaLS do modelo AcquaNet foi utilizado para a simulação das diversas alternativas operacionais do Sistema Cantareira. O sistema foi representado por uma rede de fluxo, composta por nós – reservatórios, nós de passagem sem armazenamento ou nós de demanda – e arcos ou elos – canais naturais ou artificiais (Figura 5). Os dados do Sistema Cantareira, como as séries de vazões afluentes, as curvas cota x volume, os volumes máximo e mínimo, a capacidade hidráulica dos túneis, as demandas e a respectiva prioridade, dentre outros, foram fornecidos como entrada do modelo.

FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO DA REDE DE FLUXO DO SISTEMA CANTAREIRA



As transferências de vazões através dos túneis estão relacionadas aos custos, determinados a partir de um custo unitário por unidade de vazão definido pelo usuário. Por sua vez, as demandas associadas à cada nó recebem índices que representam a prioridade de atendimento, a partir da qual pode-se obter o respectivo custo utilizando uma relação linear.

O sistema é resolvido a cada mês dentro do período das séries de vazões fornecidas. A solução é obtida através do algoritmo de otimização denominado Out-of-Kilter que procura minimizar o custo de operação do sistema, resultado da somatória do produto entre o custo unitário de cada elemento e a respectiva vazão aduzida. A descrição detalhada da modelagem matemática e computacional, bem como do algoritmo de solução, pode ser obtida através de Roberto, A.N.¹

Para as demandas que compõem o sistema foram atribuídas prioridades, enquanto para os túneis de interligação foram arbitrados custos unitários fixos e iguais. Para cada variante operacional do sistema foram feitas diversas simulações variando-se o valor total das demandas para a RMSP a ser atendido pelo Sistema Cantareira, e para a bacia do rio Piracicaba, esta entendida como a soma das vazões defluentes dos aproveitamentos do Sistema Cantareira. A simulação de cada variante operacional permitiu obter a respectiva garantia, considerada como a percentagem dos meses do histórico de vazões em que a demanda foi atendida.

Nas simulações foram adotados os mesmos custos para as transferências entre os túneis, variando-se apenas as prioridades e a magnitude das demandas para a bacia do rio Piracicaba e para o abastecimento da RMSP.

3.2 Simulação da Operação do Sistema Cantareira

As demandas consideradas nas simulações do Sistema Cantareira como um todo foram:

- RMSP: demanda fixada em 33 m³/s;
- Piracicaba: as demandas variaram entre 4 e 7 m³/s;
- vazão mínima a ser descarregada do reservatório Paiva Castro para o rio Juqueri: fixada em 0,5 m³/s.

A prioridade da demanda a jusante do reservatório Paiva Castro foi fixada em 1, o que representa máxima prioridade. As prioridades das demandas da RMSP e da bacia do rio Piracicaba receberam valores de 1 ou 3.

As simulações foram feitas com passo mensal, para o período de janeiro de 1930 a dezembro de 2003, correspondendo ao histórico de vazões naturais médias mensais dos reservatórios do Sistema Cantareira. Os reservatórios foram considerados com armazenamento pleno no início das

¹ Roberto, A.N. “Modelos de Rede de Fluxo para Alocação da Água entre Múltiplos Usos de uma Bacia Hidrográfica”, dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Agosto de 2.002

simulações, uma vez que os regimes hidrológicos e de operação permitem restabelecer seus volumes.

As Figuras 6 e 7 apresentam as vazões aduzidas pelo Sistema Cantareira para a RMSP e para a bacia do rio Piracicaba considerando prioridades iguais a um para essas demandas. Verifica-se nas Figuras 6 e 7 a ocorrência de dois períodos de déficits: de novembro de 1954 a dezembro de 1956 e de novembro de 2002 a novembro de 2003. O primeiro período é mais prolongado entretanto apresenta déficits de menor magnitude. Para o caso particular da demanda da bacia do rio Piracicaba, de $7 \text{ m}^3/\text{s}$, ocorre um déficit adicional no período de outubro a novembro de 1945.

É importante notar que, em simulações como estas, que não consideram cenários hidrológicos futuros ou previsões de afluências, os déficits são concentrados mas com grande magnitude. A Figura 8 apresenta a soma dos volumes dos reservatórios do Sistema Cantareira, expressa em percentagens do volume útil. Verifica-se que nos períodos mencionados no parágrafo anterior os reservatórios atingem o volume nulo, passando a aduzir somente as vazões afluentes, operando a fio d'água.

Figura 6 - Vazões Aduzidas pelo Sistema Cantareira para a RMSP

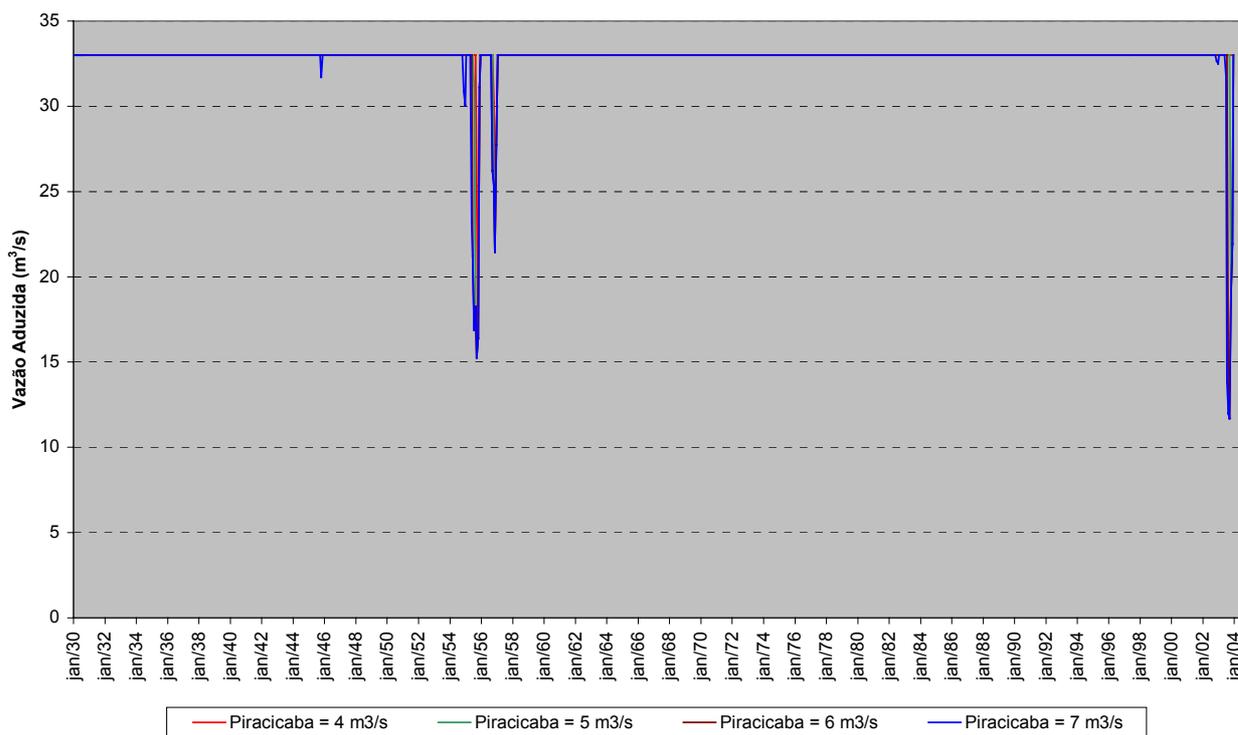


Figura 7 - Vazões Aduzidas pelo Sistema Cantareira para a bacia do Rio Piracicaba sem considerar os vertimentos

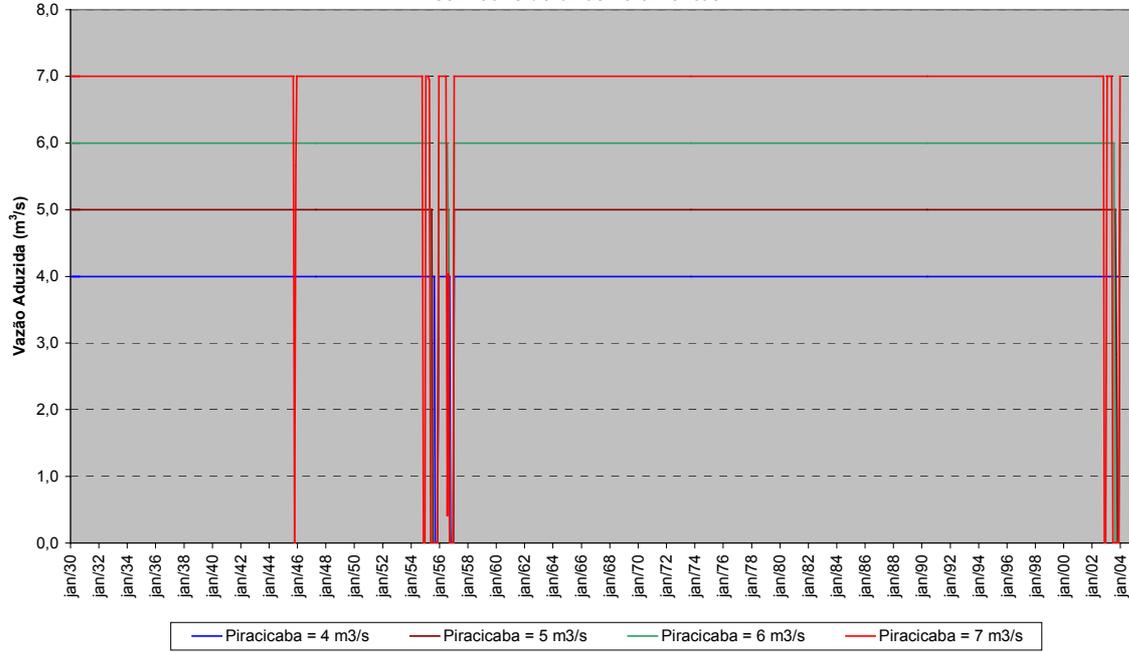
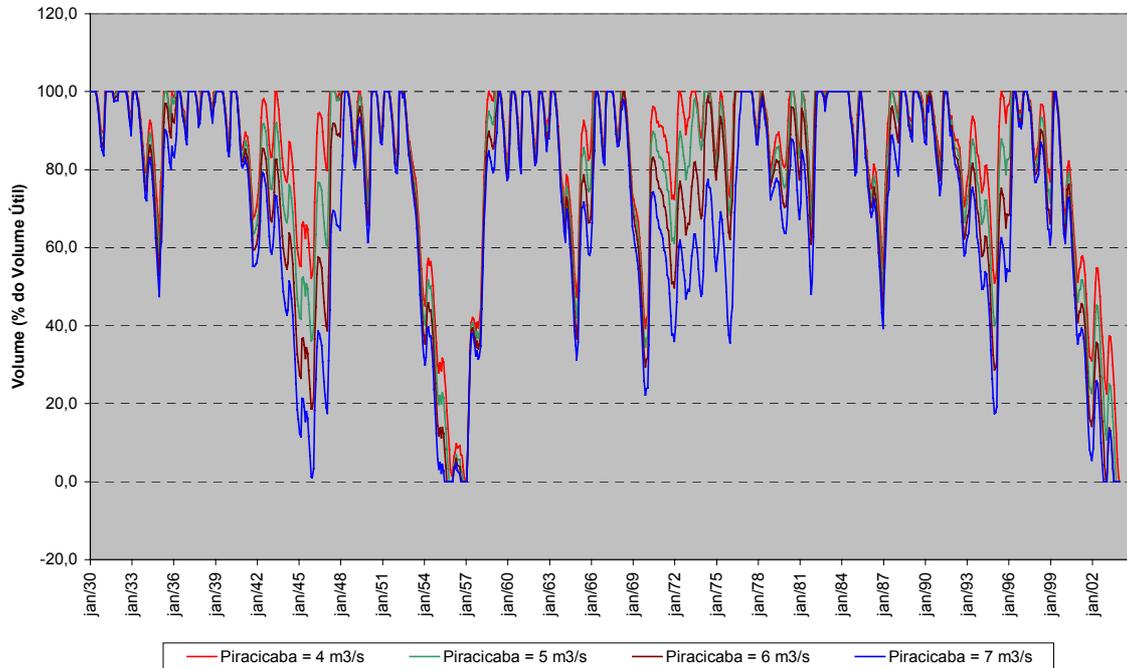


Figura 8 - Volumes dos Reservatórios do Sistema Cantareira



3.3 Síntese dos Resultados

Os resultados obtidos foram analisados quanto à garantia de atendimento das demandas. As Tabelas 2 a 4 apresentam as garantias de atendimento das demandas para as diferentes prioridades consideradas. Verifica-se que as garantias para a RMSP são pouco sensíveis às prioridades, havendo apenas variações nas magnitudes dos déficits.

TABELA 2 – GARANTIAS DE ATENDIMENTO DAS DEMANDAS PARA PRIORIDADES IGUAIS A UM PARA AMBAS AS DEMANDAS

Vazão Objetivo (m ³ /s)		Risco (%)		Garantia (%)	
Piracicaba	RMSP	Piracicaba	RMSP	Piracicaba	RMSP
3,30	33,00	0,0	0,0	100,0	100,0
4,00	33,00	0,7	0,7	99,3	99,3
5,00	33,00	1,4	1,1	98,7	98,9
6,00	33,00	1,8	1,6	98,2	98,4
7,00	33,00	2,8	2,5	97,2	97,5

TABELA 3 - GARANTIAS DE ATENDIMENTO DAS DEMANDAS PARA PRIORIDADE 1 NA RMSP E 3 NA BACIA DO RIO PIRACICABA

Vazão Objetivo (m ³ /s)		Risco (%)		Garantia (%)	
Piracicaba	RMSP	Piracicaba	RMSP	Piracicaba	RMSP
3,30	33,00	0,0	0,0	100,0	100,0
4,00	33,00	0,7	0,7	99,3	99,3
5,00	33,00	1,4	1,1	98,7	98,9
6,00	33,00	1,8	1,6	98,2	98,4
7,00	33,00	2,8	2,5	97,2	97,5

TABELA 4 - GARANTIAS DE ATENDIMENTO DAS DEMANDAS PARA PRIORIDADE 3 NA RMSP E 1 NA BACIA DO RIO PIRACICABA

Vazão Objetivo (m ³ /s)		Risco (%)		Garantia (%)	
Piracicaba	RMSP	Piracicaba	RMSP	Piracicaba	RMSP
3,30	33,00	0,0	0,0	100,0	100,0
4,00	33,00	0,0	0,7	100,0	99,3
5,00	33,00	0,0	1,4	100,0	98,7
6,00	33,00	0,0	1,8	100,0	98,2
7,00	33,00	0,0	3,0	100,0	97,0

A Figura 9 apresenta a variação das garantias de atendimento das demandas para a bacia do rio Piracicaba e para a RMSP em função das vazões defluentes do Sistema para a bacia do rio

Piracicaba. Os resultados indicam que as garantias estão acima de 95 % para as alternativas consideradas. No entanto, do aspecto prático, esta operação resultaria em períodos com colapso de abastecimento, resultado de déficits de grande magnitude.

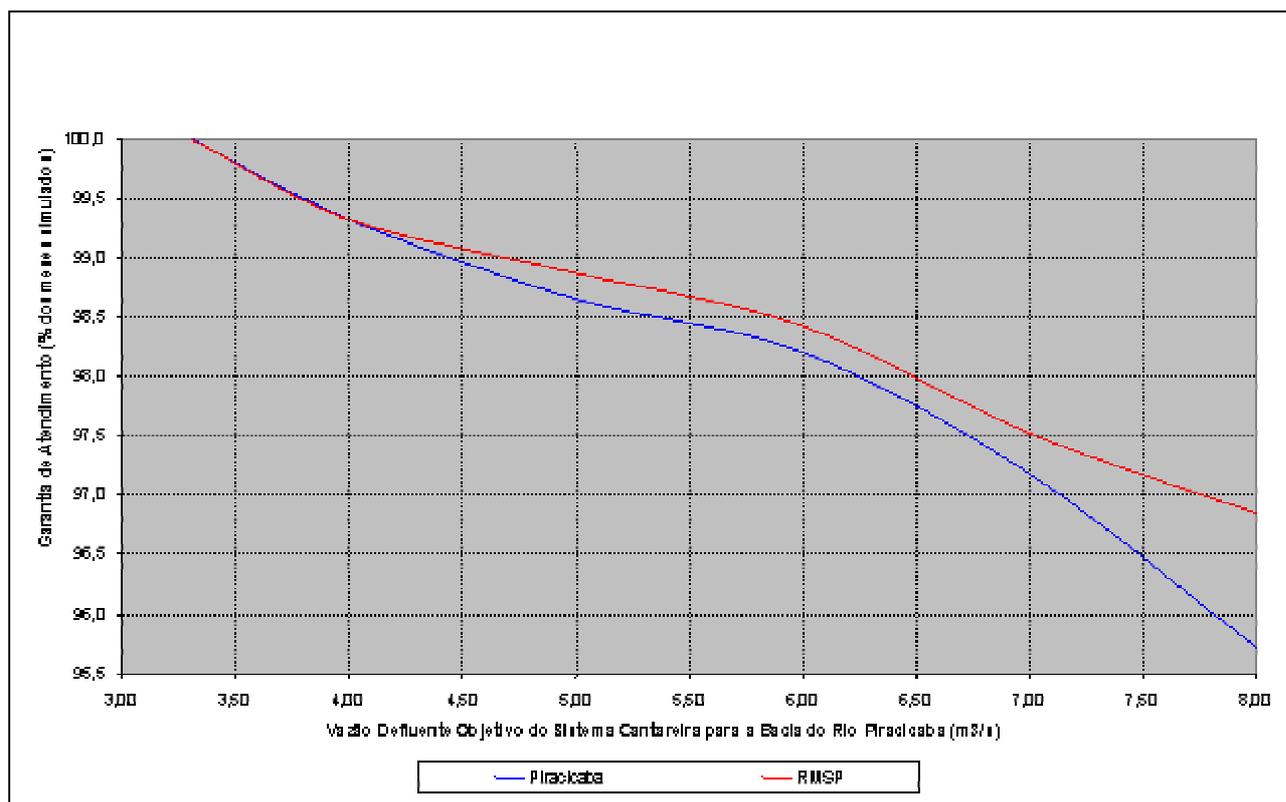


FIGURA 9 – GARANTIA DE ATENDIMENTO DAS DEMANDAS DA BACIA DO PIRACICABA E DA RMSP

As Tabelas 2 a 4 indicam que a vazão regularizada pelo sistema, com garantia de 100 %, resulta em 36,3 m³/s. Para verificar a influência da integração do sistema Cantareira e, em particular, os ganhos propiciados pelo reservatório Paiva Castro, foram feitas simulações complementares considerando os aproveitamentos em operação isolada e em operação integrada, sem a presença do aproveitamento Paiva Castro. Foram determinados, também, os ganhos de sinergia hídrica pela integração do Sistema Cantareira através dos túneis 5 a 7. A Tabela 5 apresenta a síntese dos resultados.

TABELA 5 – SÍNTESE DAS AVALIAÇÕES DAS VAZÕES REGULARIZADAS NO SISTEMA CANTAREIRA

Aproveitamentos	Vazão Regularizada (m ³ /s)
Jaguari-Jacareí em operação isolada	22,2
Cachoeira em operação isolada	4,1
Atibainha em operação isolada	4,6
Paiva Castro em operação isolada	1,8
Total isolado com Paiva Castro	32,7
Total isolado sem Paiva Castro	30,9
Total com Integração com Paiva Castro	36,3
Total com Integração sem Paiva Castro	33,6
Sinergia do sistema com Paiva Castro	3,6
Sinergia do sistema sem Paiva Castro	2,7
Sinergia do reservatório Paiva Castro	0,9

Os resultados indicaram que a vazão regularizada pelos reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha, em operação integrada, perfaz 33,6 m³/s. Desta forma, a inclusão do reservatório Paiva Castro no Sistema Cantareira resulta em um ganho de vazão regularizada de 2,7 m³/s, sendo 2,2 m³/s integrados ao abastecimento da RMSP e 0,5 m³/s mantidos como defluência mínima no rio Juqueri.

Verifica-se na Tabela 5 que a sinergia do Sistema Cantareira atinge 3,6 m³/s, que corresponde a 10,7 % da vazão regularizada total. O reservatório Paiva Castro em operação isolada teria uma vazão regularizada de 1,8 m³/s. Dessa forma, uma vez que a operação integrada do Sistema Cantareira resulta um ganho de sinergia de 2,7 m³/s, há um ganho hídrico de 0,90 m³/s.

4. Concepção do Modelo de Operação do Sistema Cantareira

4.1 Introdução

Pela Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, cabe à ANA, entre suas atribuições, definir e fiscalizar as condições de operação de reservatórios por agentes públicos e privados, visando a garantir o uso múltiplo dos recursos hídricos, conforme estabelecido nos planos de recursos hídricos das respectivas bacias hidrográficas.

No caso específico da alocação de água do Sistema Cantareira, pela sua importância, está sendo proposta a adoção de uma metodologia baseada em um mecanismo de representação de aversão ao risco de racionamento. O mecanismo adotado pelo Grupo de Estudos consiste no emprego de Curvas Bianaus de Aversão a Risco – CAR para o Sistema Equivalente formado pelos reservatórios de Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibaí, as quais estabelecem níveis de água armazenada, em base mensal, adotados como referência de segurança para o atendimento das demandas. O esquema a seguir apresenta os reservatórios do Sistema Cantareira e os quatro pontos de entrega das vazões de retirada do Sistema Equivalente.

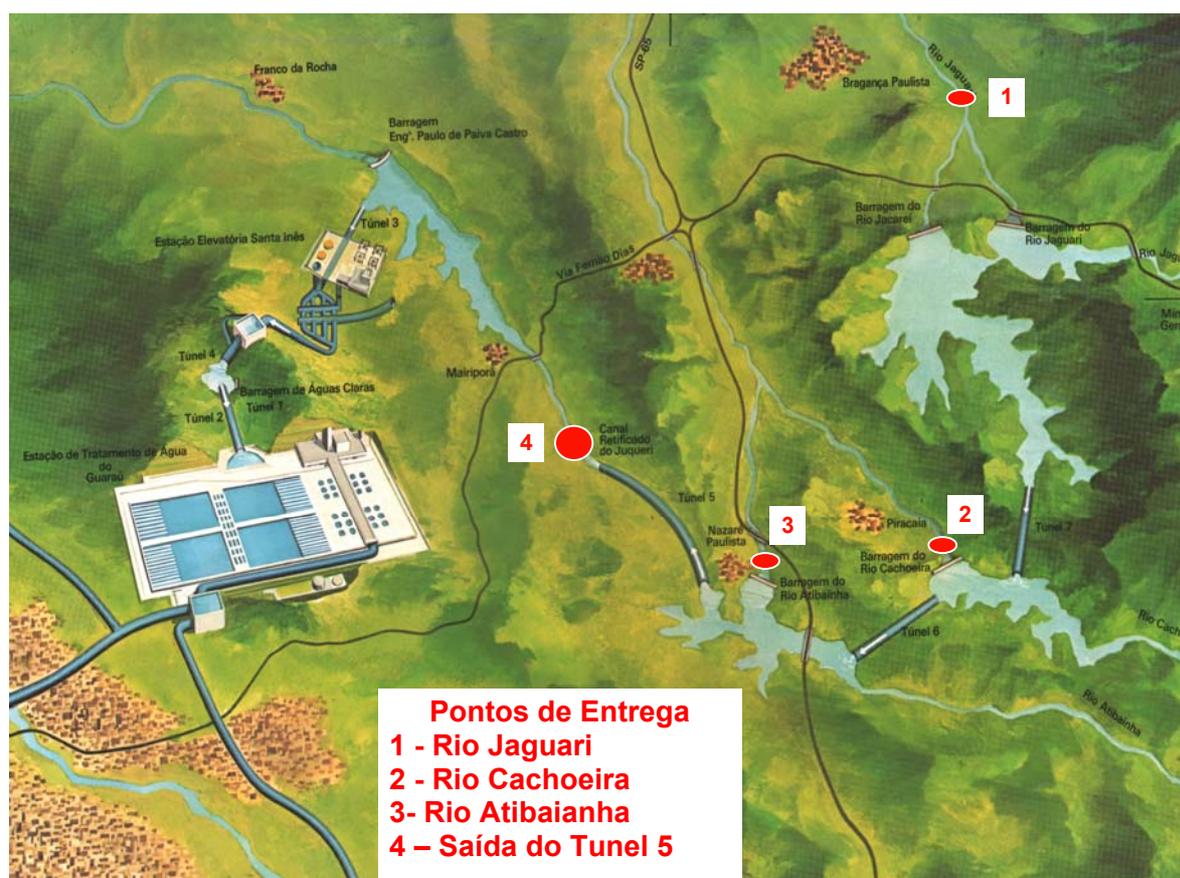


FIGURA 10 – PONTOS DE ENTREGA DAS VAZÕES DE RETIRADA

4.2 Curvas de Aversão a Risco

O Sistema Cantareira atende cerca de 9 milhões de pessoas na RMSP. Os resultados apresentados no item 3 deste relatório indicam altas garantias de atendimento, mas com déficits de grande magnitude. Em função destes resultados e da grande dependência do abastecimento da RMSP das águas provenientes do Sistema Cantareira há a necessidade de se contar com regras operativas que evitem o colapso de abastecimento das regiões envolvidas.

A alternativa metodológica selecionada para a operação do Sistema Cantareira foi a utilização de Curvas de Aversão a Risco-CAR. Esta metodologia tem como base a previsão de afluições nos meses subsequentes a partir de vazões observadas, julgadas representativas. Esta seqüência de vazões é denominada de cenário hidrológico.

Na construção das Curvas de Aversão a Risco adotadas nesta Nota Técnica foi considerado que ao final do período de previsão representado pelo cenário hidrológico deveria haver no Sistema Equivalente, uma reserva estratégica, isto é, um volume mínimo desejável no final do biênio.

Como já foi comentado, o Sistema Equivalente representa a soma dos volumes úteis dos reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha. A demanda a ser atendida pelo sistema equivalente foi estimada em 31 m³/s, pela diferença entre a demanda total da RMSP a ser atendida pelo Sistema Cantareira (33 m³/s) e o ganho de sinergia hídrica relativa ao reservatório de Paiva Castro (2,7m³/s) reduzida da vazão a ser mantida a jusante do mesmo (0,5m³/s).

A análise dos períodos críticos da alta bacia do rio Piracicaba e, em especial, o evento hidrológico do período de 1953 a 1954 indicou a necessidade de os cenários hidrológicos terem período de 2 anos. Assim, a construção das Curvas de Aversão a Risco seguiu as seguintes etapas:

- é fixada uma vazão qualquer Q para a construção da curva de aversão ao risco, que representa a vazão de retirada para atendimento da bacia do rio Piracicaba e da RMSP;
- estabelece-se uma reserva estratégica (Vol_t) para o volume do Sistema Cantareira, desejável ao final do período de 2 anos;
- determina-se o volume requerido no final do mês antecedente ao último período da simulação (Vol_{t-1}) pela soma do volume da reserva estratégica (Vol_t) com a diferença entre o volume a ser aduzido (Q . Δt) e o volume afluente (Qafl_t . Δt), ou seja:

$$Vol_{t-1} = Vol_t + (Q - Qafl_t) \cdot \Delta t$$

- o procedimento, então, é repetido até o início do período, determinando-se para cada mês t o volume requerido para adução da vazão Q, ou seja:

$$Vol_{t-2} = Vol_{t-1} + (Q - Qafl_{t-1}) \cdot \Delta t$$

onde t é o índice que representa o mês e Δt é o intervalo de tempo representado pelo período de 1 mês;

O mencionado procedimento é repetido para diversas vazões de retirada – Q.

As Curvas de aversão a risco foram definidas considerando os reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha, perfazendo um volume útil de 978,57 hm³. A Figura 10 apresenta, a título

ilustrativo, as curvas de aversão ao risco elaboradas para uma reserva estratégica de 5 % e um cenário hidrológico do período bianual de mínima disponibilidade hídrica, correspondente ao biênio de 1953/1954.

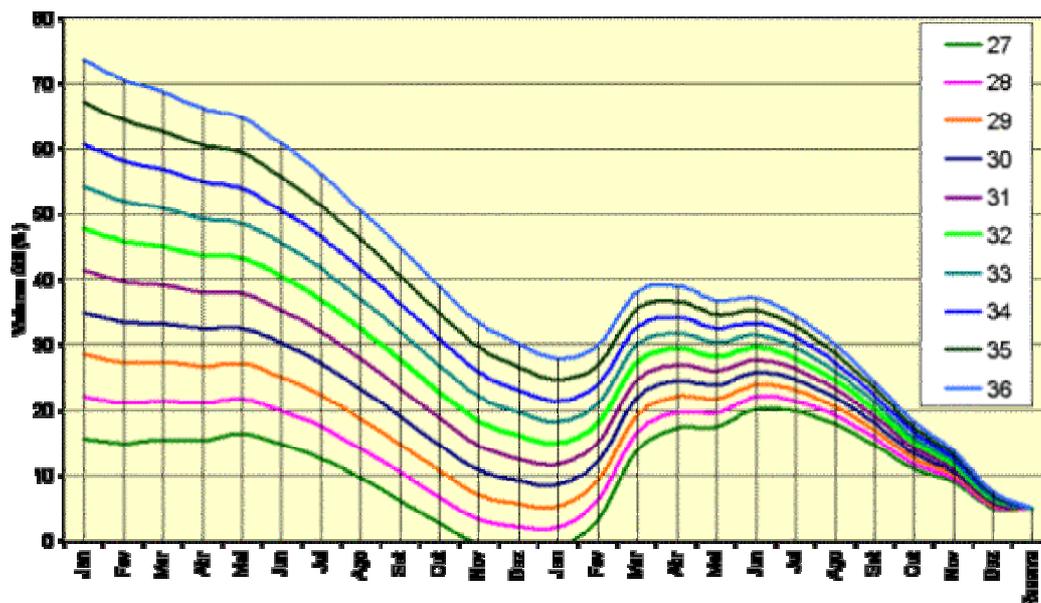


FIGURA 11 – CURVAS DE AVERSÃO A RISCO PARA DIVERSAS VAZÕES DE RETIRADA CONSIDERANDO O PIOR BIÊNIO HIDROLÓGICO E UMA RESERVA ESTRATÉGICA DE 5%

4.3 Concepção do Modelo de Operação

Conforme acordado na reunião realizada nas dependências da ANA, em 13 de julho de 2004, na qual participaram representantes da Agência Nacional de Águas-ANA e do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo-DAEE/SP (ver ata apresentada no Anexo I), as condições de operação dos reservatórios devem considerar os seguintes critérios:

- A avaliação da disponibilidade hídrica para atendimento das demandas da RMSP e da bacia do rio Piracicaba será feita com base em Curvas de Aversão ao Risco, utilizando o armazenamento dos reservatórios do Sistema Equivalente, tendo como meta um volume mínimo, uma reserva estratégica, ao final do cenário hidrológico adotado, que é o pior biênio do histórico, 1953 a 1954.

- devem ser definidas demandas prioritárias e secundárias quanto à prioridade de atendimento das demandas da RMSP e da bacia do rio Piracicaba. As demandas da RMSP deverão ser atendidas pelas aduções através do túnel 5, enquanto a bacia do rio Piracicaba será suprida pelas vazões defluentes dos reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha. A distribuição da disponibilidade hídrica para atendimento das demandas utilizará regras de proporcionalidades e prioridades;
- existirá flexibilidade para a distribuição sazonal das vazões respeitados os totais médios intra- anuais outorgados. No entanto, as vazões efluentes instantâneas dos reservatórios não poderão ser inferiores às mínimas a serem estabelecidas no ato de outorga;
- a diferença entre as perdas devido à evaporação do reservatório e os ganhos de vazão devido à chuva direta sobre o reservatório (evaporação líquida) foi considerada nula;
- volumes de espera: não foram consideradas restrições nas acumulações máximas para proteção contra enchentes das comunidades de jusante.

A Tabela 6 apresenta as alternativas estudadas de demandas para a RMSP pelo túnel 5 e para a bacia do rio Piracicaba.

TABELA 6 – DEMANDAS PARA A RMSP E PARA BACIA DO RIO PIRACICABA NO SISTEMA CANTAREIRA

Demanda Total (m ³ /s)	Demanda RMSP/SABESP			Demanda Piracicaba		
	Demanda Total (m ³ /s)	Demanda Prioritária (m ³ /s)	Demanda Secundária (m ³ /s)	Demanda Total (m ³ /s)	Demanda Prioritária (m ³ /s)	Demanda Secundária (m ³ /s)
34,0	30,0	24,8	5,2	4,0	2,0	2,0
35,0	30,0	24,8	5,2	5,0	2,0	3,0
35,0	31,0	24,8	6,2	4,0	2,0	2,0
36,0	30,0	24,8	5,2	6,0	2,0	4,0
36,0	31,0	24,8	6,2	5,0	2,0	3,0
37,0	30,0	24,8	5,2	7,0	2,0	5,0
37,0	31,0	24,8	6,2	6,0	2,0	4,0

observação: A demanda RMSP/SABESP corresponde apenas ao conjunto formado pelos reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha

No caso da disponibilidade hídrica do Sistema Equivalente dada pela CAR não for suficiente para atender as demandas, o rateio, o rateio dentro da cada será proporcional a participação de cada um no total referente à mesma prioridade.

Para deixar claro o critério de partição são apresentados na Tabela 7 um exemplo de demanda e alguns exemplos de rateio da disponibilidade hídrica.

TABELA 7 – EXEMPLOS DE RATEIO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA

Região	Demanda prioritária (m ³ /s)	Demanda secundária (m ³ /s)	Demanda total (m ³ /s)
RMSP	24,8	6,2	31,0
Rio Piracicaba	2,0	3,0	5,0
Total	26,8	9,2	36,0

Exemplos	Disponibilidade hídrica dada pela CAR (m ³ /s)	Vazão de transferência para a RMSP (m ³ /s)	Vazões defluentes para a bacia do rio Piracicaba (m ³ /s)
1	29,0	26,3	2,7
2	33,0	29,0	4,0
3	38,0	31,0	5,0

4.4 Modelagem Matemática e Computacional do Modelo de Operação

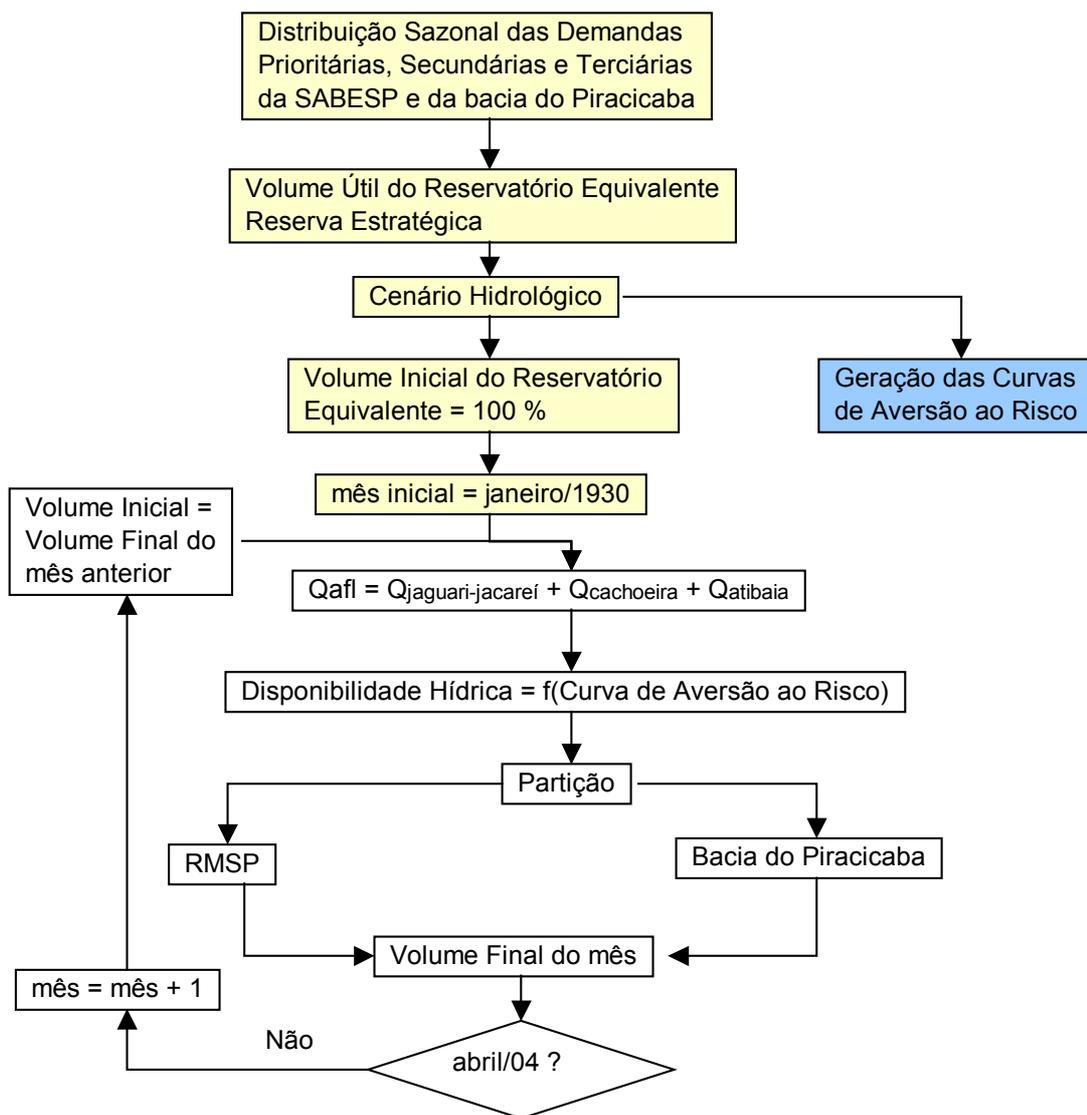
Para a análise das regras de operação foi desenvolvido um modelo matemático-computacional para simulação do Sistema Cantareira considerando diversos cenários hidrológicos, reservas estratégicas e demandas para a bacia do rio Piracicaba e para a RMSP. O modelo foi concebido para simulação do Sistema Cantareira para o período de janeiro de 1930 a dezembro de 2003, correspondendo ao histórico de vazões.

A Figura 11 apresenta uma síntese das principais etapas de cálculo do modelo desenvolvido para simulação. Em amarelo estão as etapas correspondentes a entrada de dados, incluindo a definição das demandas prioritária e secundária para cada mês do ano, o volume útil, a reserva estratégica, o volume inicial para fins de simulação e o cenário hidrológico a ser considerado.

Em azul está indicado o modelo de obtenção das curvas de aversão ao risco, desenvolvido pelo Prof. Dr. Rubem La Laina Porto. As curvas de aversão ao risco são geradas automaticamente a partir do volume útil Sistema Equivalente, da reserva estratégica e do cenário hidrológico adotado.

Em fundo branco está indicado o modelo de processamento do balanço hídrico e de partição da disponibilidade hídrica. Para um mês qualquer, determina-se a vazão afluyente do reservatório equivalente, a partir da soma das vazões naturais médias mensais dos reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha para o respectivo mês. Com base no armazenamento do reservatório e nas curvas de aversão ao risco (CAR), determina-se a disponibilidade hídrica para o mês. A disponibilidade hídrica mensal é subdividida para atendimento das demandas da RMSP e da bacia do rio Piracicaba. O processamento mensal termina através do balanço hídrico do reservatório, quando é determinado o volume no final do mês. O volume no início do mês subsequente é considerado igual ao volume no final do mês anterior.

FIGURA 12–FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO MODELO DE SIMULAÇÃO DAS REGRAS OPERACIONAIS



5. Simulações da Operação do Sistema Equivalente considerando a CAR e as prioridades de atendimento

5.1 Alternativa Operacional Selecionada

Na reunião realizada na ANA, em 13 de julho, procurou-se identificar, para cada alternativa de demanda total, os parâmetros operacionais que permitissem a operação segura do Sistema Cantareira, resultando em atendimento adequado das demandas, com base nos estudos desenvolvidos pela ANA e pelo DAEE.

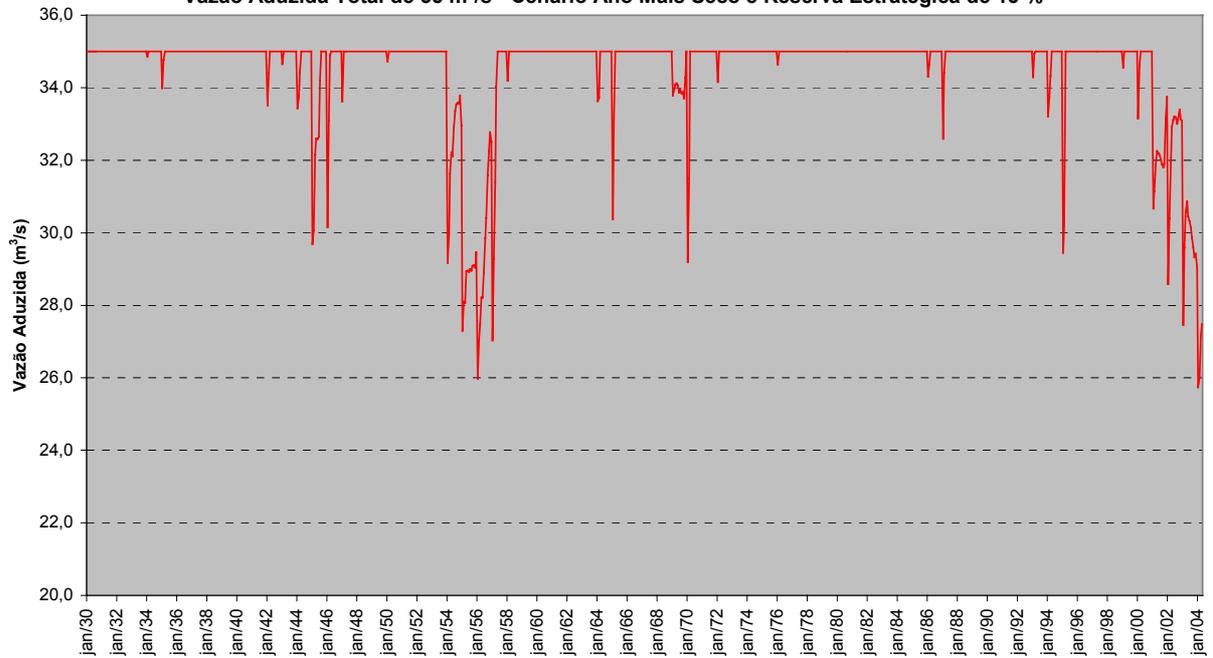
Na Tabela 6 são apresentadas as diversas alternativas de demandas (totais, RMSF e bacia do rio Piracicaba) a serem supridas pelo Sistema Equivalente. Essas alternativas compreendem demandas totais variando entre 34 e 37 m³/s.

Com base nestas demandas totais, foram feitas simulações com passo mensal para o período de Janeiro de 1930 a Abril de 2004, correspondendo ao histórico de vazões naturais médias mensais.

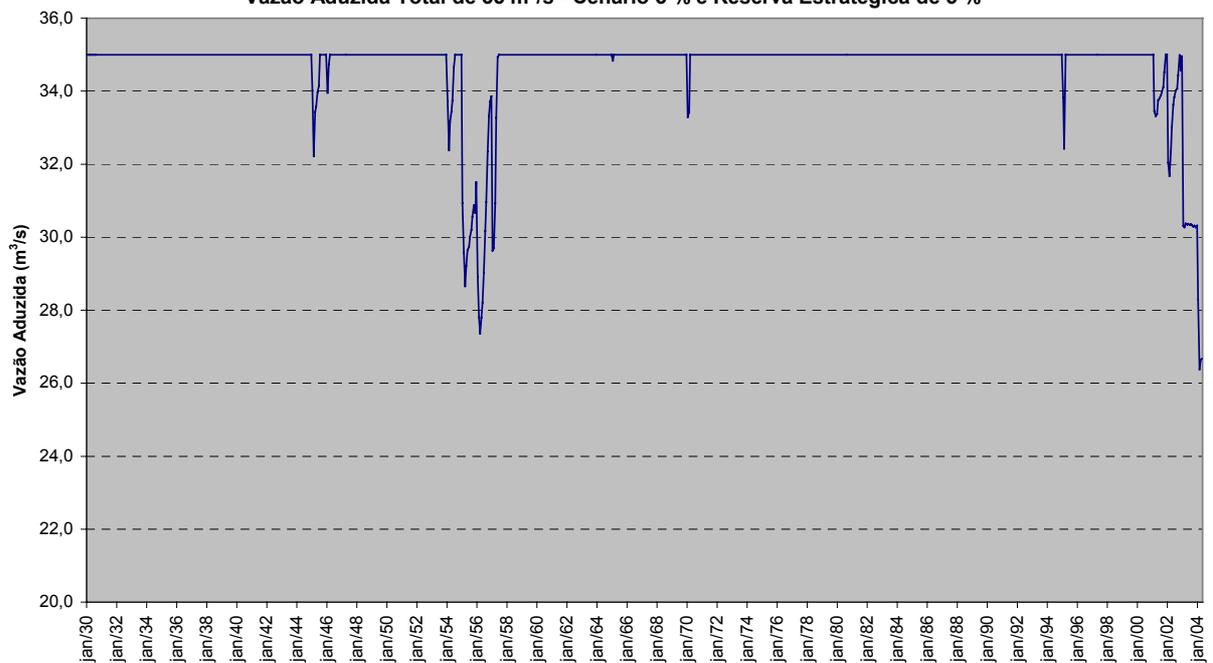
A análise dos resultados permite concluir que a utilização das curvas de aversão ao risco diminui a garantia de suprimento da demanda total, mas evita o colapso de abastecimento mantendo vazões mínimas superiores. As garantias aumentam com o risco hidrológico e com a redução das reservas estratégicas. Porém, no mesmo sentido, observa-se um valor máximo para as vazões mínimas aduzidas e, em seguida, a diminuição progressiva dos valores podendo atingir uma situação de colapso de abastecimento.

Para melhor ilustrar as diferenças de desempenho do Sistema Cantareira em função dos parâmetros operacionais, apresentam-se nas Figuras 12 e 13 os hidrogramas das vazões totais aduzidas para duas alternativas resultado da operação para uma demanda total de 35 m³/s. A primeira, mais conservadora, adota um cenário hidrológico crítico correspondente ao ano mais seco e uma reserva estratégica de 15 % do volume útil. A segunda, mais ousada, utiliza um cenário hidrológico com 5 % de risco e uma reserva estratégica de 5 % do volume útil. A primeira alternativa operacional resulta em freqüentes racionamentos das vazões aduzidas e, portanto, baixa garantia com vazão mínima pouco abaixo de 26,0 m³/s. Na segunda alternativa operacional, a freqüência de períodos de racionamento diminui e a vazão mínima é superior a 26,0 m³/s. Portanto, cabe identificar o conjunto de parâmetros operacionais que permite o desempenho adequado do Sistema Cantareira.

**Figura 12 - Hidrograma das Vazões Aduzidas na Operação com Curva de Aversão ao Risco
Vazão Aduzida Total de 35 m³/s - Cenário Ano Mais Seco e Reserva Estratégica de 15 %**



**Figura 13 - Hidrograma das Vazões Aduzidas na Operação com Curva de Aversão ao Risco
Vazão Aduzida Total de 35 m³/s - Cenário 5 % e Reserva Estratégica de 5 %**



Considerando os resultados das simulações e a importância do Sistema Cantareira no abastecimento da RMSP e da bacia do rio Piracicaba, na reunião do dia 13 de julho foram definidos os seguintes critérios a serem adotados na definição das condições de operação dos reservatórios:

- vazão de retirada máxima: 36 m³/s;
- demanda prioritária para a RMSP: 24,8 m³/s;
- demanda secundária para a RMSP: 6,2 m³/s;
- demanda prioritária para a bacia do rio Piracicaba: 2,0 m³/s;
- demanda secundária para a bacia do rio Piracicaba: 3,0 m³/s;
- rateio da disponibilidade hídrica proporcional à participação de cada um no total referente à mesma prioridade, quando a mesma não for suficiente para atender a demanda total;
- CAR com o cenário hidrológico seco (biênio de 1953 a 1954);
- reserva estratégica de 5 % no final do biênio.

A CAR apresentada na figura 11 foi obtida considerando o cenário hidrológico seco (biênio de 1953 a 1954) e uma reserva estratégica no final do biênio de 5 %. No anexo C –II são apresentados os limites de vazão de retirada em função do armazenamento do sistema equivalente, através de uma tabela e de curvas mensais.

5.2 Resultados da Simulação da Alternativa Selecionada

As Figuras 14 e 15 apresentam os hidrogramas das vazões de transferência para a RMSP e das vazões defluentes para a bacia do rio Piracicaba, obtidos com as simulações do período histórico, considerando os limites de vazão de retirada apresentados no Anexo C-II.

Figura 14 - Hidrograma das Vazões Aduzidas pelo Sistema Cantareira através do Túnel 5 na Operação com Curva de Aversão ao Risco

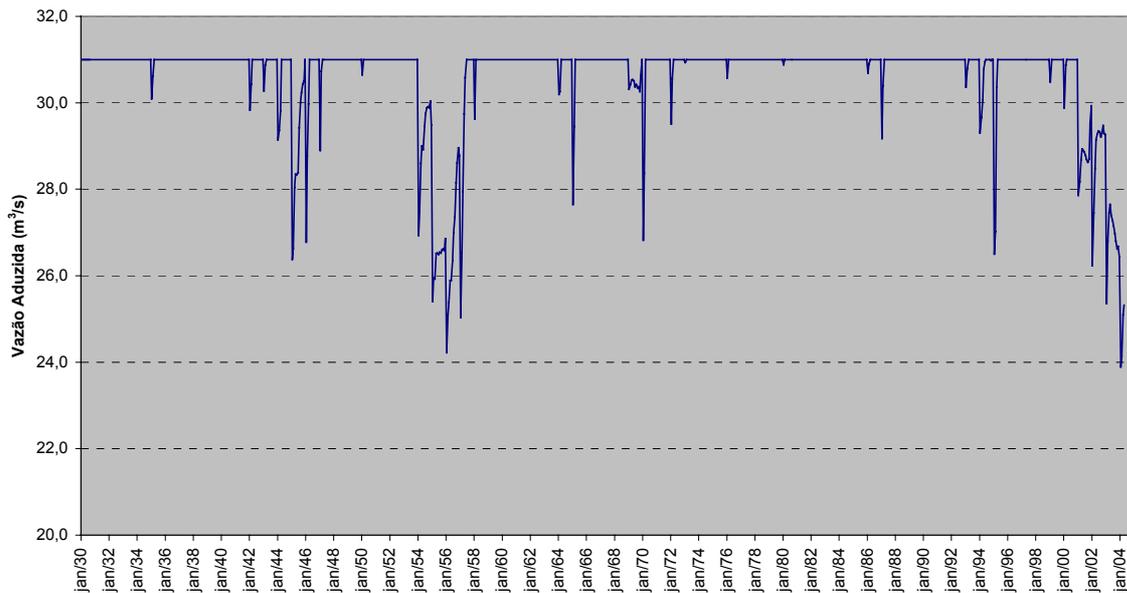
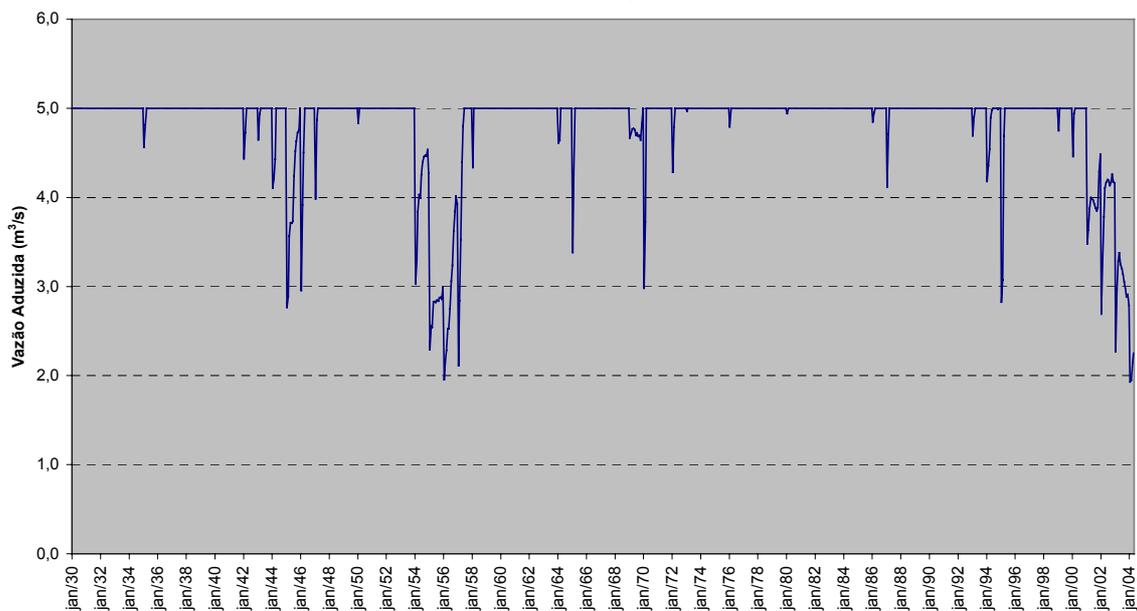


Figura 15 - Hidrograma das Vazões Aduzidas pelo Sistema Cantareira para a bacia do Rio Piracicaba sem considerar os vertimentos na Operação com Curva de Aversão ao Risco



A Tabela 8 apresenta um resumo estatístico dos resultados da simulação para a alternativa selecionada, considerando o período histórico de 1930 a 2004.

TABELA 8 – SÍNTESE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DA ALTERNATIVA SELECIONADA

Estatística	Alternativa Selecionada		
	Vazão para o Alto Tietê - RMSP (m ³ /s)	Vazão para o PIRACICABA - sem vertimento (m ³ /s)	Vazão Vertida para a Bacia do Rio Piracicaba (m ³ /s)
média (m ³ /s)	30,6	4,8	5,1
máximo (m ³ /s)	31,0	5,0	129,7
mínimo (m ³ /s)	23,9	1,9	0,0
desvio-padrão (m ³ /s)	1,2	0,6	14,7
coef. de variação (%)	4%	11%	289%
garantia (%)	83%	83%	19%
Permanência (%)	Vazões (m ³ /s)		
0	31,0	5,0	129,7
1	31,0	5,0	68,1
2	31,0	5,0	56,4
3	31,0	5,0	48,2
5	31,0	5,0	39,8
10	31,0	5,0	18,8
15	31,0	5,0	6,9
20	31,0	5,0	0,0
25	31,0	5,0	0,0
30	31,0	5,0	0,0
35	31,0	5,0	0,0
40	31,0	5,0	0,0
45	31,0	5,0	0,0
50	31,0	5,0	0,0
55	31,0	5,0	0,0
60	31,0	5,0	0,0
65	31,0	5,0	0,0
70	31,0	5,0	0,0
75	31,0	5,0	0,0
80	31,0	5,0	0,0
85	30,6	4,8	0,0
90	29,5	4,3	0,0
92	28,9	4,0	0,0
95	27,5	3,3	0,0
97	26,6	2,9	0,0
98	26,5	2,8	0,0
99	25,4	2,3	0,0
100	23,9	1,9	0,0

6. Conclusões e Recomendações

Conforme se pode observar na Tabela 8, em 80 % do tempo, a vazão de retirada é de 36 m³/s. Em 98 % do tempo a vazão de retirada é superior aos limites estabelecidos como prioritários, que correspondem

Dessa forma pode se concluir que são adequados os critérios adotados para o estabelecimento das condições de operação apresentados abaixo:

- vazão de retirada máxima: 36 m³/s;
- demanda prioritária para a RMSP: 24,8 m³/s;
- demanda secundária para a RMSP: 6,2 m³/s;
- demanda prioritária para a bacia do rio Piracicaba: 2,0 m³/s;
- demanda secundária para a bacia do rio Piracicaba: 3,0 m³/s;
- rateio da disponibilidade hídrica proporcional à participação de cada um no total referente à mesma prioridade, quando a mesma não for suficiente para atender a demanda total;
- CAR com o cenário hidrológico seco (biênio de 1953 a 1954);
- reserva estratégica de 5 % ao final do biênio.

Em função dos estudos realizados, recomenda-se:

- iniciar a operação utilizando a metodologia de curvas de aversão a risco. Deve ser considerada a possibilidade da mesma ser alterada, desde que fique caracterizada uma melhora no desempenho;
- permitir, dentro de cada ano, a distribuição sazonal das vazões;
- estabelecer um grupo de operação do sistema (GOS) formado, no mínimo, pela ANA, DAEE-SP, Comitê do PCJ, Comitê do Alto Tietê e SABESP;
- realizar mensalmente reuniões para a definição das condições operacionais para o mês subsequente) sob a coordenação do GOS;
- prever a possibilidade de alternativas tecnológicas para as regras operativas, que permita considerar avanços tecnológicos que considerem previsões de aflúncias ou outras, desde que aprovadas pelo GOS;
- solicitar à SABESP a memória de cálculo dos dados fornecidos, incluindo as curvas cota x área x volume, cotas e dimensões das estruturas hidráulicas, curvas de descarga e volumes;
- requerer da SABESP a implantação de monitoramento com telemetria de NA, chuva e vazões, bem como instalação de postos fluviométricos e medições sistemáticas de descargas líquidas e sólidas;
- requerer da SABESP a revisão das curvas cota x volume dos reservatórios que compõem o Sistema Cantareira;

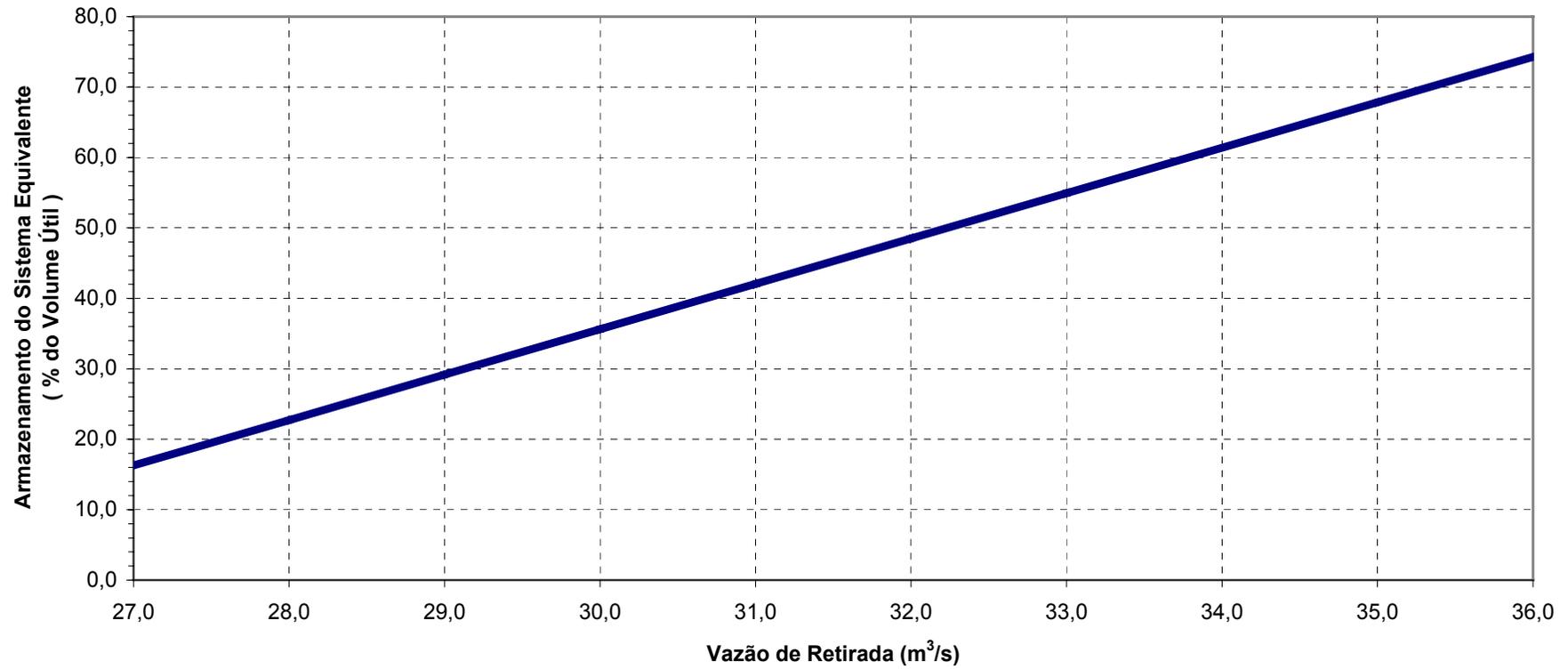
- implantar os procedimentos necessários para garantir a informação pública (transparência) da operação do Sistema Cantareira, com publicação do monitoramento, incluindo chuva, NA, volumes, vazões nos postos fluviométricos, vazões transferidas entre os túneis, vazões afluentes e defluentes, entre outros.

ANEXO C-I – MEMÓRIA DA REUNIÃO REALIZADA NA ANA EM 13 DE JULHO

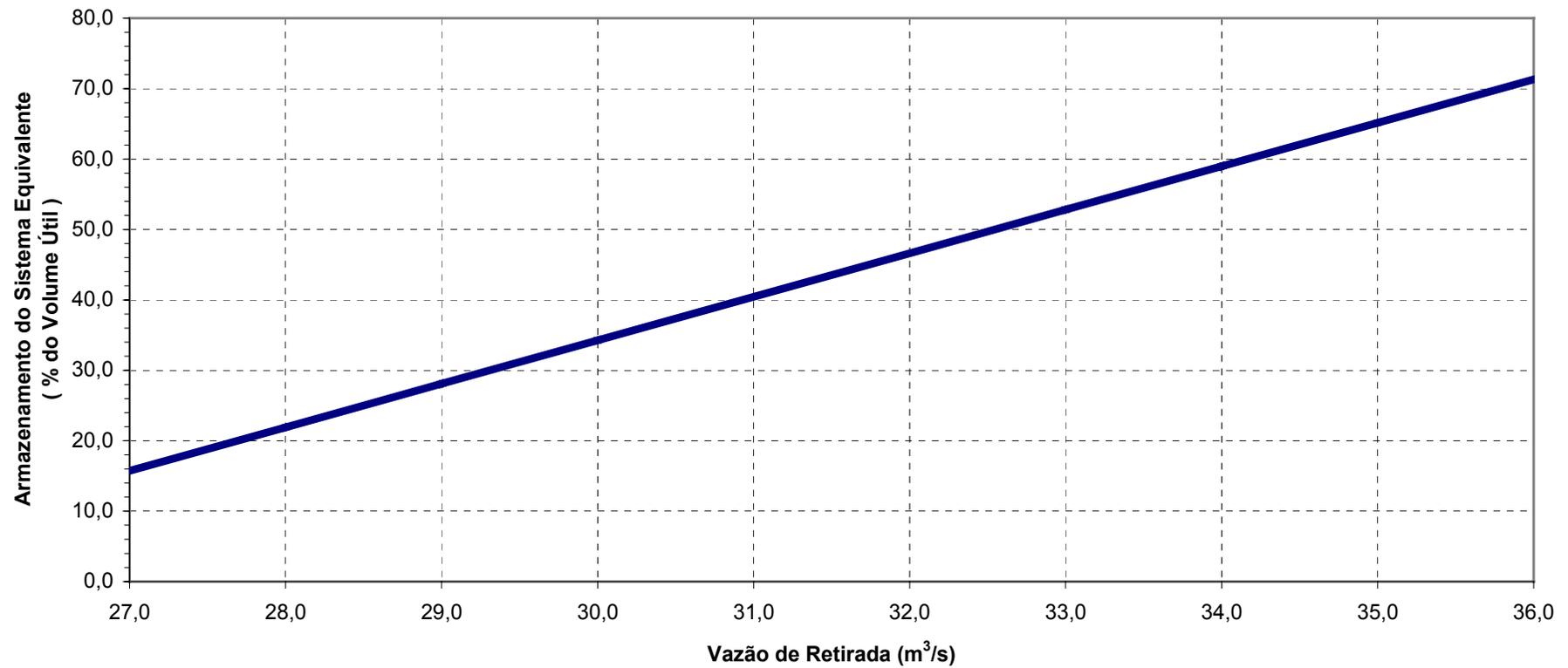
**ANEXO C-2 – LIMITES DE VAZÃO DE RETIRADA EM FUNÇÃO DO ARMAZENAMENTO DO SISTEM
EQUIVALENTE**

Limite da Vazão de Retirada (m³/s)	Armazenamento do Sistema Equivalente (% do Volume Útil)											
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
27,0	16,3	15,7	15,8	15,8	16,6	15,3	12,9	9,9	6,6	3,0	0,0	0,0
28,0	22,7	21,9	21,7	21,5	22,0	20,4	17,7	14,5	10,9	7,1	3,8	2,5
29,0	29,2	28,1	27,6	27,1	27,4	25,5	22,6	19,1	15,2	11,1	7,5	6,0
30,0	35,6	34,3	33,5	32,7	32,8	30,6	27,4	23,6	19,4	15,1	11,3	9,5
31,0	42,1	40,4	39,4	38,4	38,1	35,7	32,2	28,2	23,7	19,1	15,0	13,0
32,0	48,5	46,6	45,3	44,0	43,5	40,8	37,1	32,8	28,0	23,2	18,8	16,5
33,0	55,0	52,8	51,2	49,7	48,9	45,9	41,9	37,3	32,3	27,2	22,6	20,0
34,0	61,4	59,0	57,1	55,3	54,2	51,0	46,7	41,9	36,6	31,2	26,3	23,5
35,0	67,8	65,2	63,0	60,9	59,6	56,1	51,6	46,4	40,9	35,3	30,1	27,0
36,0	74,3	71,3	68,9	66,6	65,0	61,2	56,4	51,0	45,2	39,3	33,8	30,5

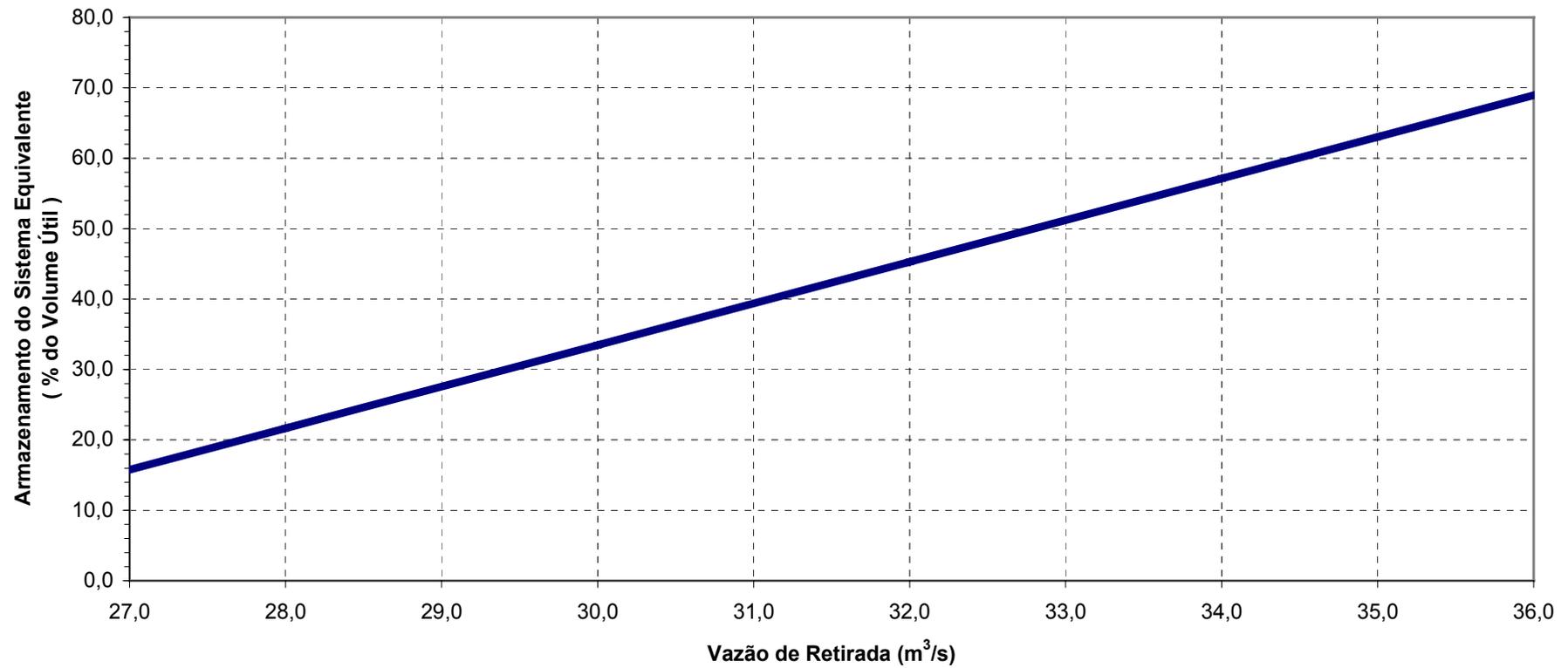
Limite de Vazões de Retirada em função do Armazenamento do Sistema Equivalente
Mês de Janeiro



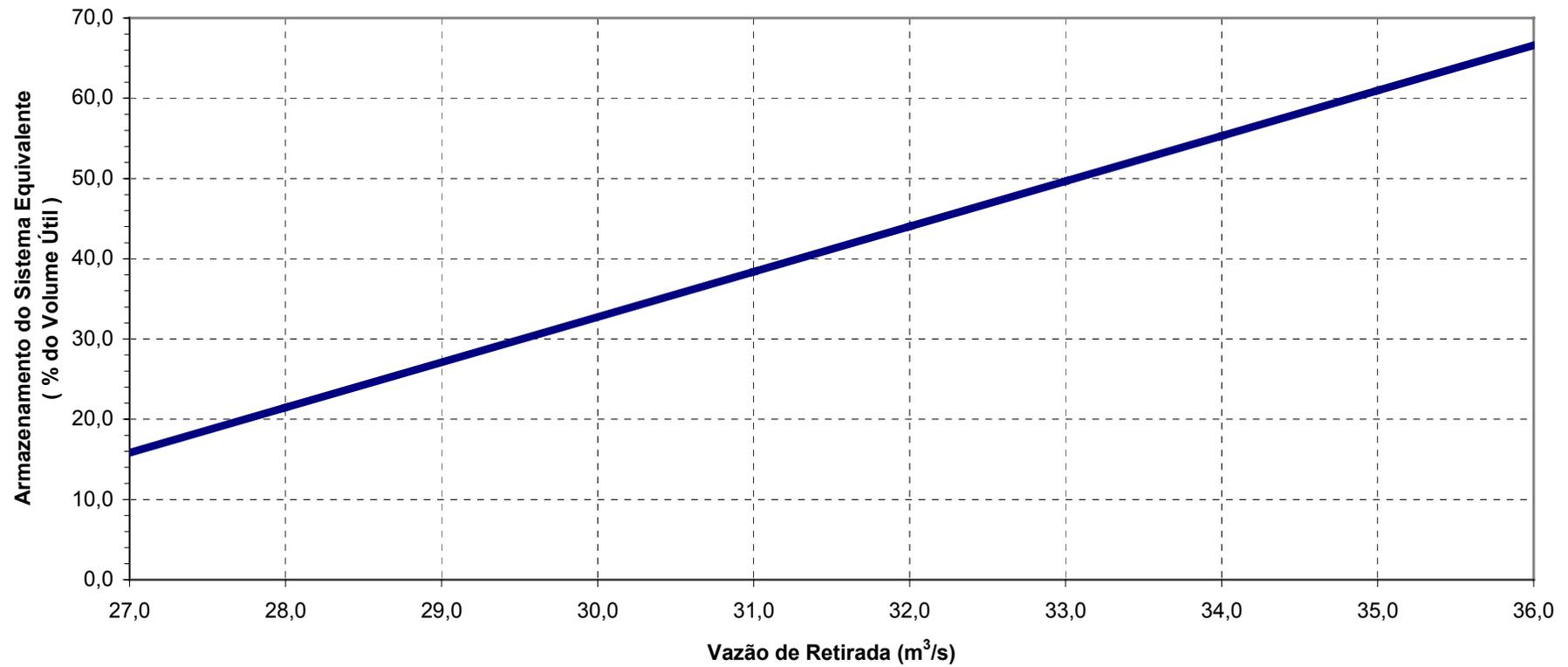
Limite de Vazões de Retirada em função do Armazenamento do Sistema Equivalente
Mês de Fevereiro



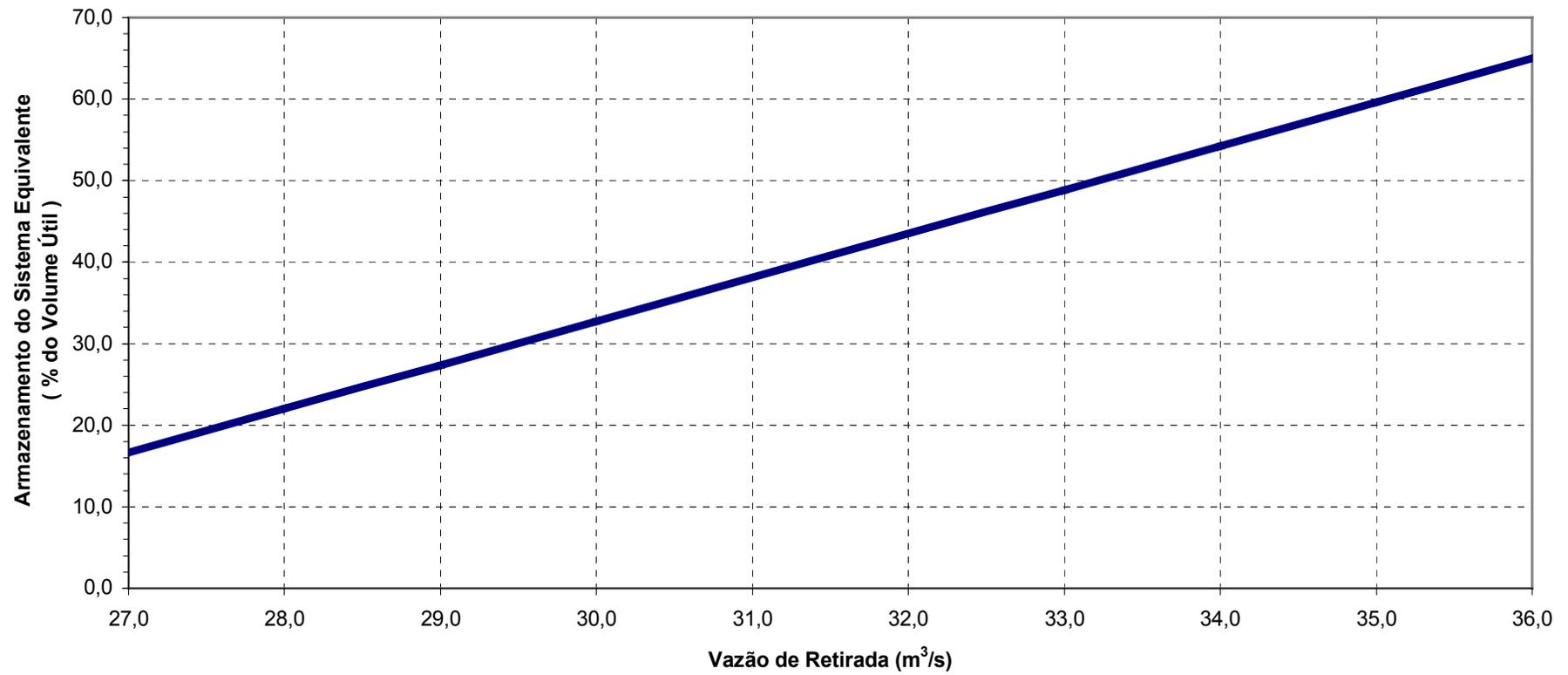
**Limite de Vazões de Retirada em função do Armazenamento do Sistema Equivalente
Mês de Março**



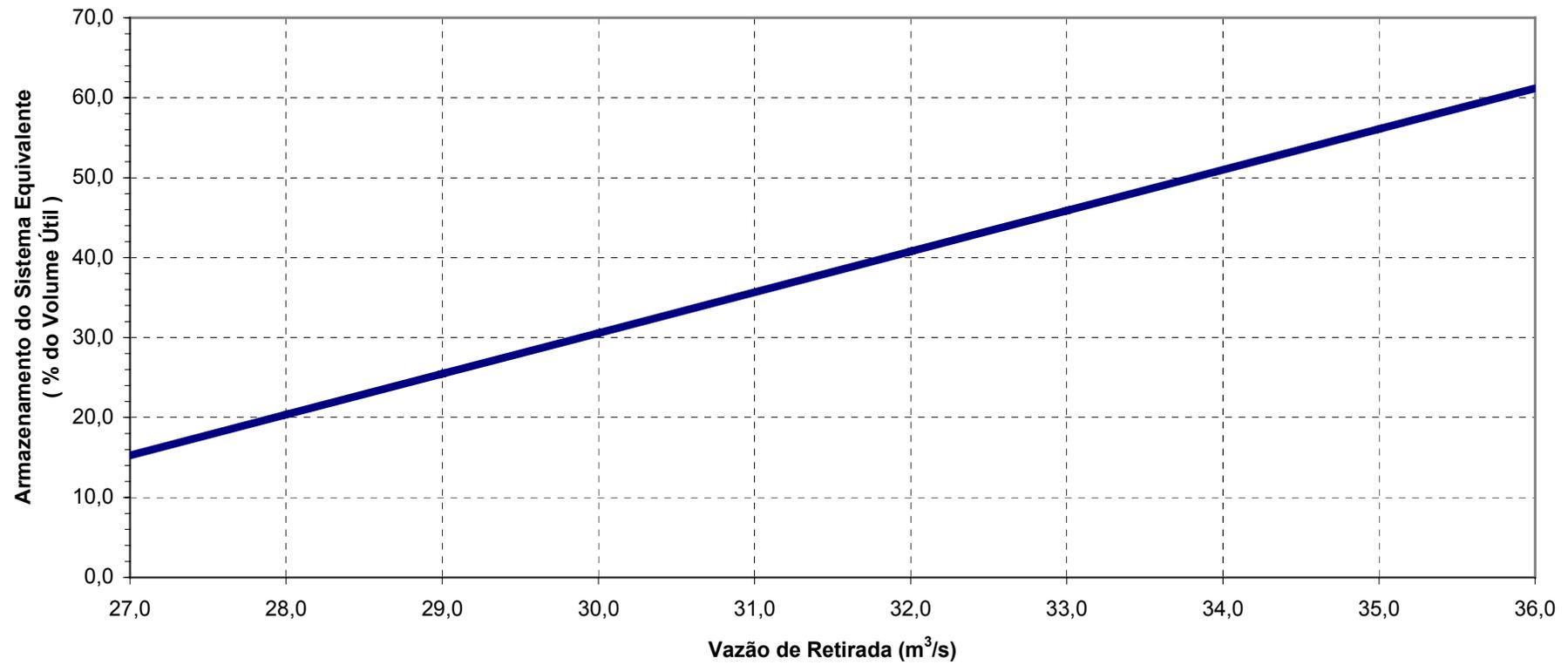
**Limite de Vazões de Retirada em função do Armazenamento do Sistema Equivalente
Mês de Abril**



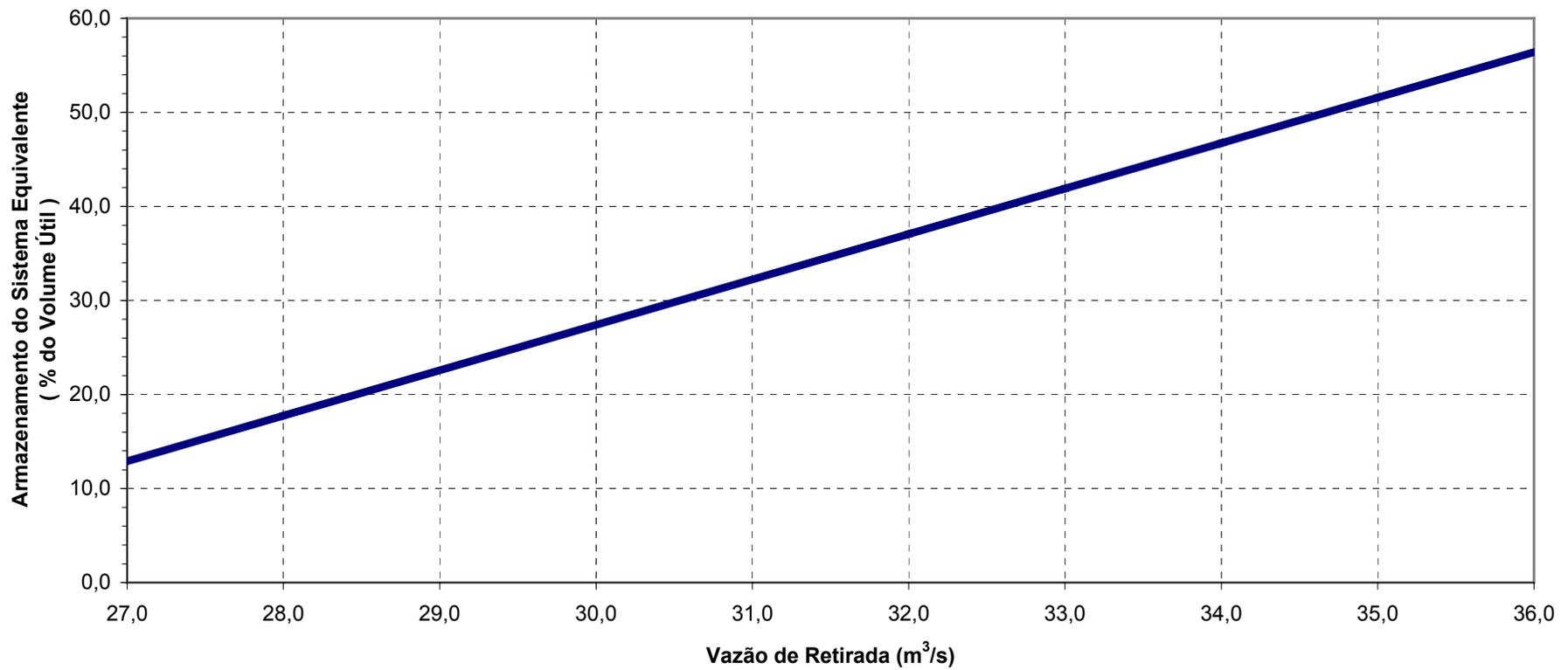
Limite de Vazões de Retirada em função do Armazenamento do Sistema Equivalente
Mês de Maio



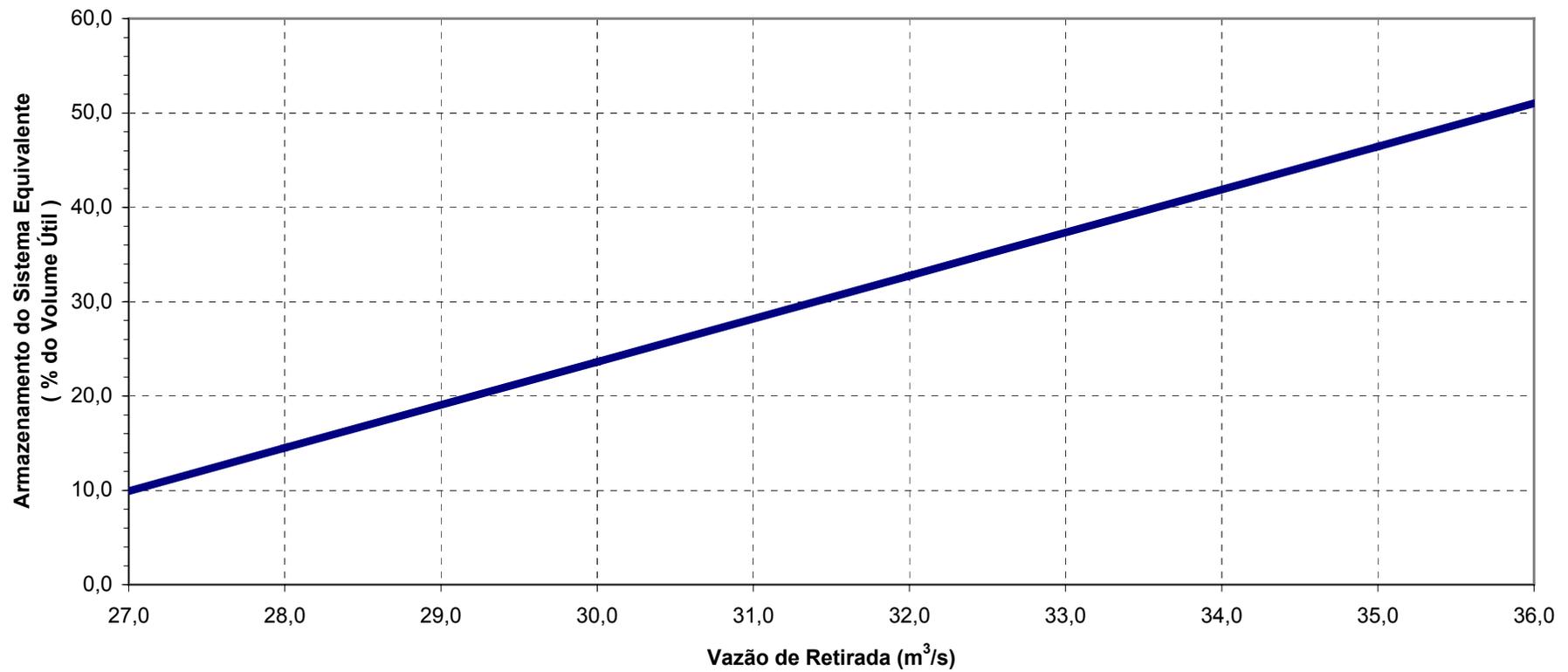
**Limite de Vazões de Retirada em função do Armazenamento do Sistema Equivalente
Mês de Junho**



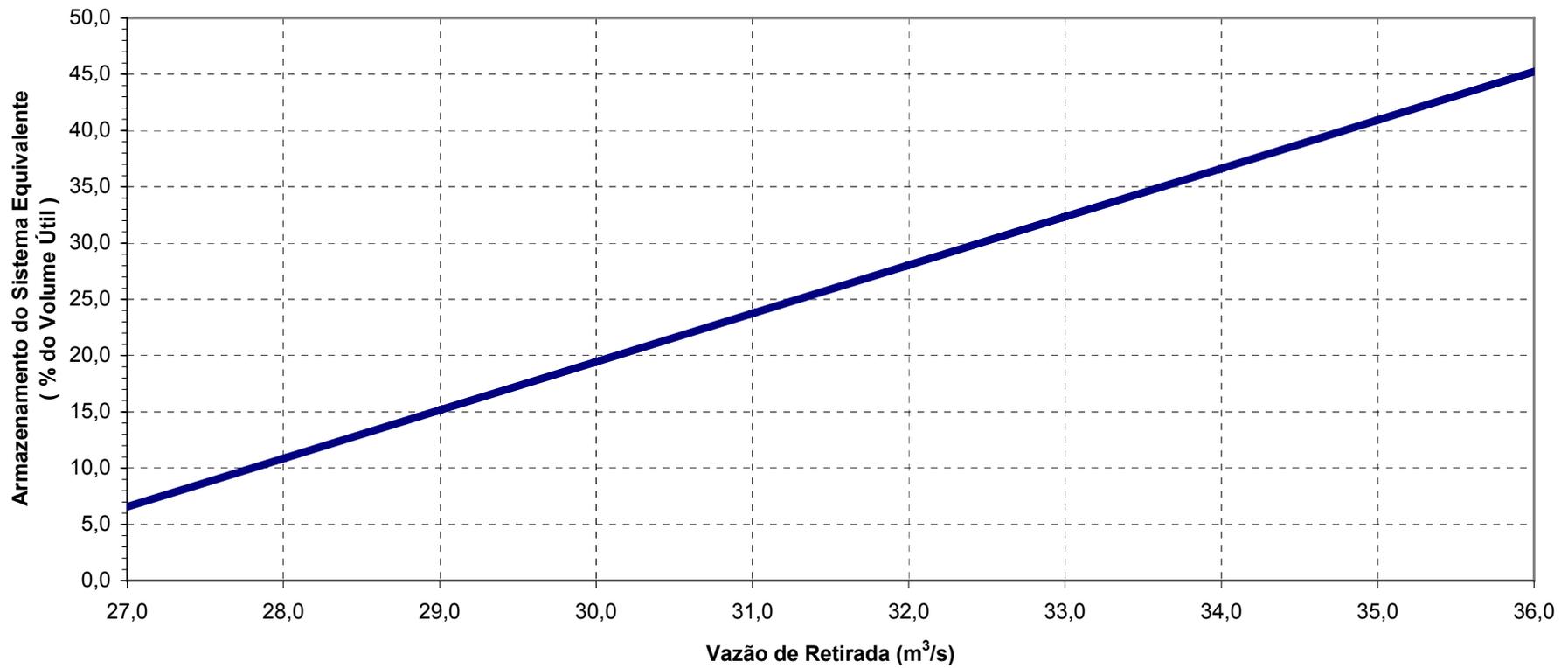
**Limite de Vazões de Retirada em função do Armazenamento do Sistema Equivalente
Mês de Julho**



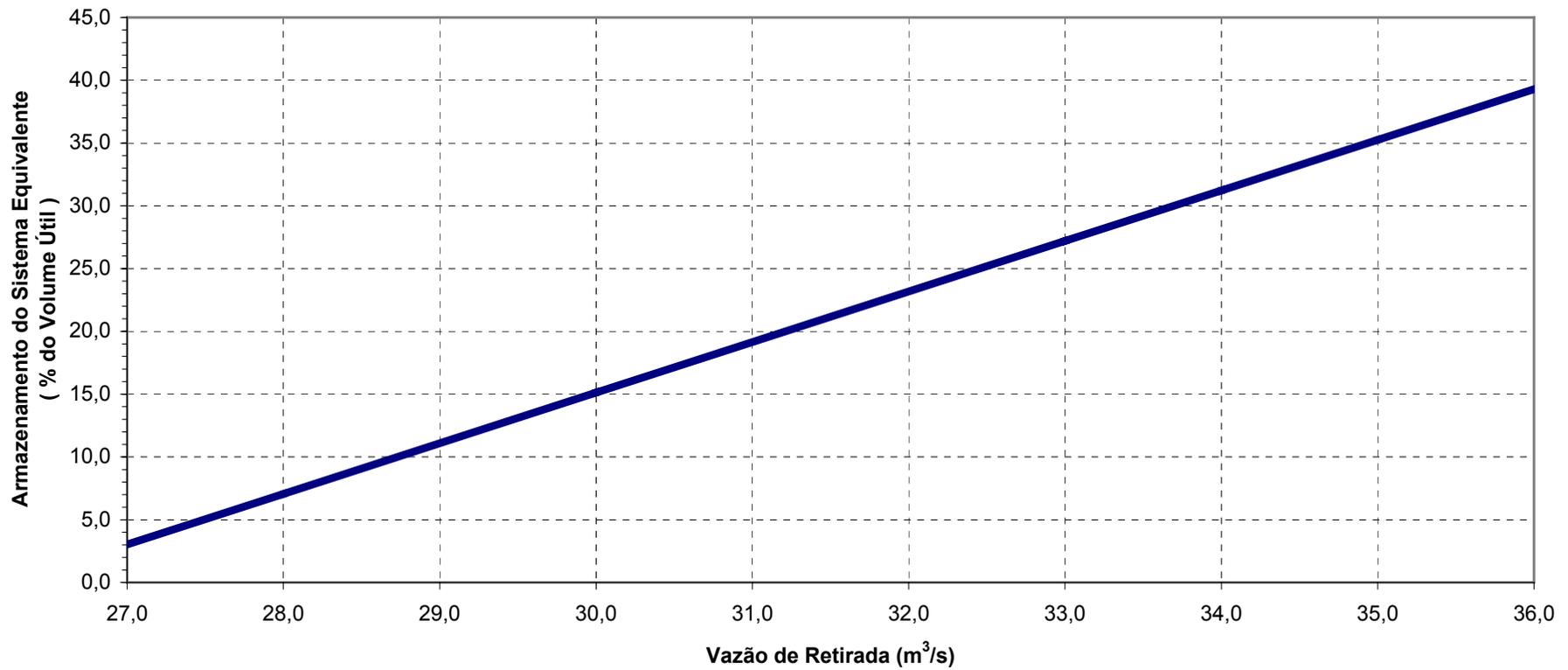
**Limite de Vazões de Retirada em função do Armazenamento do Sistema Equivalente
Mês de Agosto**



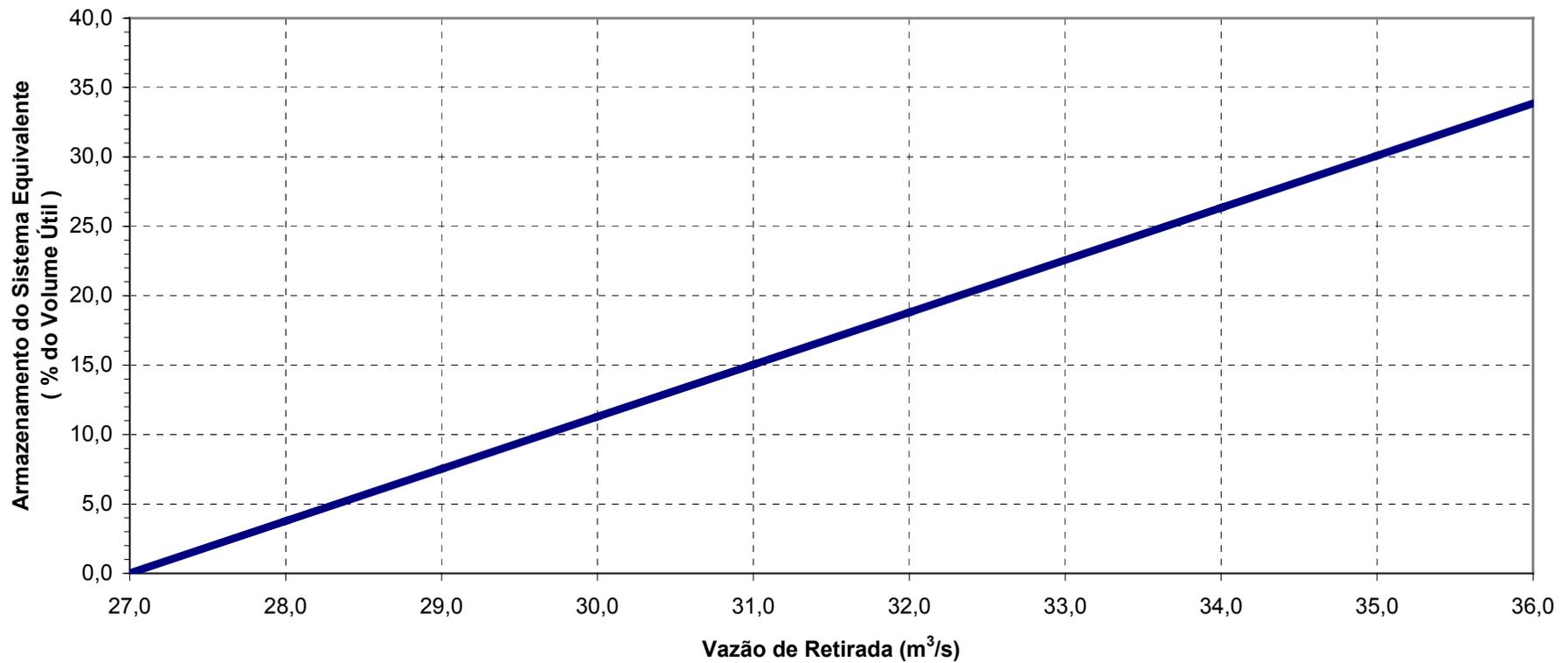
Limite de Vazões de Retirada em função do Armazenamento do Sistema Equivalente
Mês de Setembro



**Limite de Vazões de Retirada em função do Armazenamento do Sistema Equivalente
Mês de Outubro**



Limite de Vazões de Retirada em função do Armazenamento do Sistema Equivalente
Mês de Novembro



Limite de Vazões de Retirada em função do Armazenamento do Sistema Equivalente
Mês de Dezembro

