

Paulo Roberto Costa

PROCESSOS HIDROLÓGICOS APLICADOS AO CONTROLE
HIDRÁULICO-OPERACIONAL DE RESERVATÓRIOS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA:
O CASO DA BARRAGEM DO RIO SÃO BENTO - SC

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade do Extremo Sul Catarinense para obtenção do Título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Ecologia e Gestão de Ambientes Naturais e Construídos

Orientador:
Prof. Dr. Álvaro José Back

Criciúma, SC
2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



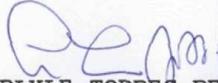
UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
Pró-Reitoria de Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão
Unidade Acadêmica de Humanidades, Ciências e Educação
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (Mestrado)

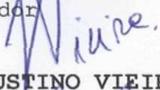
PARECER

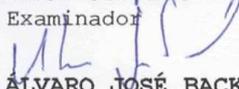
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado de Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (Mestrado) reuniram-se para realizar a arguição da Dissertação de MESTRADO apresentada pelo candidato PAULO ROBERTO COSTA, sob o título: "**Processos hidrológicos aplicados ao controle hidráulico-operacional de reservatórios de acumulação de água: o caso da barragem do Rio São Bento**", para obtenção do grau de **MESTRE EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS** do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC.

Após haver analisado o referido trabalho e argüido o candidato, os membros são de parecer pela **APROVAÇÃO** da Dissertação.

Criciúma, SC, 21 de agosto de 2008.


Professor Dr. **CARLYLE TORRES BEZERRA DE MENEZES**
Primeiro Examinador


Professor Dr. **HAMILTON JUSTINO VIEIRA**
Segundo Examinador


Professor Dr. **ÁLVARO JOSÉ BACK**
Presidente da Banca e Orientador

Dedico esta obra:

Ao meu pai, pelo incentivo e direcionamento para o desenvolvimento de meus estudos.

À minha esposa pelo companheirismo e apoio.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Álvaro José Back, pelo incentivo e orientação firme em todo prosseguimento da pesquisa, onde me oportunizou o compartilhamento de seu conhecimento.

À Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), em nome do Diretor-Presidente Walmor Paulo de Luca, o Superintendente de Negócios Sul/Serra Wilmar Tadeu Bonetti, e o Gerente Regional de Criciúma o Sr. Alessandro Rodrigo José Rabello, que apoiaram em muito para a realização desta pesquisa, e por ter a Barragem do Rio São Bento como a unidade de estudo desta pesquisa.

À equipe operacional da Barragem do Rio São Bento, que no convívio diário da operação daquela unidade, estiveram sempre juntos nas discussões e no prosseguimento deste trabalho.

À minha família pela compreensão de minhas ausências dedicadas ao desenvolvimento desta pesquisa.

*“Uma mente jamais volta ao seu tamanho original
após adquirir um novo conhecimento”.*

Albert Einstein

RESUMO

O conhecimento referente à integração entre os processos hidrológicos e hidráulicos no contexto operacional de reservatórios de acumulação de água, contribui significativamente para a eficácia operacional destes reservatórios. Neste contexto, o presente trabalho procura descrever a atuação e o comportamento destas variáveis na Barragem do rio São Bento, no município de Siderópolis, no sul do estado de Santa Catarina, empreendimento que destaca-se como o grande centro de abastecimento hídrico daquela região. As análises dos registros operacionais daquele empreendimento, bem como, da série de dados hidrometeorológicos da bacia hidrográfica do rio São Bento, permitiu a produção de resultados e conclusões, aspectos estes que fazem do presente trabalho, um instrumento de apoio operacional da Barragem do rio São Bento. Verificou-se que o suprimento de água das demandas para o abastecimento público e irrigação relaciona-se diretamente ao regime pluviométrico atuante na bacia hidrográfica do rio São Bento, regime que apresenta níveis de eficácia com relação às demandas atualmente requeridas. As maiores demandas de água do reservatório destinam-se à irrigação. As demandas de água para o arroz apontam um acréscimo significativo se comparadas às demandas de projeto, resultado do aumento das áreas cultivadas com arroz. Da mesma forma, as vazões atualmente aduzidas para o abastecimento público apresentam valores superiores às demandas estabelecidas em projeto. Os atuais excessos hídricos observados não podem incentivar o aumento indiscriminado de área de plantio de arroz, pois com o aumento da demanda de consumo doméstico e a ampliação dos sistemas de abastecimento previstos, implicarão na restrição do fornecimento de água para a irrigação. Há indicação de que a precipitação na bacia do rio São Bento é maior que a observada na estação meteorológica de Urussanga. Esta constatação permite inferir que as vazões reais sejam superiores às vazões estimadas no projeto básico, indicando que a capacidade de atendimento seja maior que a prevista. Recomenda-se a realização de um estudo mais acurado sobre os parâmetros físicos e morfométricos da bacia hidrográfica do rio São Bento, bem como um estudo das condições de transporte dos sedimentos e assoreamento da respectiva bacia. Recomenda-se a ampliação da rede telemétrica de dados hidrometeorológicos, incluindo-se a instalação de mais pluviógrafos e sensores de nível nos rios Morto, da Serra e da Mina. Recomenda-se rever o modelo operacional da barragem do rio São Bento com a inclusão dos dados de evaporação no balanço hídrico do reservatório. Diante da dificuldade encontrada na definição das curvas-chaves dos rios São Bento montante e Serrinha, decorrente da variabilidade das suas seções, recomenda-se a construção de barragens de níveis em seções localizadas à montante do reservatório a fim de possibilitar um monitoramento mais efetivo quanto às vazões dos respectivos rios. A partir de alguns estudos de correlações elaborados nesta pesquisa, os resultados apontam uma forte relação entre os efeitos provocados pelos processos hidrológicos no comportamento hidráulico da barragem do rio São Bento. É necessário que os estudos realizados neste trabalho sejam mantidos e atualizados para o uso posterior no processo operacional da barragem do rio São Bento.

Palavras-chave: Operação de reservatórios. Hidrologia. Dimensionamento de reservatórios

ABSTRACT

Knowledge that integrates hydrological and hydraulic processes in the operational context of water reservoirs contributes considerably for their operational efficiency. In this context the present research describes the performance and behavior of these variables in São Bento River Dam in the county of Siderópolis, in the south of Santa Catarina State, in Brazil, that is the largest water supply of the area. Analysis of the operational records of that project as well as of hydrometeorological data of the hydrographic basin of São Bento River enabled the results and conclusions that make this study an operational support tool for São Bento River Dam. It was verified that water supply for the demands of public provision and irrigation is directly related to the pluviometric regime active in the hydrographic basin of São Bento River, a system that presents efficient levels in relation to the current demands. The greater water demands of the reservoir are destined for irrigation. Water demands for rice growing point out a significant increase if compared to the project demands as a result of the increase of rice cultivated areas. The same way the discharges currently in use for public domestic supply present higher values than those demands established in the project. The currently observed water surplus can not motivate an indiscriminate increase of the areas for growing rice, as taking into account the increase of the domestic water demand and of the forecasted distribution systems will imply limitation of water supply for irrigation. There are indicators that precipitation in the Basin of São Bento River is higher than the one observed at the meteorological station of Urussanga. So it is possible to infer that the actual discharges are higher than the estimates of the basic project indicating that the supply is higher than the one forecasted. It is indicated the increase of the telemetric net of hydrometeorological data including the installation of pluviographs and level sensors in the rivers Morto, Da Serra and Da Mina. It is recommended the revision of the operational model of São Bento River Dam with the inclusion of evaporation data in the water balance of the reservoir. It was difficult to define the key curves of upstream São Bento River, and Serrinha River due to their section variability; as a consequence it is recommended the construction of level dams in sections placed upstream of the reservoir in order to enable a more effective monitoring of the respective rivers discharges. It is essential a more accurate study about the physical and morphometrical parameters of the hydrographic basin of São Bento River as well as a study of the conditions of sediment transport and siltation in this basin. From some studies of correlations elaborated in this research the results indicate a strong relationship between the effects caused by the hydrological process in the hydraulic behavior of São Bento River Dam. It is necessary to maintain and update the studies accomplished on this research for further use in the operational process of São Bento River Dam.

Key words: reservoir operation; hydrology; dimensioning of reservoirs

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Capacidade máxima do reservatório de interceptação.....	25
Tabela 2. Classificação dos coeficientes de correlação.....	33
Tabela 3. Áreas de drenagem das bacias e sub-bacias hidrográficas	42
Tabela 4. Precipitações média mensais (mm) na estação Meleiro (1942 a 1992).....	44
Tabela 5. Vazões mensais no local do barramento.....	45
Tabela 6. Caracterização das diferentes classes hipsométricas identificadas na região do aproveitamento	48
Tabela 7. Vazões do vertedouro relacionadas com os níveis do reservatório	57
Tabela 8. Capacidade máxima de descarga dos órgãos de descargas da barragem do rio São Bento.....	64
Tabela 9. Demandas progressivas para os diversos horizontes de projeto.....	65
Tabela 10. Demandas consideradas para projeto para irrigação	65
Tabela 11. Periodicidade de leituras dos dados hidrometeorológicos.....	81
Tabela 12. Estatística descritiva dos níveis do reservatório	83
Tabela 13. Estatística descritiva dos volumes (hm ³)	87
Tabela 14. Cotas e volumes do reservatório durante os períodos com demandas para irrigação ocorridos nos meses de março e setembro do ano subsequente	91
Tabela 15. Vazões de projeto 2007 e 2017.....	94
Tabela 16. Caracterização dos períodos de vertimentos.....	99
Tabela 17. Tempos de retenção hidráulica em dias, do reservatório.....	101
Tabela 18. Vazões do rio São Bento durante os períodos com demandas para irrigação	103

Tabela 19. Série de precipitações 2004 a 2007	105
Tabela 20. Estatística descritiva da série de dados pluviométricos.....	106
Tabela 21. Precipitações medias mensais (mm) na estação meteorológica São Bento entre 2004 e 2007	107
Tabela 22. Precipitações máximas diárias da barragem do rio São Bento entre .2004 e 2007	108
Tabela 23. Maiores alturas de chuvas ocorridas no período de uma hora.....	108
Tabela 24. Número de dias não chuvosos no período de 2005 a 2007.....	109
Tabela 25. Número de dias seguidos não chuvosos no período de 2005 a 2007.....	109
Tabela 26. Evaporação em milímetros ocorrida no período de 2004 a 2007	110
Tabela 27. Estatística descritiva dos dados de evaporação de 2005 a 2007	111
Tabela 28. Valores de E_{TANQUE} e E_{LAGO} para o aproveitamento da Barragem do rio São Bento.....	111
Tabela 29. Níveis do rio São Bento montante em centímetros	112
Tabela 30. Níveis do rio Serrinha em centímetros	113
Tabela 31. Níveis do rio São Bento jusante em centímetros.....	113
Tabela 32. Estatística descritiva das vazões afluentes ao reservatório.....	114
Tabela 33. Vazões afluentes ao reservatório	115
Tabela 34. Coeficientes superficiais mensais obtidos através da série operacional.....	116
Tabela 35. Processos e variáveis do estudo de correlações.....	118
Tabela 36. Coeficientes e classificação dos períodos analisados das elevações dos rios São Bento montante e Serrinha	121
Tabela 37. Número de ocorrências e sua respectiva classificação	122

Tabela 38. Relação cota x área do reservatório	126
--	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processos hidrológicos de evapotranspiração e precipitação no ciclo hidrológico.....	23
Figura 2. Representação dos tipos de chuvas	24
Figura 3. Hidrograma de vazões barragem do rio São Bento.....	29
Figura 4. Fluxo de modelagem (adaptado de MACHADO, 2005)	35
Figura 5. Localização da bacia do rio São Bento	38
Figura 6. Bacias hidrográficas do Estado de Santa Catarina.....	40
Figura 7. Quadro esquemático do sistema hídrico. Fonte: CASAN-2003	40
Figura 8. Localização do reservatório da barragem do rio São Bento	41
Figura 9. Mapa da área do reservatório da barragem do rio São Bento	50
Figura 10. Vista panorâmica da barragem do rio São Bento.....	51
Figura 11. Estruturas de contenção das águas do reservatório	52
Figura12. Vista panorâmica do barramento principal do empreendimento	53
Figura 13. Dique principal da barragem do rio São Bento.....	54
Figura 14. Dique secundário da barragem do rio São Bento.....	55
Figura 15. Vista do vertedouro da barragem do rio São Bento	56
Figura 16. Curva de vazões do vertedouro	56
Figura 17. Descarregadores de fundo de 1000, 800 e 400 mm	59
Figura 18. Curvas de vazões dos descarregadores de fundo	60
Figura 19. Válvula dispersora.....	61
Figura 20. Curva de descargas da válvula dispersora.....	61

Figura 21. Esquema do sistema adutor da barragem do rio São Bento.....	62
Figura 22. Macromedidor de vazões da adutora da barragem do rio São Bento.....	63
Figura 23. Fluxograma de operação da barragem do rio São Bento	68
Figura 24. Formulário do controle hidráulico do reservatório	72
Figura 25. Corte transversal do reservatório	74
Figura 26. Curva cota x volume do reservatório	75
Figura 27. Alocação das estações hidrometeorológicas da barragem do rio São Bento	77
Figura 28. Estações meteorológicas – Barragem do rio São Bento.....	78
Figura 29. Estação hidrológica São Bento jusante	79
Figura 30. Estação hidrológica São Bento montante.....	80
Figura 31. Estação hidrológica Serrinha montante.....	80
Figura 32. Evolução das cotas e volumes alocados no reservatório.....	82
Figura 33. Cotograma do reservatório	83
Figura 34. Curva de permanência dos níveis do reservatório.....	84
Figura 35. Variação da cota útil do reservatório	85
Figura 36. Histograma dos níveis do reservatório.....	86
Figura 37. Evolução dos volumes do reservatório	87
Figura 38. Curva de permanência dos volumes do reservatório	88
Figura 39. Histograma dos volumes armazenados	89
Figura 40. Volumes acumulados no reservatório	89
Figura 41. Níveis de ocupação em relação ao volume máximo do reservatório.....	90

Figura 42. Série das vazões defluentes.....	92
Figura 43. Curva de permanência das vazões defluentes	93
Figura 44. Série das vazões de adução	94
Figura 45. Série de vazões da válvula dispersora.....	95
Figura 46. Série de vazões do descarregador de fundo de 400 mm	96
Figura 47. Série de vazões do descarregador de fundo de 800 mm	96
Figura 48. Série de vazões do descarregador de fundo de 1000 mm	97
Figura 49. Série de vazões de vertimento.....	98
Figura 50. Tempos de retenção hidráulica 2005 a 2006.....	101
Figura 51. Curva de relação entre as vazões afluentes ao reservatório e o tempo de retenção hidráulica do reservatório da barragem do rio São Bento	102
Figura 52. Série das vazões ecológicas encaminhadas ao rio São Bento jusante ao reservatório	103
Figura 53. Totais mensais da bacia hidrográfica do rio São Bento	105
Figura 54. Totais anuais precipitados na área da barragem do rio São Bento.....	106
Figura 55. Precipitações ocorridas nos anos de 2005 a 2007	110
Figura 56. Hidrograma das vazões afluentes ao reservatório.....	114
Figura 57. Curva de Permanência das vazões afluentes ao reservatório.....	115
Figura 58. Período com ocorrência de apenas um pico de elevação dos rios.....	119
Figura 59. Período com ocorrência de dois picos de elevação dos rios	120
Figura 60. Período com ocorrência de ocorre três picos de elevação dos rios	120
Figura 61. Período com ocorrência de quatro picos de elevação dos rios.....	121

Figura 62. Evolução das cotas do reservatório e as respectivas vazões de vertimento	123
Figura 63. Curva gerada da análise de regressão entre as cotas do reservatório e as vazões de vertimento.....	124
Figura 64. Evolução dos níveis e volumes do reservatório	125
Figura 65. Curva gerada da análise de regressão entre as cotas e os volumes do reservatório	125
Figura 66. Curva obtida da análise de regressão da cota e área do reservatório	127
Figura 67. Curva-chave rio São Bento jusante – Anos 2005 a 2007.....	128

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVOS	21
2.1 Objetivo Geral	21
2.2 Objetivos Específicos	21
3 REVISÃO DA LITERATURA	22
3.1 Ciclo hidrológico	22
3.1.1 Precipitação	23
3.1.2 Interceptação.....	24
3.1.3 Evaporação e evapotranspiração	25
3.1.4 Infiltração.....	27
3.1.5 Escoamento superficial.....	28
3.1.6 Balanço hídrico em reservatórios	29
3.2 Elementos de estatística e probabilidades	30
3.2.1 Generalidades	30
3.2.2 Tratamento estatístico de variáveis hidrológicas.....	30
3.2.3 Modelos probabilísticos em hidrologia	33
3.3 Séries temporais.....	33
3.4 Modelos hidrológicos.....	34
3.4.1 Generalidades	34
3.4.2 Modelos de precipitação-vazão	35
3.4.3 Modelos de escoamento.....	36
3.4.4 Previsão e operação de reservatórios.....	37
4 DESCRIÇÃO DA UNIDADE DE ESTUDO.....	38
4.1 A bacia hidrográfica do rio São Bento.....	38
4.1.1 Climatologia	42
4.1.2 Pluviometria	43
4.1.3 Fluviometria	44
4.1.4 Geologia e geomorfologia	45
4.1.5 Cobertura vegetal.....	48
4.2 Barragem do rio São Bento	49
4.2.1 Generalidades	49

4.2.2 Barragem principal	52
4.2.3 Dique principal	53
4.2.4 Dique secundário	54
4.2.5 Vertedouro	55
4.2.6 Reservatório	57
4.2.7 Descarregadores de fundo	58
4.2.8 Válvula dispersora	60
4.2.9 Adutora	61
4.2.10 Demandas consideradas pelo projeto	64
4.2.10.1 Abastecimento urbano	64
4.2.10.2 Irrigação de áreas cultivadas.....	65
4.2.10.3 Vazão mínima de jusante.....	65
4.2.11 Descrição da política de operação da barragem do Rio São Bento.....	66
5 MATERIAL E MÉTODOS	70
5.1 Generalidades	70
5.2 O controle hidráulico do reservatório	70
5.2.2 Procedimentos adotados no registro do controle hidráulico do reservatório.....	71
5.2.3 Balanço hídrico do reservatório.....	73
5.2.4 Corte transversal do reservatório.....	74
5.3 Dados hidrometeorológicos.....	75
5.3.1 Generalidades	75
5.3.2 Estações instaladas na bacia do rio São Bento	76
5.3.2.1 Estações meteorológicas.....	78
5.3.2.2 Estações hidrológicas	79
5.4 Descrição dos dados.....	81
6 RESULTADOS	82
6.1 Dados hidráulicos	82
6.1.1 Níveis do reservatório.....	83
6.1.2 Volumes do reservatório.....	86
6.1.3 Vazões defluentes	91
6.1.3.1 Vazões de adução	93
6.1.3.2 Vazões da válvula dispersora	94
6.1.3.3 Vazões dos descarregadores de fundo	95
6.1.3.4 Vazões de vertimento	97

6.1.4 Tempo de retenção hidráulica do reservatório	100
6.1.5 Vazões ecológica	102
6.2 Dados hidrológicos.....	104
6.2.1 Precipitação	104
6.2.2 Evaporação	109
6.2.3 Níveis dos rios	111
6.2.3.1 Nível do rio São Bento montante	112
6.2.3.2 Nível do rio Serrinha	112
6.2.3.3 Nível do rio São Bento jusante	113
6.2.4 Vazões afluentes	113
6.2.5 Escoamento superficial.....	116
6.3 Análise e correlações	117
6.3.1 Generalidades	117
6.3.2 Correlação entre os níveis dos rios São Bento montante e Serrinha	118
6.3.3 Correlação entre os níveis do reservatório e as vazões de vertimento	123
6.3.4 Correlação entre os níveis e os volumes dos reservatórios	124
6.3.5 Correlação entre os dados dos níveis e as áreas da superfície do reservatório.....	125
6.3.6 Correlação entre as vazões defluentes e os níveis do rio São Bento jusante.....	127
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	129
REFERÊNCIAS	132

1 INTRODUÇÃO

Ao referir-se aos processos hidrológicos aplicados ao controle hidráulico-operacional de reservatórios de acumulação de água, a temática remete aos estudos de hidrologia aplicada em obras de barragens, bem como da hidráulica aplicada aos projetos e às suas construções. O controle hidráulico-operacional destes empreendimentos constitui-se no estudo e no acompanhamento técnico das variáveis hidrológicas atuantes nas áreas onde estão inseridos estes reservatórios, e o seu comportamento hidráulico decorrente destes processos.

Os estudos relativos aos reservatórios de água em geral são complexos e multidisciplinares. Entretanto, a integração dos estudos hidrológicos com os estudos hidráulicos favorecem consideravelmente a operação destes reservatórios, pois dentro das características dos elementos hidráulicos que constituem as barragens, o comportamento hidráulico é analisado simultaneamente com os processos hidrológicos que atuam em sua área de influência (RIGHETTO, 1998).

Entende-se que a construção e operação de reservatórios possuem como regra básica e essencial a reservação de água nos períodos de excesso hídrico, para seu posterior uso em períodos de escassez. Entretanto, alguns fatores tornam a análise da operação de reservatórios de usos múltiplos um problema de difícil solução, haja vista as características estocásticas dos processos hidrológicos, a quantificação e definição dos objetivos, a necessidade de um processo seqüencial de decisões, bem como a complexidade dos problemas de otimização que muitas vezes não evidenciam características de linearidade (BRAVO, 2006).

Em operação de reservatórios, os processos hidrológicos mais comumente monitorados são a precipitação, o escoamento superficial e a evaporação, constituindo-se estas, as variáveis hidrológicas utilizadas na determinação do balanço hídrico dos reservatórios.

Em razão da crescente escassez de água com qualidade para o abastecimento público, a construção de reservatórios para alocação de água vêm ganhando cada vez mais destaque dentro do universo das alternativas destinadas a este uso, tendência esta que evidencia-se à medida que a população urbana cresce, exigindo-se demandas de modo proporcional à evolução deste crescimento, o que torna evidente a necessidade de regularização de vazões dos mananciais com finalidades de provisionamento hídrico.

Dentre as finalidades dos reservatórios, estão o abastecimento público, aproveitamento hidroelétrico, controle de cheias e de sedimentos, irrigação de áreas

agricultáveis, recreação e navegação fluvial, onde através dos estudos hidrológicos e hidráulicos é que são definidas as suas vazões de regularização em conformidade com a finalidade estabelecida, requerendo desta forma a otimização do uso das águas reservadas, fato este que constitui o objetivo fundamental da engenharia de recursos hídricos (RIGHETTO, 1998).

Os estudos das relações entre as variáveis hidráulicas dos reservatórios e os seus processos hidrológicos atuantes, constituem uma ferramenta imprescindível para os profissionais responsáveis por operações de barragens, visto que as tomadas de decisões requerem o entendimento sobre o comportamento destas variáveis e a compreensão de alguns fatores intervenientes nestas, e que por sua vez estão ligados diretamente às ações destes processos.

A presente pesquisa por possuir características de estudo de caso, busca descrever, registrar, analisar e interpretar a série operacional da barragem do rio São Bento, empreendimento este pertencente à Companhia Catarinense de Águas e Saneamento – CASAN, localizado no município de Siderópolis, no sul do Estado de Santa Catarina.

Procura-se através desta pesquisa, avaliar os níveis de relação entre o comportamento dos elementos hidráulicos da barragem do rio São Bento, em consonância às ações dos processos hidrológicos atuantes na bacia hidrográfica do rio de mesmo nome. O presente estudo concentra-se nas observações elaboradas através de sua série operacional relativa ao controle hidráulico do reservatório e da série de dados hidrometeorológicos obtidas após o início da operação deste empreendimento.

O reservatório formado pela barragem do rio São Bento caracteriza-se por seus usos múltiplos, onde as diretrizes operacionais estabelecidas prevêm o seu manejo para o abastecimento público de água, a irrigação e o controle de cheias.

No contexto de seus usos múltiplos, o abastecimento público é o uso preponderante, visto que a degradação da região carbonífera decorrente da exploração e do beneficiamento do carvão mineral a partir do início do século passado, fez com que a região se tornasse escassa de água com qualidade para o abastecimento público, fazendo-se com que a alternativa mais segura e viável fosse a construção da barragem do rio São Bento, onde a mesma, abastece atualmente cerca de 300.000 habitantes, sendo contemplados os municípios de Criciúma, Içara, Nova Veneza, Forquilha e Maracajá, onde, para um horizonte de trinta anos (até 2027), prevê-se atender também os municípios de Siderópolis, Morro da Fumaça e Treviso, municípios estes também localizados no sul do estado de Santa Catarina.

Os vários objetivos do gerenciamento dos sistemas de recursos hídricos constituídos por reservatórios visam promover o desenvolvimento econômico, social, ambiental, etc. (NASCIMENTO, 2006). A barragem do rio São Bento, constitui-se atualmente na maior unidade de produção de água bruta da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento – CASAN, tendo um papel fundamental no desenvolvimento regional do Sul do Estado de Santa Catarina, região na qual em tempos passados conviveu com freqüentes problemas relativos a falta de água para o abastecimento público, inclusive com uma série de problemas que envolveram conflitos de uso d'água decorrentes de sua utilização para a cultura do arroz no Sul do Estado catarinense.

Dentro do escopo teórico abordado neste trabalho, concatenado aos registros dos dados hidráulicos e hidrometeorológicos da série operacional da barragem do rio São Bento, procura-se caracterizar as relações comportamentais dessas variáveis, de modo que este estudo venha apresentar aplicabilidade no contexto operacional deste aproveitamento, e consolidá-lo como ferramenta de aplicação prática na rotina operacional daquela unidade produtiva.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

A proposta deste estudo foi desenvolver um instrumento que oriente o processo de controle hidráulico-operacional da barragem do rio São Bento.

2.2 Objetivos Específicos

A fim de alcançar o objetivo proposto, desenvolveu-se as seguintes atividades que subsidiarão o estudo:

- a) Avaliação dos processos hidrológicos atuantes no contexto físico da bacia hidrográfica do rio São Bento;
- b) Identificação das peculiaridades hidráulicas dos órgãos de descarga da barragem do rio São Bento;
- c) Avaliação ao longo o tempo, em sua série histórico-operacional, o desempenho hidráulico do reservatório formado pelas obras que compreende a barragem do rio São Bento; e
- d) Correlação dos processos hidrológicos com o comportamento hidráulico da barragem do rio São Bento;

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico conceitua-se como sendo o fenômeno global de circulação fechada da água entre a atmosfera e a superfície terrestre, impulsionado fundamentalmente pela energia solar em associação com a força da gravidade e rotação da Terra (TUCCI, 1998).

Garcez e Alvarez (1988), considera que o ciclo hidrológico compreende as fases atmosférica e terrestre, cada uma delas incluem:

- a) armazenamento temporário da água;
- b) transporte;
- c) mudança de estado.

Ao relacionar-se o ciclo hidrológico à Engenharia Hidráulica, este compreende quatro etapas principais:

- a) precipitações atmosféricas, compreendendo os eventos de chuvas, granizo, neve e orvalho;
- b) escoamentos subterrâneos, incluindo a infiltração e águas subterrâneas;
- c) escoamentos superficiais representados pelas torrentes, rios e lagos;
- d) evaporação (na superfície das águas e no solo) e transpiração dos vegetais e animais.

Os continentes e oceanos constituem a superfície terrestre, participando do ciclo hidrológico a camada porosa que recobre os continentes através dos solos e das rochas e o reservatório constituído pelos oceanos (TUCCI, 1997).

Grande parte dos eventos meteorológicos ocorrem na camada fina inferior da atmosfera entre 8 a 16 km de espessura que constitui troposfera, onde esta camada detém cerca de 90% da umidade atmosférica. Acima da troposfera situa-se a estratosfera com espessura entre 40 e 70 km, que constitui a camada de ozônio, e que possui o papel de reguladora da radiação solar para a superfície, tornando-se a principal fonte de energia para o processamento do ciclo hidrológico.

A figura 1 apresenta a dinâmica dos processos hidrológicos de evapotranspiração e precipitação dentro do ciclo hidrológico.

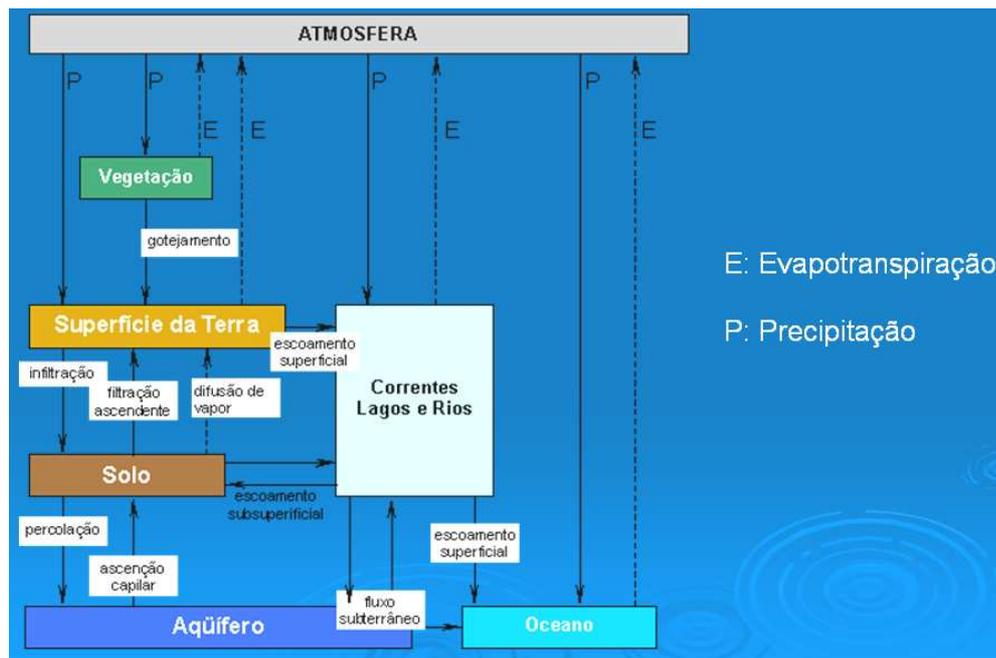


Figura 1. Processos hidrológicos de evapotranspiração e precipitação. (Adaptado de Zeilhofer, 2007).

3.1.1 Precipitação

As águas provenientes da atmosfera que atingem a superfície terrestre constituem as precipitações. Estas ocorrências podem ser dar em forma de chuva, orvalho, neblina, granizo, neve e geada.

Em se tratando do estudo de precipitações, no Brasil as chuvas apresentam maior importância por se tratar dos problemas relacionados à formação dos escoamentos superficiais (BACK, 2002).

Segundo TUCCI (1997), as chuvas podem ser classificadas em três tipos:

- Precipitações Frontais ou Ciclônicas:** ocorrem quando da ascensão do ar quente sobre o ar frio na zona de contato entre duas massas de ar com características diferentes. A frente fria caracteriza-se quando a massa de ar fria se move em direção à massa de ar quente, o contrário refere-se à frente quente. Este tipo de chuva se caracteriza por serem de intensidade média, porém com longa duração, com abrangência de longas áreas, onde em grandes bacias produzem grandes inundações;
- Precipitações Orográficas:** São precipitações decorrentes do resfriamento da massa de ar úmido que ao encontrar uma barreira de montanhas esta forçosamente se

eleva. Comportam-se como chuvas de intensidade variável e de grande duração e abrangem áreas relativamente pequenas e apresentam muita frequência de ocorrência;

- c) Precipitações Convectivas: Decorrem do aquecimento desigual da superfície terrestre, provocadas pela elevação brusca da massa de ar a grandes altitudes. Caracterizam-se pelas tempestades ou trovoadas, com grande ocorrência nos meses da estação quente. Estas chuvas apresentam curta duração e alta intensidade, abrangendo áreas relativamente pequenas, promovendo alagamentos em pequenas bacias hidrográficas.

A figura 2 representa os vários tipos de chuvas descritos acima.

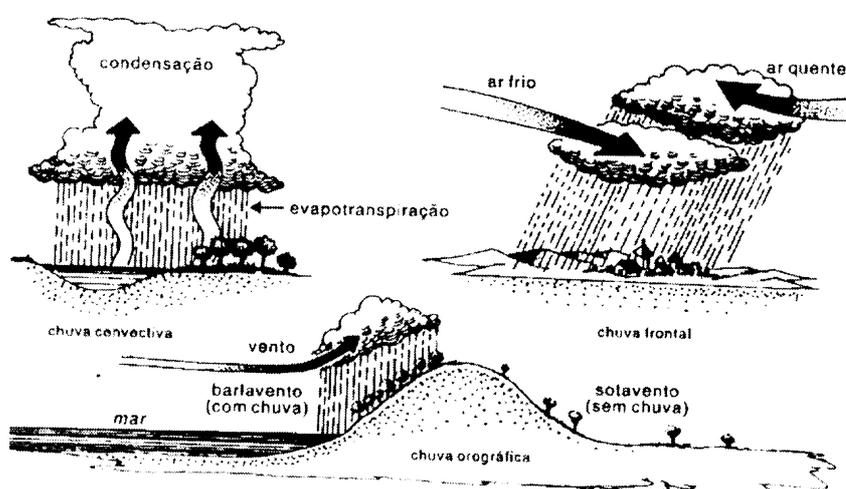


Figura 2. Representação dos tipos de chuvas. (Adaptado de Machado, 2004).

3.1.2 Interceptação

A interceptação pode ser entendida como a parcela do volume precipitado interceptado antes que alcance o solo. A principal forma de interceptação é a retenção de volumes de água pelas folhas e troncos da vegetação da bacia hidrográfica em questão. (LINSLEY, 1978) cita que as perdas por interceptação vegetal podem chegar até 25% da precipitação anual. Há várias formas de se avaliar os volumes interceptados, no entanto, a forma mais clássica de tratar o problema é considerar a interceptação como um reservatório de uma dada capacidade máxima enchido pela chuva e deplecionado pela evaporação

(CRAWFORD e LINSLEY 1978 apud , 1997). Estes autores enfatizam que a interceptação é função do tipo de cobertura vegetal (Tabela 1).

A cobertura florestal, através da interceptação, influencia a redistribuição da água da chuva, em que as copas das árvores formam um sistema de amortecimento, direcionamento e retenção das gotas que chegam ao solo, afetando a dinâmica do escoamento superficial e o processo de infiltração. Desse modo, o abastecimento das águas é favorecido e a variação de vazão ao longo do ano, reduzida, além do retardamento dos picos de cheia. Alguns pesquisadores afirmam que a floresta nativa, entre os ecossistemas vegetais, atua no ciclo hidrológico de maneira mais significativa, pois proporciona melhores condições de infiltração da água da chuva (OLIVEIRA JUNIOR; DIAS, 2005).

Tabela 1. Capacidade máxima do reservatório de interceptação.

Cobertura	Capacidade Máxima (mm)
Campo, prado	2,5
Floresta ou mato	3,75
Floresta ou mato denso	5,00

Fonte: TUCCI, 1997.

Outra forma de interceptação de volumes da precipitação, conhecida por detenção, ocorre devido às depressões existentes ao longo da bacia. A dinâmica deste tipo de interceptação é função principalmente do tipo de solo. Em solos arenosos, os volumes interceptados infiltram rapidamente retornando ao fluxo normal da bacia. Em solos mais argilosos, a infiltração é lenta e a interceptação nas depressões é significativa reduzindo a vazão média da bacia (MACHADO, 2005).

3.1.3 Evaporação e evapotranspiração

Segundo (1997), a evaporação e evapotranspiração acontece quando a água líquida é convertida para vapor de água e transferida neste estado para a atmosfera.

Atribui-se à evaporação o conjunto de fenômenos físicos que transformam em vapor a água precipitada sobre a superfície do solo e água dos mares, dos lagos, rios e dos reservatórios de acumulação. Entretanto, a transpiração é o processo pelo qual a evaporação decorre das ações fisiológicas dos vegetais (GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

Para Garcez e Alvarez (1988), alguns fatores condicionam o poder evaporante da atmosfera:

- a) Grau de umidade relativa do ar atmosférico;
- b) Vento;
- c) Temperatura;
- d) Radiação solar;
- e) Pressão barométrica;
- f) Salinidade da água;
- g) Evaporação na superfície do solo;
- h) Transpiração.

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (2004), os valores da evaporação medida e obtida através de tanques superam os obtidos em lagos e/ou reservatórios, em decorrência das diferenças de volume, superfície e localização e também pelo fato do lago/reservatório depender da variação do transporte de massas e balanço de energia, que influenciam os dias subsequentes, enquanto que no tanque isto não ocorre

O fator que relaciona a evaporação de um reservatório e do tanque classe A oscila entre 0,6 e 0,8 sendo 0,7 o valor mais utilizado (ONS, 2004).

O balanço hídrico possibilita a determinação da evaporação com base na equação da continuidade do lago ou reservatório. A equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{dV}{dT} = I - Q - E_o.A + P.A$$

Onde:

V = volume de água contido no reservatório;

t = tempo;

I = vazão total de entrada no reservatório;

Q = vazão de saída do reservatório;

E_o = evaporação;

P = precipitação sobre o reservatório;

A = área do reservatório.

A evaporação é obtida por:

$$E_o = (I - Q) / A + P - \left(\frac{dV}{dt} \right) / A$$

Segundo Genovez (2003), o efeito da evaporação da superfície do lago pode ser calculada por:

$$Q_E = 0,7.E.A_L$$

Em que Q_E = vazão de água que evapora do reservatório;

0,7 o coeficiente de correlação do tanque Classe A;

E = evaporação do tanque classe A; e

A_L = área da superfície líquida do lago, podendo ser adotada como valor médio de $A_L = 2/3$

Este mesmo autor descreve ainda que para regiões como o Estado de São Paulo o valor de evaporação pode ser desprezado, mas em regiões de clima árido, como o Nordeste do Brasil, não se pode desprezar pois correria o risco de o reservatório não encher nunca.

3.1.4 Infiltração

Para TUCCI (1997), infiltração é o processo de passagem das águas da superfície para o interior do solo.

As águas provenientes das precipitações que venham ficar retidas no terreno e escoar superficialmente podem se infiltrar no solo por efeito da gravidade ou de capilaridade, passando a formar a fase subterrânea do ciclo hidrológico (GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

O processo de infiltração das águas relacionam-se diretamente às características do solo, do relevo e dos obstáculos oferecidos ao escoamento superficial, bem como do porte da vegetação existente em determinada área.

Segundo Villela (1975), a infiltração se processa através da interveniência dos seguintes fatores:

- a) Umidade do solo;
- b) Permeabilidade do solo;
- c) Temperatura do solo;
- d) Profundidade do extrato permeável.

Assim, um solo seco possui maior capacidade de infiltração inicial devido ao fato de se somarem às forças gravitacionais e as de capilaridade. Entretanto, a permeabilidade do solo pode ser afetada por fatores como cobertura vegetal, compactação, infiltração de materiais finos, etc.

O conhecimento da dinâmica do processo de infiltração permite avaliar e diferenciar a capacidade de infiltração e da taxa de infiltração. No início deste processo de infiltração, as camadas superiores do solo apresentam-se mais secas, ou seja, naquele momento a capacidade de infiltração é maior que num momento posterior. As taxas de infiltração são funções da quantidade de água disponível.

3.1.5 Escoamento superficial

Se a precipitação for tal que supera as perdas por interceptação e evaporação, e ainda sua intensidade seja superior à capacidade de infiltração, então ocorre o escoamento superficial (MACHADO, 2005).

O escoamento superficial acontece em razão do movimento das águas sobre o solo devido ao excesso de água precipitado dos pontos mais altos para os pontos mais baixos através da ação da gravidade.

O hidrograma consiste num gráfico que representa a relação da vazão com o tempo. A distribuição da vazão no tempo configura o resultado da interação dos elementos do ciclo hidrológico e a ocorrência da precipitação resulta a vazão em uma determinada bacia hidrográfica (TUCCI, 1997).

O mesmo autor supracitado diz que os fatores intervenientes no escoamento superficial são os seguintes:

- a) Relevo;
- b) Cobertura da bacia;
- c) Modificações artificiais no rio;
- d) Solo
- e) Distribuição, duração e intensidade da precipitação.

PINTO et al. (2000), cita que o escoamento superficial decorre fundamentalmente das precipitações. Para isto, parte da água das chuvas é interceptada através da vegetação e outros obstáculos, de onde se evapora posteriormente. Do volume que atinge a superfície do

solo, parte é retida em deposições do terreno, parte infiltra e o restante escoar pela superfície, à medida que a intensidade da precipitação supera a capacidade de infiltração no solo e os espaços nas superfícies retentoras tenham sido preenchidos.

A figura 3 representa o hidrograma de vazões afluentes ao reservatório da barragem do rio São Bento, vazões estas decorrentes do escoamento superficial na bacia hidrográfica

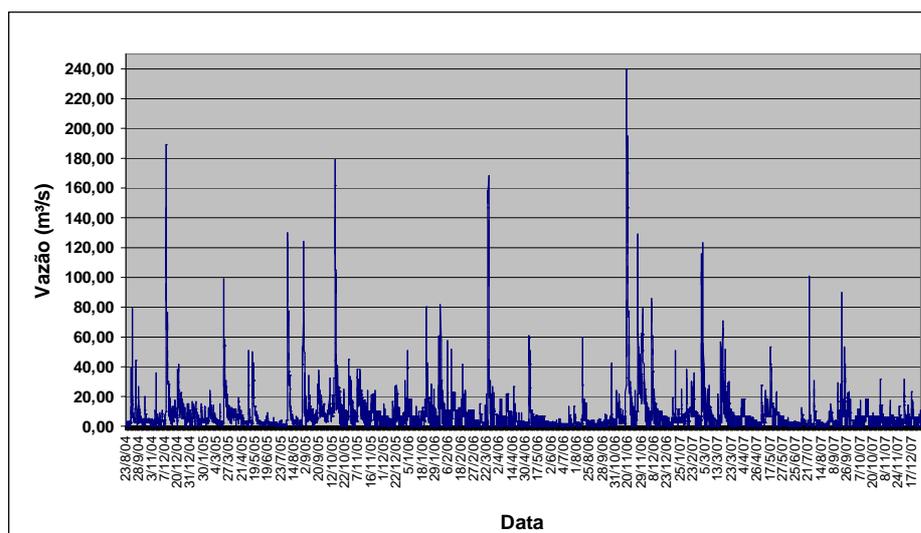


Figura 3. Hidrograma de vazões Barragem do Rio São Bento. Fonte: CASAN, 2007.

Back (2006), descreve que as características morfométricas regem o escoamento superficial de uma bacia hidrográfica, destacando, no entanto que o conhecimento das características físicas da bacia hidrográfica, bem como da sua rede de drenagem tem aplicação em estudos de hidrogeologia, em especial nas diferentes metodologias aplicadas à estimativa de vazões.

3.1.6 Balanço hídrico em reservatórios

Para a realização do balanço hídrico de reservatórios pode ser utilizada a seguinte equação de conservação da massa (MENDONÇA, 2003):

$$V_{I+1} = V_I + dQ \cdot dt + dL \cdot (A_I + A_{I+1}) / 2$$

Onde:

V = volume acumulado;

dT = intervalo de tempo;

dQ = balanço das vazões afluente, aduzida e vertida;

dL = balanço das águas precipitada, evaporada e escoada na bacia hidráulica;

A = área da bacia hidráulica;

A avaliação dos volumes armazenados é elaborada partir de relações entre áreas de espelho d'água que podem ser escritas da seguinte forma: $V = a.A^b$

Onde:

V e A são respectivamente, o volume e a área do reservatório e a e b os coeficientes determinados em função das características físicas das bacias.

3.2 Elementos de estatística e probabilidades

3.2.1 Generalidades

Visto que os processos hidrológicos são aleatórios, diz-se que suas ocorrências não podem ser conhecidas (TUCCI, 1997). Sendo assim, não é possível saber a evolução dos valores de temperatura, vento, insolação, precipitação, evaporação, vazão em seções de rios, ao longo do tempo e do espaço. Diante disto, estabelece-se uma dificuldade básica no planejamento das atividades humanas, visto que as mesmas são vinculadas a estes processos.

Entretanto, diante destas dificuldades, surge a preocupação do homem em estabelecer instrumentos para o tratamento destas aleatoriedades, fazendo-se com que surgisse as disciplinas relacionadas com a teoria das probabilidades e estatística, de modo que se possa administrar os dados hidrológicos e relacionando-os com estas teorias.

3.2.2 Tratamento estatístico de variáveis hidrológicas

Ao tratar-se de um processo aleatório, tem-se que pressupor inicialmente a sua quantificação. Por isto, esta quantificação é realizada por uma variável aleatória, visto que o processo hidrológico é estocástico e conseqüentemente ele trata com variáveis aleatórias (TUCCI, 2005).

Os processos hidrológicos desenvolvem-se no tempo e no espaço, e para isto faz-se necessário quantificar a variável hidrológica. Tomando-se a chuva como exemplo, esta possui variação temporal, e deste modo a variável que a quantifique deve assumir valores distintos no decorrer do tempo. Vale lembrar que a chuva varia ao longo do espaço, onde a variável representativa estaria representada em função das coordenadas dos pontos geográficos de interesse.

Os processos hidrológicos podem ser representados de diversas formas por uma série de valores numéricos. Esta escolha de forma de representá-los depende dos objetivos da análise e pelas características dos processos (TUCCI, 2005).

A representação gráfica consiste na apresentação dos dados hidrológicos em relação ao tempo. Esta representação dá a idéia de variabilidade temporal, das periodicidades anuais, das estações secas e úmidas, entre outras informações.

A curva de permanência tem sido uma forma bastante utilizada para a manipulação dos dados hidrológicos, pois ela apresenta a freqüência com que ocorrem os valores iguais ou superiores aos valores da série temporal.

Os histogramas de freqüência consistem na representação gráfica da freqüência com uma variável aleatória ocorre com dado valor, caso variável discreta, ou em dado intervalo, caso de variável contínua.

A relação entre duas variáveis em hidrologia é comumente utilizada, pois possibilita relacionar dois processos hidrológicos. Os processos de chuva e vazões em determinada bacia exemplificam bem esta aplicação de tratamento estatístico.

A tendência central relaciona-se com a parte central do histograma de freqüências, onde às vezes ocorre uma tendência de que o número de ocorrências seja maior nesta parte central, representando que a variável aleatória costuma ocorrer com maior freqüência nos intervalos central. Os parâmetros estatísticos que representam a tendência são: média aritmética, moda e a mediana.

A variabilidade em torno da média é tratada como medidas de dispersão, onde seus parâmetros são representados através da variância, do desvio padrão e da assimetria.

No escopo referente ao tratamento estatístico das variáveis hidrológicas, utiliza-se também a relação entre duas variáveis, onde o coeficiente de co-variança amostral representa o nível de ajuste a uma tendência relacional.

O coeficiente de correlação também é utilizado para análise das relações entre as variáveis hidrológicas, onde valores próximos de um representam ajustes de tendências retilíneas.

Estudos de correlação e regressão têm grande aplicabilidade nos processos hidrológicos, onde podem ser utilizados de inúmeras maneiras, de modo que possam representar os níveis de relacionamento entre as variáveis hidrológicas e variáveis hidráulicas representativas de reservatórios de acumulação de água.

Diz-se que duas variáveis, X e Y, são positivamente correlacionadas quando estas caminham num mesmo sentido, ou seja, elementos com valores pequenos de X tendem a ter valores pequenos de Y e elementos com valores grandes de X tendem a ter valores grandes de Y. Sendo assim, considera-se negativamente correlacionadas quando elas caminham em sentidos opostos, ou seja, elementos com valores pequenos de X apresentam valores grandes de Y e elementos com valores grandes de X tendem a ter valores pequenos de Y. Conceituando-se portanto, que correlação refere-se a uma associação numérica entre duas variáveis, não implicando, necessariamente, relação de causa-e-efeito, ou mesmo uma estrutura com interesses práticos (BARBETTA; REIS; BORNIA, 2004).

A análise de dados para verificar correlações é comumente utilizada em termos exploratórios, onde verifica-se as correlações como elemento auxiliar na análise do problema em estudo, ou seja, o estudo da correlação numérica entre as observações de duas variáveis é geralmente um passo intermediário na análise de um problema (BARBETTA; REIS; BORNIA, 2004).

Spiegel (1994), considera que um problema está estritamente relacionado, quando a correlação, ou o grau de relação entre as variáveis, apresenta uma equação linear, ou de outra espécie, que descreva ou explique a relação existente, sendo que, se todos os valores das variáveis satisfazem exatamente uma equação, pode-se afirmar que elas estão perfeitamente correlacionadas ou que há correlação perfeita entre elas.

Entende-se por correlação e regressão simples quando apenas duas variáveis apresentam-se no escopo da análise. Entretanto, quando se trata de mais de duas variáveis num determinado caso, chama-se, portanto de correlação e regressão múltipla.

Triola (1999), discorre sobre o tema correlação e regressão descrevendo que o diagrama de dispersão é o instrumento auxiliar nas análises e este constitui-se de um gráfico

de dados emparelhados (x,y) , com o eixo x horizontal e o eixo y vertical, e que para medir-se o grau de relacionamento linear entre os valores emparelhados (x,y) em uma amostra, utiliza-se o coeficiente de correlação linear r , onde este também às vezes chamado de coeficiente de correlação momento-produto de Pearson.

Milone (2006), classifica os valores dos coeficientes de correlação e são apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Classificação dos coeficientes de correlação.

Coeficiente de Correlação (R)	Classificação
$0,9 < R \leq 1,0$	Ótima
$0,8 < R \leq 0,9$	Boa
$0,7 < R \leq 0,8$	Razoável
$0,6 < R \leq 0,7$	Medíocre
$0,5 < R \leq 0,6$	Péssima
$R \leq 0,5$	Imprópria

Fonte: Milone, 2006.

3.2.3 Modelos probabilísticos em hidrologia

O conhecimento das freqüências com que uma certa variável hidrológica assumiu seus valores dentro de um certo intervalo de tempo, é obtido através do histograma de freqüências ou acumuladas da amostra de uma variável aleatória, onde o interesse do estudo estatístico é a projeção dos valores desta variável que ocorrerá no futuro (TUCCI, 2005). Por esta razão, o estudo das probabilidades permite que estas projeções sejam calculadas.

Tucci (2005), enuncia em sua literatura que embora não seja possível prever-se que vazões máximas anuais ocorrerão no futuro distante, pode-se afirmar que as freqüências de ocorrência do passado serão válidas para descrever as probabilidades, onde, a probabilidade refere-se os eventos não conhecidos e a freqüência a eventos observados.

Sendo assim, a análise estatística trabalha com freqüências, enquanto que a teoria das probabilidades com as probabilidades.

Mendiondo; Tucci e Goldenfum. (2003) discutem os aspectos quantitativos na simulação hidrológica, destacando como principais itens as incertezas entre as estatísticas da população e da amostra.

3.3 Séries Temporais

Dentro do estudo da estatística, as séries temporais referem-se a todo e qualquer agrupamento de dados absolutos ou relativos, discretos ou contínuos, ordenados ao longo de um intervalo de tempo, isto é, dispostos e ordenados cronologicamente (MILONE, 2006).

De um modo geral os dados relativos à hidrologia e ao controle hidráulico da série operacional da barragem do rio São Bento, são ordenados em intervalos de tempo que variam de meia a vinte e quatro horas.

Segundo Milone (2006), as hipóteses básicas do estudo das séries temporais são as seguintes:

- a) há um sistema causal relacionando as variáveis ao tempo;
- b) ao longo do tempo, o sistema influencia todos os dados sob análise, de modo uniforme e permanente;
- c) os dados históricos refletem a influência média de um conjunto de fatores.

Milone (2006), discorre em ainda que as previsões decorrentes do estudo das séries temporais, permitem atuar sobre o destino das variáveis em foco e reorientar o rumo daquelas tendentes a pontos indesejáveis.

3.4 Modelos hidrológicos

3.4.1 Generalidades

A modelagem é uma ferramenta que em geral constitui-se de um conjunto de equações, onde esta apresenta-se de forma simplificada de modo a representar o comportamento de um sistema físico mais complexo (MACHADO, 2005)

Milone (2006), define modelo como sendo a representação, em escala reduzida ou por meio de relações matemáticas, de um objeto, evento ou fenômeno. Neste caso, fenômenos hidrológicos podem ser perfeitamente representados através de modelos.

Goldbarg e Luna (2005), fazem uma abordagem sobre modelos citando que o processo de busca de uma visão bem estrutura da realidade é fundamentalmente um fenômeno de modelagem, onde definem que modelo é um veículo para uma visão bem estruturada da realidade, onde este pode ser visto com os devidos cuidados, de modo a tornar-se uma representação substitutiva da realidade.

A modelagem tem como objetivo avaliar de maneira coerente quais as possíveis respostas de um sistema a partir de certos estímulos, onde utiliza-se uma abordagem simplificada da estrutura e das transformações internas deste mesmo sistema como apresentado na figura 4 (MACHADO, 2005).



Figura 4. Fluxo de modelagem (adaptado de MACHADO, 2005).

No campo de atuação da hidrologia, Tucci (2005), conceitua modelo como sendo a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas.

Tucci (2005), cita que modelo hidrológico apresenta-se como uma das ferramentas que a ciência desenvolveu, para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. A simulação hidrológica limita-se pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização, das prioridades da representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados.

3.4.2 Modelos precipitação - vazão

Os modelos *precipitação-vazão* representam a parte do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão (TUCCI, 2005). Estes modelos descrevem a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, depressão do solo, o fluxo através do solo pela infiltração, percolação e água subterrânea, escoamento superficial, sub-superficial e no rio.

Em se tratando dos modelos de precipitação-vazão, Tucci (2005) descreve que estes modelos são baseados nos seguintes elementos:

- a) Discretização da bacia hidrográfica (concentrado, distribuído por sub-bacia e distribuído por módulos);
- b) Variáveis temporais de entrada (precipitação, evapotranspiração e vazão);
- c) Estrutura básica da integração dos processos (bacia e canal);
- d) Aquisição dos dados físicos das bacias;
- e) Determinação dos parâmetros (drenagem, declividade, orientação, chuva, solo, cobertura e altitude).

Ramos et al (1989), descreve que dentre os modelos lineares de transformação de chuva efetiva em vazão superficial, destacam-se os métodos relativos ao hidrograma unitário.

3.4.3 Modelos de escoamento

Tucci (2005) classifica os modelos aplicados ao escoamento em:

- a) de armazenamento;
- b) de onda cinemática;
- c) de difusão;
- d) de hidrodinâmico.

Em modelos de armazenamento, aplicam-se a equação da continuidade concentrada e uma relação entre o armazenamento e a vazão de saída e entrada do trecho, para assim simular o escoamento no rio ou canal. Trata-se de um modelo simples e muito utilizado em hidrologia caracterizado pela simplicidade formulação e ao pelo pequeno volume de dados usados.

Os modelos de onda cinemática têm como equações básicas a equação da continuidade e a expressão simplificada da equação de quantidade de movimento. Ao utilizar-se este modelo, alguns critérios devem ser seguidos antes de aplicá-lo: comparação das celeridades, o índice k e análise da equação de Saint Vénant.

O modelo de difusão utiliza a equação da continuidade e a equação de quantidade de movimento, porém sem inércia.

Os modelos hidrodinâmicos utilizam as equações de escoamento e não desprezam nenhum termo da equação de quantidade de movimento. Estes modelos requerem soluções numéricas das equações diferenciais que necessitam maior quantidade de dados que os modelos anteriores.

3.4.4 Previsão e operação de reservatórios

Tucci (2005), apresenta neste tópico alguns elementos básicos do uso de previsão associada à operação simples de um reservatório, conforme sua finalidade. Para reservatórios de regularização de volume onde seus usos destinam-se ao abastecimento público e irrigação, o reservatório é utilizado para reter volumes e atender dentro do período de estiagem um determinado consumo. Neste caso aplica-se para sua operação a seguinte equação da continuidade do reservatório:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) - E(t)$$

Onde: S é o armazenamento, I(t) a vazão de entrada, Q(t) a vazão de saída e E(t) a evaporação.

Reservatórios de acumulação servem para reter o excesso de água dos períodos de grandes vazões, para posterior utilização em períodos de seca. Além de conservar a água para os usos diversos, o armazenamento das águas das cheias pode reduzir os prejuízos das inundações a jusante do reservatório (LINSLEY; FRANZINI, 1978).

A bacia hidrográfica do rio São Bento situa-se no sul do Estado de Santa Catarina, constituindo-se em uma sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Araranguá, que juntamente com as bacias dos rios Urussanga, Mampituba e Araranguá formam a Região Hidrográfica do Extremo Sul Catarinense – RH10 (Figura 6), região da qual pertence ao sistema integrado de drenagem da vertente Atlântica (SEDUMA, 1998).

Como as demais bacias da região hidrográfica do extremo sul, a bacia do rio São Bento tem suas nascentes localizadas junto à Serra Geral, tendo como formadores o rio da Serra e o rio da Mina. A respectiva bacia tem áreas inseridas junto aos municípios de Siderópolis e Nova Veneza.

O sistema hídrico desta bacia é constituído pelos rios da Serra, da Mina, Seco e Serrinha rios pelos localizam-se à montante do barramento principal da barragem do rio São Bento, e rio Guarapari e córrego Manique ambos localizados à jusante do respectivo aproveitamento. O sistema hídrico é representado através da figura 7.

Assim como os demais rios da bacia do rio Araranguá, o rio São Bento apresenta um perfil longitudinal bastante íngreme em seu curso superior, onde a topografia é muito acidentada, com altitudes da ordem de 1.000 a 1.400 metros junto à Serra Geral.

No curso inferior, onde corta planícies aluviais, os perfis longitudinais demonstram baixas declividades, caracterizando-se neste curso, como rio de planície, com altitudes baixando para aproximadamente 40 metros próximo à sua foz, na confluência com a margem direita do rio Mãe Luzia. A altitude na seção do barramento é de aproximadamente 120 metros (MING, 2007).

A bacia hidrográfica do rio São Bento possui uma área de drenagem total de 157,40 km², com este rio principal desenvolvendo-se por aproximadamente 35 km desde a nascente até sua foz no rio Mãe Luzia, onde sua configuração geral é representada através da figura 8.

Com a construção da barragem do rio São Bento, a respectiva bacia possui em sua porção montante ao barramento principal uma área de 113,79 km², e em sua porção jusante uma área de 43,61 km², conforme é apresentado na figura 8.

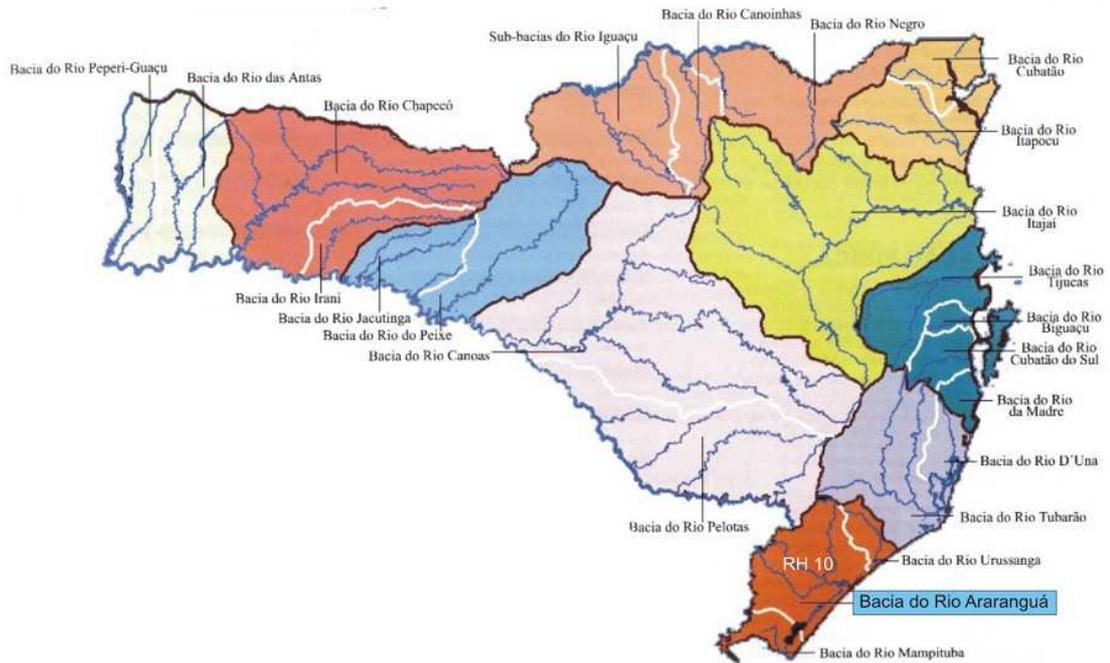


Figura 6. Bacias Hidrográficas do Estado de Santa Catarina.

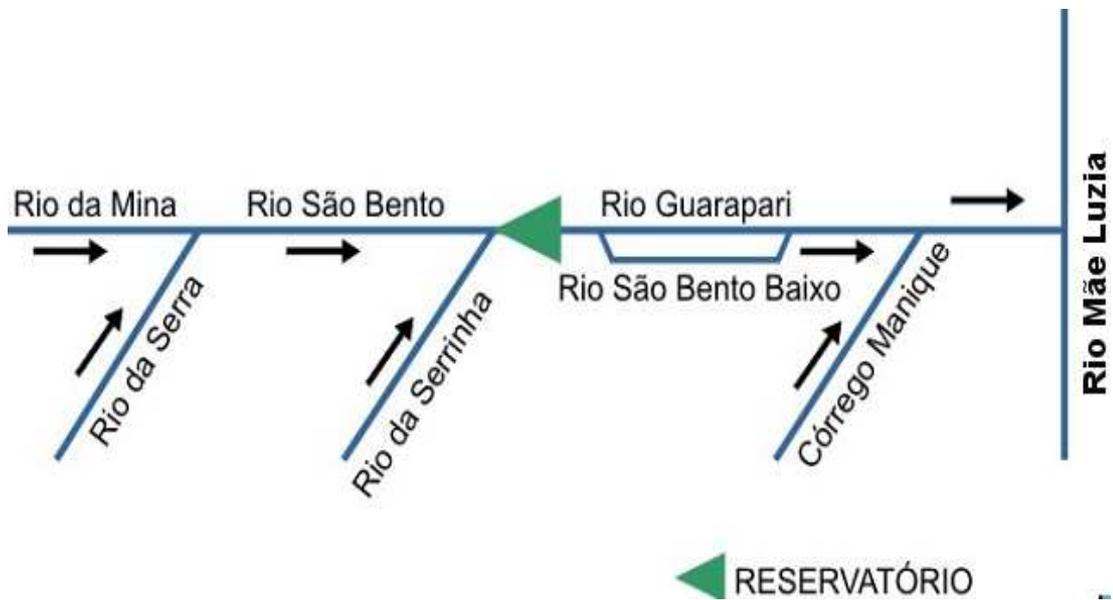


Figura 7. Quadro esquemático do sistema hídrico. Fonte: CASAN, 2003.

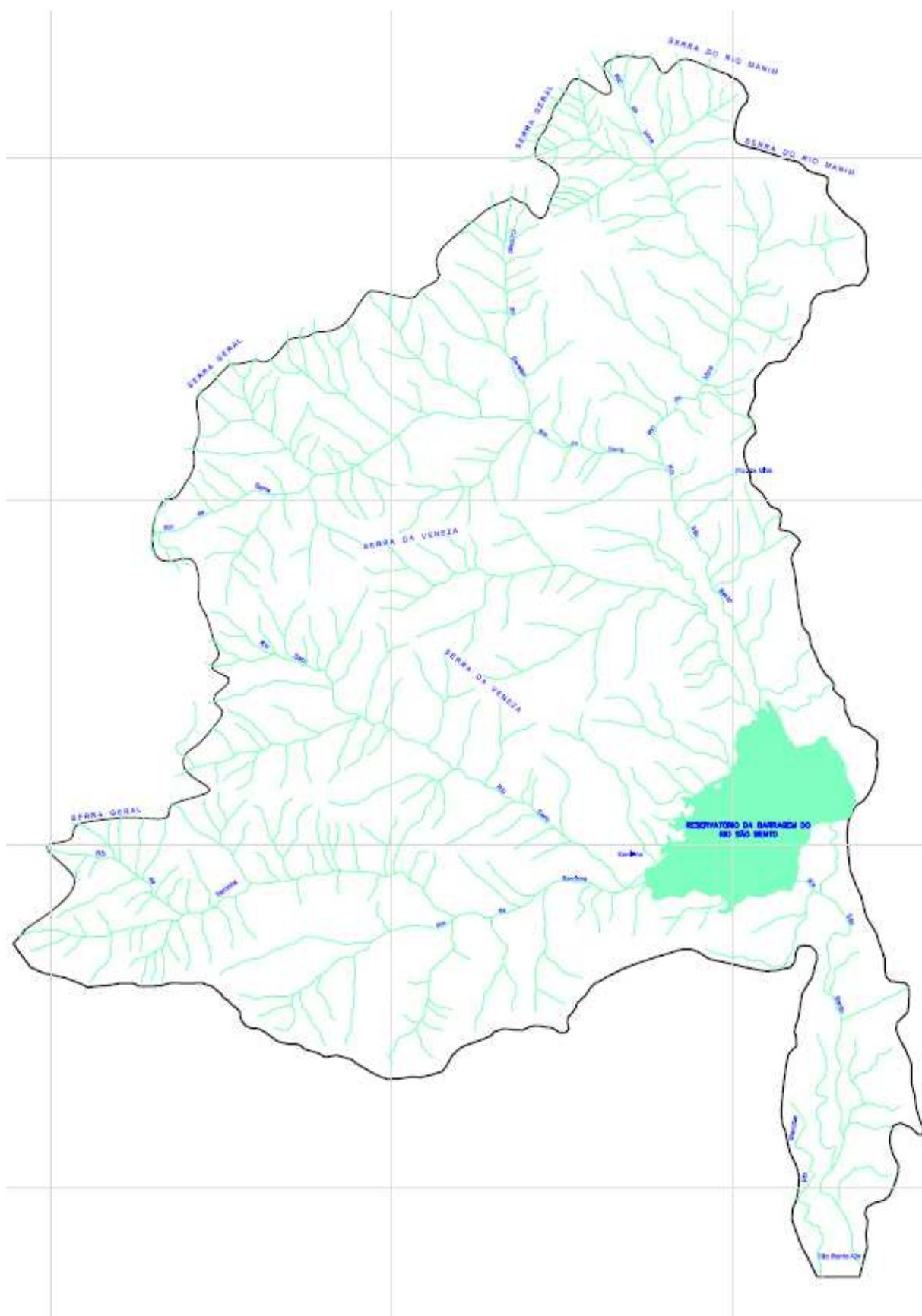


Figura 8. Localização do reservatório da barragem do rio São Bento.

A tabela 3 apresenta as áreas de ocupação das sub-bacias e o seu percentual de ocupação em relação à bacia hidrográfica do rio Araranguá.

Tabela 3. Áreas de drenagem das bacias e sub-bacias hidrográficas.

Bacia Hidrográfica	Área De Drenagem	Ocupação em relação à bacia do Araranguá (%)
Rio Araranguá	3.020 km ²	100
Rio Mãe Luzia	1.501 km ²	49,70
Rio São Bento	157,40 km ²	5,21
Rio São Bento a montante da barragem	113,79 km ²	3,77
Rio São Bento a jusante da barragem	43,61 km ²	1,44

Fonte: CASAN, 2004.

4.1.2 Climatologia

O clima da região do litoral sul do Estado de Santa Catarina é classificado, segundo a classificação de Köppen como clima Cfa, ou seja, clima subtropical (mesotérmico), sem estação seca definida, e com verões quentes (BETTES JÚNIOR, 2001).

Na região Sul do estado a temperatura média anual varia de 17,0 a 19,3 °C. A temperatura média das máximas varia de 23,4 a 25,9 °C, e das mínimas de 12,0 a 15,1°C . Podem ocorrer, em termos normais, de 0,3 a 11,0 geadas por ano. Os valores de horas de frio abaixo ou iguais a 7,2 °C são relativamente baixos (de 164 a 437 horas acumuladas por ano). A insolação total normal anual varia de 1.855 a 2.182 horas nesta sub-região (EPAGRI, 1999).

A umidade relativa expressa a relação entre a pressão de vapor e a pressão de saturação, diretamente dependente da temperatura. Em geral a umidade relativa média mensal são superiores a 80 %. De acordo com os dados de Urussanga, observa-se que a umidade apresenta valores mais altos no inverno e menores no verão, variando entre 79,1 % em dezembro a 87,5 em junho.

A velocidade media do vento varia entre 1,8 m/s a 2,6 m/s. Com relação a direção do vento observa-se o predomínio dos ventos SE (acima de 25 %), seguido por ventos NE. A

menor frequência observada é de ventos na direção W (menos de 2 %) seguido por ventos NW (BACK, 1999).

4.1.3 Pluviometria

O regime pluviométrico de Santa Catarina é caracterizado por ser distribuído ao longo do ano. Em geral, as chuvas estão associadas à passagem dos sistemas frontais que atingem as latitudes médias. A precipitação total anual no estado varia de 1220 mm a 2200 mm, sendo os valores mais altos observados no litoral norte do Estado e no Extremo oeste. A região do litoral sul do estado é caracterizada pelos menores valores de precipitação total anual, variando de 1220 a 1660 mm, com o total anual de dias de chuva entre 98 e 150 dias (EPAGRI, 1999). No geral a precipitação está bem distribuída durante o ano devido as características do relevo e à atuação das Massas de ar Polar Atlântica e da Massa Tropical Atlântica, que por sua constância fazem com que não ocorra uma estação seca (SANTA CATARINA, 1986).

Também observa-se uma acentuada variação na pluviometria dentro da região sul catarinense, em geral a pluviosidade é menor na planície litorânea e os maiores valores de pluviosidade são observados próximos a encosta (UGGIONE, 2006). Esta variação se explica parte pelo efeito da orografia na origem das chuvas (SANTA CATARINA, 2000). Quanto as características da precipitação, observa-se algumas diferenças sazonais. Os meses de dezembro a março são caracterizados por chuvas mais frequentes e de maior intensidade, e por outro lado nos meses de maio a setembro as chuvas em geral são de menor intensidade e menor frequência. A ocorrência de precipitações intensas no estado de Santa Catarina determina a ocorrência de cheias e inundações, principalmente no litoral do estado. Vários estudos foram realizados com o objetivo de determinar o riscos de chuvas intensas ou os valores de chuvas para dimensionamento de obras hidráulicas, destacando-se os trabalhos de Back (1995, 2000) e Nerilo; Medeiros; Cordeiro (2002).

Por não haver um posto com dados pluviométricos na bacia do rio São Bento na época dos estudos preliminares (1982/1983), foram selecionados os dados existentes no Posto Pluviométrico Meleiro, sendo este, considerado como o mais representativo da região em estudo por localizar-se na bacia do rio Manoel Alves, cujas condições topográficas são semelhantes as da bacia do rio São Bento.

Os dados deste posto já tinham sido utilizados na fase de estudos preliminares (1982/1983), com série histórica de precipitações do período de 1942 a 1981, sendo estendida à série dos totais mensais precipitados com dados de 1982 a 1992. Os valores de precipitação obtidos do Posto Pluviométrico Meleiro são apresentados na tabela 4.

Tabela 4. Precipitações de médias mensais (mm) na estação Meleiro (1942 a 1992).

	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Totais
Média	169,3	179,8	167,1	101,9	78,9	86,3	92,3	112,8	137,2	121,6	114,2	129,7	1491,1
Máxima	392,3	556,8	454,3	238,8	323,8	184,3	392,8	389,3	364,1	279,4	279,4	359,4	2119
Mínima	18,8	20,7	37,3	11,4	3,5	6,6	10,5	0	46,5	17,1	25,3	0,5	722,1

Fonte: CASAN, 1995.

O planejamento das observações a serem efetuadas em uma bacia hidrológica depende dos objetivos da pesquisa e das condições naturais da região. Os programas de monitoramento de bacias similares, localizadas em regiões hidrológicas semelhantes, podem diferir enormemente, não apenas em função dos objetivos dos estudos, mas também em função da disponibilidade de recursos financeiros e de pessoal especializado (GOLDEFUM, 2003).

4.1.4 Fluviometria

Por não existirem postos fluviométricos com período de observação adequados e curva chave determinada na bacia do rio São Bento durante a fase de estudos preliminares (1982/1983), as vazões afluentes à seção do barramento foram estimadas a partir da análise de dados e informações disponíveis em postos fluviométricos localizados em outras bacias, também pertencentes à bacia do rio Araranguá.

O Posto Forquilha, localizado no Rio Mãe Luzia, a jusante da confluência do Rio São Bento, com série histórica de vazões de 1942 a 1966 e de 1976 a 1981, estendida de 1982 a 1992, foi escolhido para fundamentar a análise.

A análise efetuada no referido posto, em termos de vazões médias, máximas e mínimas específicas, considerou o período comum de observações do posto entre 1977 a 1992.

Para obtenção da série histórica de vazões afluentes à seção do barramento principal, considerou-se que o único posto fluviométrico localizado no rio São Bento não apresentava dados adequados para utilização à época dos estudos.

A série de vazões afluentes ao reservatório da barragem do rio São Bento, foi obtida da transposição de vazões do Posto Forquilha, sendo a mesma apresentada através da tabela 5.

Tabela 5. Vazões mensais no local do barramento.

	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Média	3,49	4,91	4,60	2,92	2,21	1,80	2,17	2,47	3,10	2,35	2,97	3,58	3,12
Máxima	11,49	19,27	15,14	11,64	10,29	6,07	14,90	10,61	8,47	11,98	12,05	23,15	12,92
Mínima	0,23	1,03	1,00	0,45	0,23	0,13	0,23	0,13	0,63	0,43	0,48	0,32	0,44

Fonte: CASAN, 1995.

De acordo com o quadro apresentado no Projeto Básico da barragem do rio São Bento, suas vazões máximas ocorrem no período de outubro a março, com as vazões mínimas ocorrendo no período de abril a agosto, sendo obtidos os seguintes valores de vazões afluentes à seção do barramento:

Vazão mínima mensal: 0,13 m³/s;

Vazão máxima mensal: 23,15 m³/s;

Vazão média de longo termo: 3,12m³/s;

4.1.5 Geologia e geomorfologia

A bacia hidrográfica do rio São Bento é formada por rochas sedimentares, com a ocorrência de argilitos e predominância de siltitos (CASAN, 2004). Há também a presença de rochas ígneas representadas por basaltos e diabásio e depósitos de sedimentos recentes (cascalho aluvionar).

O mapeamento geológico de superfície efetuado para as áreas dos três barramentos da barragem do rio São Bento, sendo estes, a barragem principal, o dique principal e o dique secundário, permite visualizar a compartimentação do substrato rochoso, representado pelas seguintes litologias:

- a) rochas sedimentares, com a ocorrência de argilitos e predominância de siltitos;
- b) rochas ígneas representadas por basaltos e diabásios;
- c) depósitos de sedimentos recentes (cascalho aluvionar).

A região do aproveitamento, localizada nas proximidades dos últimos contra-fortes da Serra Geral, situa-se numa zona de transição entre a escarpa e a planície litorânea.

A atuação da erosão regressiva da escarpa sobre o planalto ocasionou a completa remoção da cobertura basáltica e grande parte da seqüência sedimentar da bacia do Paraná, deixando exposta quase que a totalidade dessas rochas.

Simões e Coiado (2003) descrevem os diversos processos de erosão natural e erosão acelerada em bacias hidrográficas, e discutem os fatores que controlam a erosão. Paiva (2003) apresenta diversos métodos de cálculo do transporte de sedimentos em rios.

O conhecimento da quantidade de sedimentos transportados pelos rios é de fundamental importância para o planejamento e aproveitamento dos recursos hídricos de uma região, uma vez que os danos causados pelos sedimentos dependem da quantidade e da natureza dos sedimentos, as quais por sua vez dependem dos processos de erosão transporte e deposição de sedimentos. Dentre os problemas causados pelos sedimentos transportados pelos rios, pode-se destacar:

- a) assoreamento de rios diminuindo a sua navegabilidade e aumentando a dimensão das enchentes;
- b) assoreamento dos reservatórios, diminuindo sua vida útil ou provocando a necessidade de dragagens periódicas de alto custo;
- c) inviabilidade de aproveitamento do rio para abastecimento dependendo da quantidade de sedimentos transportados, baseados na concentração de sedimentos e na vazão do rio.

Para o cálculo dos sedimentos por arraste são ainda necessárias informações como diâmetro dos sedimentos de fundo, velocidade de escoamento, raio hidráulico do rio, viscosidade cinemática da mistura água e sedimentos, declividade da linha de energia, etc. Para a aplicação destes métodos é necessário um estudo detalhado da hidráulica fluvial e das características geomorfológicas do rio (PAIVA, 2003).

Paiva (2003) afirma que os processos de erosão e sedimentos numa bacia hidrográfica podem trazer muitos problemas. Existem vários modelos que podem ser aplicados com o objetivo de planejamento e controle de erosão, planejamento e controle de recursos hídricos ou ainda de modelagem da qualidade da água. Destacam-se os modelos da fórmula universal de perdas de solo (MUSLE), o modelo IPH2-SED.

Sob o ponto de vista geomorfológico, as principais características da área em estudo são:

- a) existência de escarpamentos íngremes, de relativa juventude;

- b) afloramentos de “sill” de diabásio, sobre o qual foram locados os eixos barráveis;
- c) deposição de mantos de solos aluviais, onde predominam os seixos rolados de tamanhos variados, nas planícies de inundação dos cursos d’água que descem do planalto;
- d) formação de solos residuais e mantos de colúvio juntos às encostas e sopé das elevações, devido à acentuadas divergências da topografia, associadas à ação intempérica.

A região a montante do barramento situa-se no início dos contrafortes da Serra Geral, que assume a forma de grandes escarpas basálticas cortadas por vales profundos, com ombreiras extremamente íngremes em forma de “V”. É uma situação de drenagem jovem, com corredeiras e trechos de alta declividade, havendo um desnível de 1280 metros entre a parte mais elevada da bacia de contribuição e o local da barragem.

A jusante da barragem, inicia-se uma planície aluvial com características de formação em ambiente lacustre, uma situação muito comum no litoral catarinense e no norte do litoral riograndense.

Estas regiões, que se caracterizam por ser extremamente planas e com uma drenagem incipiente, foram formadas durante o final da última glaciação, há cerca de 10.000 anos. As condições climáticas de alternância de secas com chuvas torrenciais naquele período, juntamente com o rebaixamento do nível do mar, ocasionou a formação da camada de seixos rolados e polidos, existente tanto a montante como a jusante da barragem do rio São Bento.

Em alguns locais pode ser visualizadas nas barrancas do rio, espessuras de até 3 metros desta camada.

Os seixos são constituídos por rocha basáltica e, em menor proporção, de arenitos silicificados. Devido à forma de deposição, as camadas podem ter profundidades e extensões laterais bastante variáveis, o que foi comprovado através de informações de moradores locais a respeito de poços. As formações de seixos, principalmente no local do barramento, repousam diretamente sobre rocha basáltica alterada (saprolito), onde são comuns blocos e matacões de basalto alterado com formas angulares em meio à argila originada da decomposição da rocha. A camada de cascalho foi observada até a localidade de Forquilha, cerca de 8 quilômetros a jusante do barramento principal.

É importante salientar que as observações locais demonstraram a ausência de deposição de seixos e cascalhos pelo rio São Bento, mesmo por ocasião de cheias maiores, significando que a drenagem a montante do barramento já se encontra em valores permanentes e com pouca contribuição de materiais rochosos (MING, 2007).

Embora Ming (2007) e Casan/Magna (1995) afirmem a ausência de deposição de seixos e cascalhos no rio São Bento, verifica-se a existência de grande quantidade de seixos depositados em seu leito, onde denotadamente observa-se que em ocasiões de cheias a deposição evidencia-se à medida que as vazões se processam em todo percurso do rio.

As informações de moradores locais evidenciam que o rio São Bento transporta pouco sedimento em suspensão, a não ser em épocas de cheias de maior porte. Neste caso, a carga de sedimentos do rio é originada de roças e várzeas cultivadas, cujo solo é facilmente removível. Aparentemente, não há também, contribuição de sedimentos transportados a partir da bacia de contribuição, que se encontra ainda com floresta densas (CASAN, 2004).

A tabela 6 apresenta as diferentes fases de relevo identificadas na bacia.

Tabela 6. Caracterização das diferentes classes hipsométricas identificadas na região do aproveitamento.

Altitude (m)	Área (ha)	Área (%)
<200	1.456,5	12,21
200-400	2.083,2	17,46
400-600	2.409,3	20,20
600-800	2.590,2	21,72
800-1.000	1.787,3	14,98
>1.000	1.139,4	9,56
Reservatório	462,1	3,87
Total	119.298,3	100,00

Fonte: CASAN, 2004.

4.1.6 Cobertura vegetal

A cobertura vegetal nativa da Região Hidrográfica do Extremo Sul Catarinense, onde está inserida a bacia do rio São Bento, era, quase na totalidade, representada pela Floresta Ombrófila Densa.

A exemplo de outras bacias, esta região, em face da grande atividade agrícola e do intenso processo de retirada da madeira de qualidade, apresenta hoje um panorama fitoecológico bastante alterada, estando entre aquelas que apresentam a menor cobertura florestal do Estado (CASAN, 2003).

Em função disso, a mata nativa primária praticamente inexistente, ocorrendo quase que somente vegetação secundária. É intensa também a utilização das áreas de desmatamento com o cultivo de culturas cíclicas, predominando neste caso, as lavouras de arroz, feijão, fumo, mandioca e milho.

As poucas exceções remanescentes da floresta nativa estão localizadas a oeste da região, nas partes altas, correspondendo às escarpas do basalto, onde ainda se encontram espécies pertencente à Floresta Ombrófila Densa Montana e Submontana.

Na região da bacia do rio São Bento, a vegetação apresenta-se sob a forma predominante de matas e floresta na área de montante à Barragem, com algumas áreas com vegetação de porte baixo e culturas temporárias.

A jusante da barragem do rio São Bento, predominam as áreas com culturas temporárias, como plantações de milho e arroz, destacando-se também, manchas isoladas de mata e vegetações de porte médio.

4.2 A Barragem do rio São Bento

4.2.1 Generalidades

A presente pesquisa tem como unidade de estudo a barragem do rio São Bento, empreendimento pelo qual encontra-se inserido junto a bacia hidrográfica do rio de mesmo nome na região sul do estado de Santa Catarina.

A barragem do rio São Bento localiza-se logo após a confluência do rio Serrinha com o rio São Bento, possui uma área de drenagem a montante do seu barramento principal de 113,79 km², e a jusante a este até sua foz no rio Mãe Luzia a área de 43,61 km², valores estes revisados na ocasião da elaboração do Manual de Operação do Reservatório (CASAN, 2004).

Com a construção da barragem a área de drenagem de montante passou a ter como áreas de contribuição até a seção da barragem da sub-bacia do rio Serrinha e a sub-bacia do rio São Bento, esta última contribuindo com 60% do total da bacia de montante (MING, 2007).

A jusante, na sua área de drenagem, o rio São Bento recebe uma importante contribuição em sua margem esquerda, o rio Guarapari, com uma significativa área de drenagem de 12,76 km², que representa aproximadamente 30% da bacia de jusante (MING, 2007).

A implantação da barragem do rio São Bento teve como finalidade principal o abastecimento público de água de uma região densamente povoada, onde se destacam os

seguintes municípios: Criciúma, Siderópolis, Morro da Fumaça, Forquilha, Treviso, Içara, Nova Veneza, Maracajá, além da irrigação de áreas cultivadas a jusante do aproveitamento e a manutenção da vazão ecológica.

Tem-se como benefícios adicionais do aproveitamento, a laminação de cheias no reservatório formado pelos barramentos, a proteção das florestas integrantes das escarpas da Serra Geral, além de outras vantagens ligadas à formação do lago artificial, visto que trata-se de uma obra de engenharia incorporada à beleza local, promovendo desta forma o incremento do turismo na localidade de São Pedro no município de Siderópolis.

Em vista destes benefícios, a barragem do rio São Bento caracteriza-se como um aproveitamento de usos múltiplos, objetivando a garantia de vazão regularizada que atenda as seguintes demandas:

- a) abastecimento urbano;
- b) irrigação de áreas cultivadas a jusante (rizicultura);
- c) manutenção da vazão ecológica a jusante; e
- d) controle de cheias.

A figura 9 apresenta o mapa com a caracterização da área do reservatório formado pela barragem do rio São Bento.

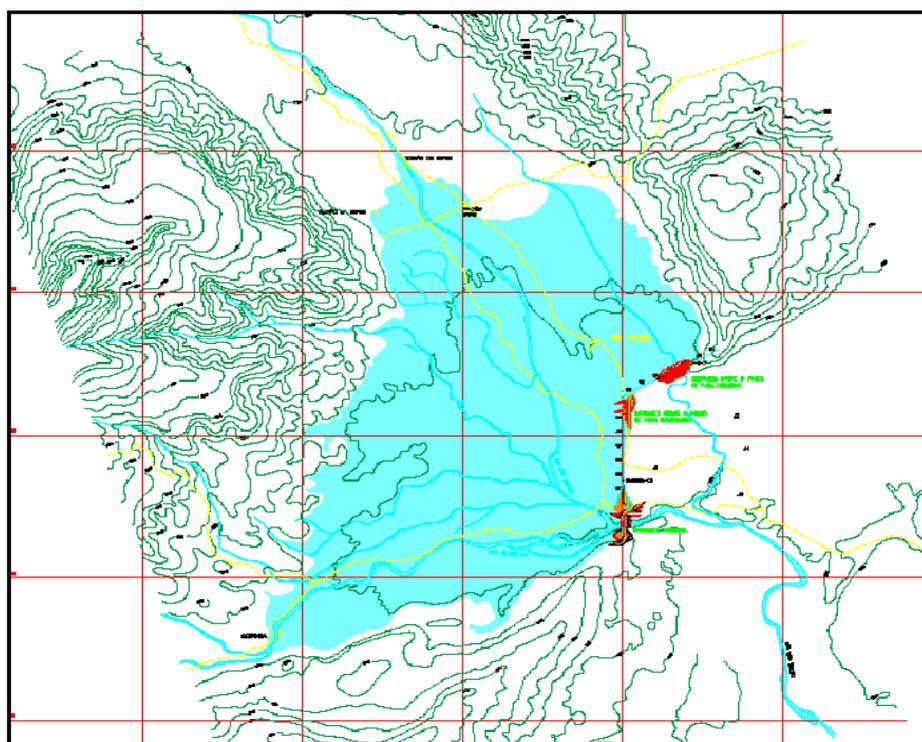


Figura 9. Mapa da Área do Reservatório da barragem do rio São Bento. Fonte: CASAN, 2003.

A barragem do rio São Bento tem como proprietária a Companhia Catarinense de Águas e Saneamento – CASAN, empresa esta constituída de capital misto, tendo o Governo do Estado de Santa Catarina como seu sócio majoritário.

Seu enchimento iniciou-se no ano de 2003, completando-se no mês de maio do ano de 2004, mês pelo qual ocorreu o primeiro vertimento, tendo-se a partir de agosto do mesmo ano o início de sua efetiva operação, processando-se desde o final de sua construção, uma operação estritamente técnica efetuada por equipe de servidores do quadro efetivo da CASAN.

O aproveitamento é localizado após a confluência do rio Serrinha com o rio São Bento, possui uma área de drenagem à montante de 113,79 km². A jusante, uma área de 43,61 km², onde compõe a bacia até a foz.

A figura 10 apresenta a vista panorâmica do empreendimento, onde destaca-se o lago formado pelo reservatório, bem como as áreas de rizicultura localizadas na porção jusante ao barramento principal.



Figura 10. Vista panorâmica da barragem do rio São Bento. Fonte: CASAN, 2006.

Considera-se no escopo deste estudo, que as estruturas que promovem o represamento das águas do reservatório da barragem do rio São Bento incorporam-se como elementos hidráulicos de contenção.

Contudo, apesar de serem considerados elementos hidráulicos, estes não exercem função de controladores de descargas defluentes, e sim de estruturas estáticas de contenção das águas do reservatório, estruturas pelas quais serão caracterizadas neste tópico da pesquisa.

O sistema de contenção das águas do reservatório é composto por três barramentos, sendo eles a barragem principal e os diques principal e secundário, perfazendo uma extensão total de 984 metros.

A figura 11 representa o posicionamento das estruturas de contenção das águas do reservatório da barragem do rio São Bento.



Figura 11. Estruturas de contenção das águas do reservatório. Fonte: CASAN, 2006.

4.2.2 Barragem principal

A barragem principal está localizada na área de drenagem da bacia do rio São Bento, estando implantada sobre o leito deste mesmo rio, imediatamente após a sua confluência com o rio Serrinha (CASAN, 2004).

Na área de locação do aproveitamento, a cota do leito natural do rio encontra-se localizada na elevação de 121,50 metros.

A estrutura da barragem principal é do tipo mista, sendo a estrutura central constituída de concreto, e as barragens laterais ou de encontro denominadas ombreiras são

constituídas de núcleo de argila com espaldares em cascalho ou enrocamento. A barragem de concreto é do tipo gravidade, em concreto compactado com rolo (CCR) e a de enrocamento, do tipo zoneada com núcleo impermeável de argila compactada e espaldares em cascalho.

A barragem de concreto possui cota de coroamento na elevação 159,50 metros e as ombreiras na elevação 160,00 metros. A altura máxima da estrutura sobre a fundação é de 49 metros e sobre o leito natural do rio São Bento de 38 metros.

O comprimento da crista da barragem de concreto é da ordem de 240 metros e o das barragens de enrocamento da ordem de 236 metros, sendo destes, 128 metros o comprimento da margem esquerda e 108 metros o comprimento da margem direita, totalizando 476 metros de comprimento total da estrutura deste barramento.

Na barragem de concreto localizam-se todos os elementos de controle de descargas defluentes da barragem do rio São Bento, sendo eles a tomada d água com suas comportas que encaminham águas para a adutora e válvula dispersora, os descarregadores de fundo, bem como o vertedouro que localiza-se em sua parte central.

A figura 12 representa a barragem principal sobre o leito natural do rio São Bento, barragem pela qual representa a estrutura principal no contexto da obra e comumente tratada nesta pesquisa como o barramento principal.



Figura 12. Vista panorâmica do barramento principal do empreendimento. Fonte: CASAN, 2006.

4.2.3 Dique principal

O dique principal foi implantado sobre um ponto de fuga à margem esquerda do rio São Bento. O maciço sobre o ponto de fuga principal é do tipo zoneado, com núcleo de argila compactada e espaldares em cascalho. O comprimento da crista é de 258 metros. A altura máxima sobre a fundação na parte central é da ordem de 25 metros e a cota de coroamento se encontra na elevação 160 metros.

Sua inclinação é de 1 (V): 1,7 (H) a montante e 1 (V): 1,6 (H) a jusante.

A figura 13 mostra a estrutura que constitui o dique principal.



Figura 13. Dique principal da barragem do rio São Bento. Fonte: CASAN, 2006.

4.2.4 Dique secundário

O dique secundário foi implantado sobre um ponto de fuga à margem esquerda do rio São Bento, com localização entre a barragem principal e o dique principal.

O maciço sobre o ponto de fuga secundário também é do tipo zoneado, com núcleo de argila compactada e espaldares em cascalho.

O comprimento da crista é de 250 metros. A altura máxima sobre a fundação na parte central é da ordem de 20 metros e a cota de coroamento se encontra na elevação 160 metros.

Sua inclinação é de 1 (V): 1,7 (H) a montante e 1 (V): 1,6 (H) a jusante.

A figura 14 representa a estrutura que constitui o dique secundário da barragem do rio São Bento.



Figura 14. Dique secundário da barragem do rio São Bento. Fonte: CASAN, 2006.

4.2.5 Vertedouro

O vertedouro está localizado exatamente ao centro da estrutura da barragem principal, incorporado junto à barragem de Concreto Compactado a Rolo – CCR. Constitui-se como o elemento hidráulico que tem a função de efetuar a liberação das águas do volume excedente do reservatório, evento pelo qual ocorre através dos vertimentos em ocasiões de chuvas com grandes volumes. Caracteriza-se como tipo “soleira livre”, frontal, conformado a um perfil Creager, com calha de descarga em degraus. Seu comprimento total é de 105 metros e a cota da soleira se encontra da elevação 157,50 metros, a 36 metros de altura do leito natural do rio. O nível mínimo de vertimento, ou seja, correspondente à cota da soleira do vertedouro, se encontra na elevação 157,50 metros. O nível máximo maximorum está a 2 metros acima, na elevação 159,50 metros, correspondente à cota de coroamento da barragem de concreto. A descarga do vertedouro tem sua energia dissipada através de degraus no próprio corpo da estrutura e através da bacia de dissipação. Sua capacidade máxima de descarga está dimensionada para o valor de $729 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondendo ao Nível Máximo

Maximorum do reservatório. O vertedouro da barragem do rio São Bento e apresentado através da figura 15.



Figura 15. Vista do vertedouro da barragem do Rio São Bento. Fonte: CASAN, 2006.

A figura 16 representa a curva das vazões do vertedouro da barragem do rio São Bento, onde os respectivos valores são demonstrados através da tabela 7, figura e tabela obtidos do Manual de Operação do Reservatório utilizado no processo operacional daquela unidade, cuja relação esta diretamente associado aos valores das cotas do reservatório.

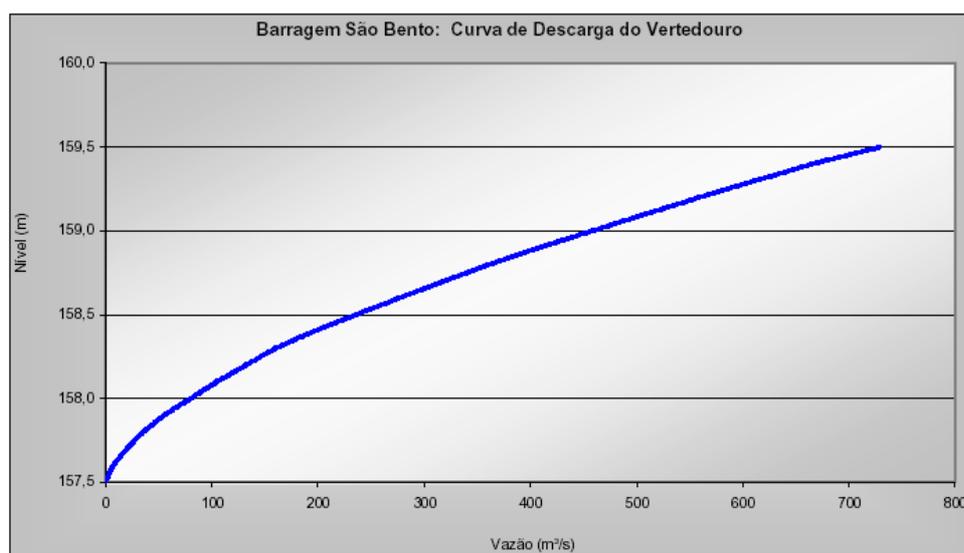


Figura 16. Curva de vazões do vertedouro. Fonte: CASAN, 2003.

Tabela 7. Vazões do vertedouro relacionadas com os níveis do reservatório.

NA	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
157,50	0,00	0,70	1,40	2,10	2,80	3,50	4,20	4,90	5,60	6,30
157,60	7,00	8,30	9,60	10,90	12,20	13,50	14,80	16,10	17,40	18,70
157,70	20,00	21,50	23,00	24,50	26,00	27,50	29,00	30,50	32,00	33,50
157,80	35,00	37,00	39,00	41,00	43,00	45,00	47,00	49,00	51,00	53,00
157,90	55,00	57,50	60,00	62,50	65,00	67,50	70,00	72,50	75,00	77,50
158,00	80,00	82,50	85,00	87,50	90,00	92,50	95,00	97,50	100,00	102,50
158,10	105,00	107,75	110,50	113,25	116,00	118,75	121,50	124,25	127,00	129,75
158,20	132,50	135,25	138,00	140,75	143,50	146,25	149,00	151,75	154,50	157,25
158,30	160,00	163,55	167,10	170,65	174,20	177,75	181,30	184,85	188,40	191,95
158,40	195,50	199,50	203,50	207,50	211,50	215,50	219,50	223,50	227,50	231,50
158,50	235,50	239,60	243,70	247,80	251,90	256,00	260,10	264,20	268,30	272,40
158,60	276,50	280,70	284,90	289,10	293,30	297,50	301,70	305,90	310,10	314,30
158,70	318,50	322,75	327,00	331,25	335,50	339,75	344,00	348,25	352,50	356,75
158,80	361,00	365,70	370,40	375,10	379,80	384,50	389,20	393,90	398,60	403,30
158,90	408,00	413,00	418,00	423,00	428,00	433,00	438,00	443,00	448,00	453,00
159,00	458,00	463,00	468,00	473,00	478,00	483,00	488,00	493,00	498,00	503,00
159,10	508,00	513,10	518,20	523,30	528,40	533,50	538,60	543,70	548,80	553,90
159,20	559,00	564,30	569,60	574,90	580,20	585,50	590,80	596,10	601,40	606,70
159,30	612,00	617,40	622,80	628,20	633,60	639,00	644,40	649,80	655,20	660,60
159,40	666,00	672,30	678,60	684,90	691,20	697,50	703,80	710,10	716,40	722,70
159,50	729,00									

Fonte: CASAN, 2003.

4.2.6 Reservatório

Genovez (2003) apresenta diversos métodos que podem ser utilizados para se determinar o volume de armazenamento para reservatórios com regularização anual. O volume de armazenamento útil de um reservatório é o volume de água armazenada entre os níveis mínimo e o normal. O nível normal dos reservatórios é a cota máxima até a qual as águas se elevarão nas condições normais de operação, sendo que na maioria dos reservatórios esse nível é determinado pela cota da crista do extravasor ou pela borda superior das comportas dos vertedouros. Acima do nível normal pode ser deixado um volume de amortecimento de enchentes, que como o próprio nome sugere, é deixado, para minimizar os efeitos das enchentes nas áreas a jusante e par que ocorra uma diminuição da largura do vertedouro. O nível mínimo do reservatório é a cota mínima até a qual as águas baixam nas condições normais de operação. Esse nível pode ser determinado pela cota da parte inferior do

conduto de saída mais baixo da barragem, ou em casos de reservatórios de hidrelétricas, pelas condições operacionais de melhor rendimento para as turbinas. O volume de água abaixo do nível mínimo é denominado de volume morto e confundido com sendo um volume deixado para ser ocupado com sedimentos dentro do reservatório (GENOVEZ, 2003).

O nível máximo normal ou operacional do reservatório da barragem do rio São Bento corresponde à cota da soleira do vertedouro que se encontra na elevação 157,50 metros, equivalendo a uma área inundada de 4,5 km² para um volume acumulado de 58,5 hm³.

O nível mínimo operativo, situado ao nível da soleira da quarta abertura de captação da torre da tomada d'água, encontra-se na elevação 137,50 metros, com um volume correspondente de aproximadamente 5 hm³, sendo o volume útil acumulado de 53,5 hm³.

No nível máximo maximorum, equivalente à elevação 159,50 metros, o volume total do reservatório é de aproximadamente 68,1 hm³.

No nível da soleira da quinta abertura de captação da torre de tomada d'água, ou seja, na elevação 132,50 metros, a captação torna-se nula, sendo o volume acumulado em torno de 1,3 hm³.

4.2.7 Descarregadores de fundo

A barragem do rio São Bento encontra-se equipada com o sistema de descarga de fundo composta por 3 tubulações, sendo a primeira com diâmetro de 1000 mm, a segunda com 800 mm e a terceira de 400 mm.

As tubulações de 1000 e 800 mm atravessam horizontalmente o maciço de concreto da barragem desde o paramento de montante até a face frontal, paralelamente entre si e equidistantemente à tubulação adutora principal de 1500 mm, porém em cota inferior.

As duas galerias do túnel de desvio, com comprimento de 32 metros e seção transversal de 3,0 m x 4,0 m (b x h) cada, serviram de passagem para a implantação destas duas tubulações.

A tubulação de 1000 mm utiliza a galeria da esquerda para passagem e, a de 800 mm a da direita.

A tubulação de 400 mm atravessa o maciço da barragem paralelamente e externamente à direita das galerias do túnel de desvio.

A descarga de fundo é realizada através das duas tubulações de maior diâmetro, 1000 e 800 mm, onde as quais captam a água junto à face de montante da estrutura da torre de tomada d'água, sendo o nível mínimo de captação a elevação de 127,95 metros. A água captada, após passar por grades inclinadas, segue verticalmente através de dois funis, com abertura de 2000 mm cada.

Estas tubulações foram projetadas inicialmente para atender as demandas de descarga ecológica e demandas de captação de água da CASAN localizadas em áreas cultivadas a jusante do barramento principal.

A figura 17 mostra os descarregadores de fundo localizados junto à galeria de desvio da barragem principal. Na figura 18 apresenta-se as curvas respectivas aos descarregadores de fundo de 400, 800 e 1000 mm.



Figura 17. Descarregadores de fundo de 1000 (A) e 800 mm (B). Fonte: CASAN, 2006.

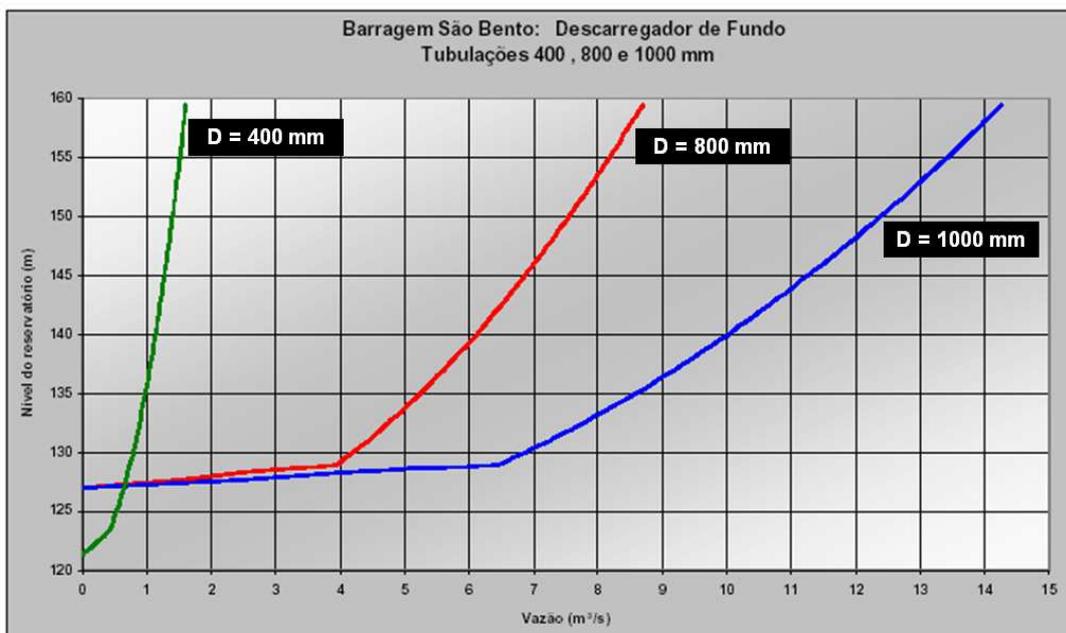


Figura 18. Curvas de vazões dos descarregadores de fundo. Fonte: CASAN, 2003.

4.2.8 Válvula dispersora

A válvula dispersora também denominada de válvula *Howel Bunger*, é um acessório de descarga instalado junto às estruturas da casa de comando inferior da barragem do rio São Bento, tendo papel fundamental no controle das vazões defluentes, dado a sua funcionalidade e fácil operabilidade.

Seu acionamento se dá através de dispositivos eletromecânicos, onde os quais promovem o deslocamento do êmbolo situado externamente à válvula, de modo que o fluxo de água em contato com uma peça cônica fixa localizada frontalmente à válvula, promove a dispersão do fluxo d'água.

Em razão da grande carga hidrostática atuante sobre os acessórios de descarga (entorno de 38 mca), a válvula dispersora é confeccionada com o intuito de dissipar las pressões promovidas pela dinâmica do escoamento, onde conjuntamente com a dispersão da água que passa por ela, também promove a elevação do oxigênio dissolvido na água encaminhada para o rio São Bento na sua porção jusante ao reservatório.

A figura 19 mostra a válvula dispersora instalada junto à casa de comando inferior da barragem do rio São Bento.



Figura 19. Válvula dispersora. Fonte: CASAN, 2007.

A figura 20 apresenta a curva de descargas da válvula dispersora, conforme o deslocamento do êmbolo retrátil.

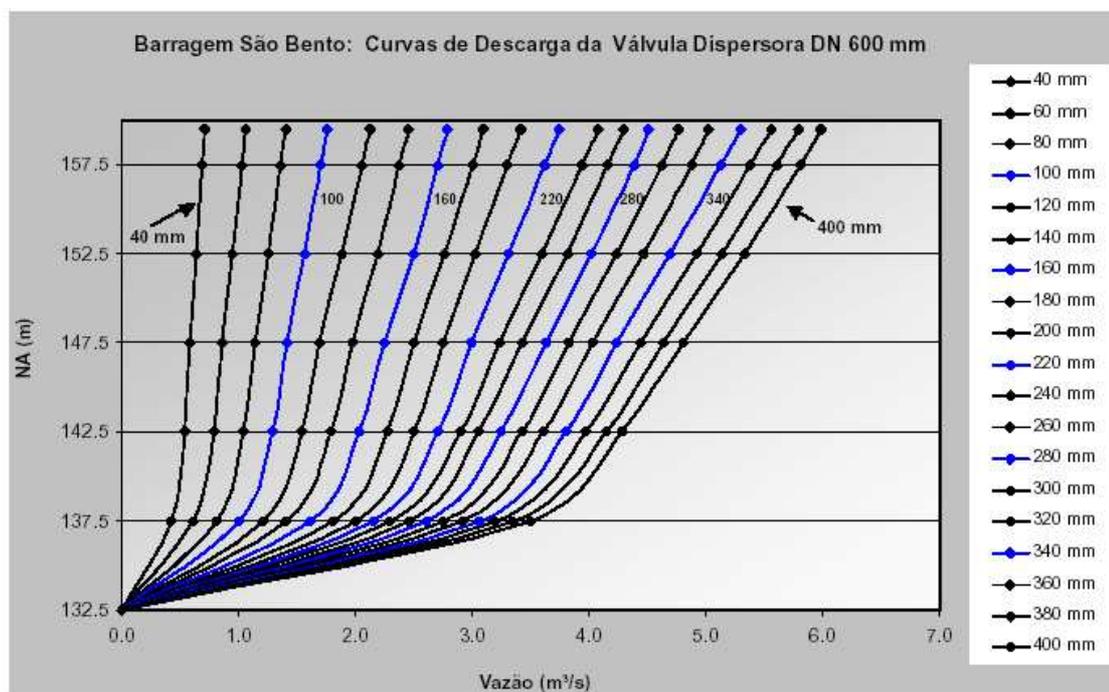


Figura 20. Curva de descargas da válvula dispersora.

4.2.9 Adutora

A adutora que encaminha as águas represadas pela barragem do rio São Bento para a ETA do bairro São Defende no município de Criciúma/SC, constitui o grande alimentador do sistema integrado de Criciúma, visto que atualmente este sistema abastece aproximadamente trezentos mil habitantes, com uma abrangência regional de cinco municípios, sendo eles Criciúma, Forquilha, Içara, Nova Veneza e Maracajá, encaminhando portanto, uma vazão média de 900 litros por segundo.

O encaminhamento da água bruta até a estação de tratamento de água localizado no bairro São Defende no município de Criciúma se dá por gravidade, visto que o desnível entre a barragem do rio São Bento com aquela unidade é de aproximadamente 70 metros, percorrendo uma extensão na ordem de 20 quilômetros, sendo a adução efetuada através de tubulações de aço-carbono com 1000 mm de diâmetro, ferro fundido de 600 mm e PVC reforçado com fibra de 600 mm. O esquema do sistema adutor da barragem do rio São Bento é representado através da figura 21



Figura 21. Esquema do sistema adutor da barragem do rio São Bento.

O *booster* do Picadão no contexto do sistema adutor da barragem do rio São Bento representa a unidade que futuramente poderá contribuir para o aumento das vazões de adução para o sistema integrado de Criciúma, visto que esta unidade atualmente encontra-se instalada, e que servirá para efetuar a pressurização da linha de adução quando do final do seu horizonte de projeto no ano de 2027.

A obtenção dos dados relativos às vazões de adução é elaborada através das leituras diretas junto ao macromedidor instalado nas dependências da casa de comando inferior localizada na barragem principal, onde as vazões instantâneas são registradas conforme a rotina operacional estabelecida.

A figura 22 mostra o *display* do macromedidor da adutora, onde através do qual são realizadas as leituras dos valores de vazão instantânea das águas aduzidas para o sistema integrado de Criciúma.



Figura 22. Macromedidor de vazões da adutora da barragem do rio São Bento.

A tabela 8 apresenta o quadro geral dos valores relativos a capacidade individual de descarga, bem como os percentuais em relação à descarga total que se pode produzir através dos acessórios instalados na barragem do rio São Bento.

Tabela 8. Capacidade máxima de vazão dos órgãos de descargas da barragem do rio São Bento.

Acessório	Descarga Máxima (m³/s)	Em relação à descarga total (%)
Adução	1,100	0,14
Válvula Dispersora	5,230	0,69
Desc de Fundo de 400 mm	1,607	0,21
Desc de Fundo de 800 mm	8,698	1,14
Desc de Fundo de 1000 mm	14,280	1,88
Vertedouro	729,00	95,93
Capacidade Total de Descarga	759,915	100,00

4.2.10 Demandas consideradas pelo projeto

A barragem do rio São Bento, caracterizada como uma obra de uso múltiplo, tem como objetivo garantir uma vazão regularizada que atenda com segurança as seguintes demandas:

- a) Abastecimento urbano;
- b) Irrigação de áreas cultivadas a jusante (cultivo de arroz);
- c) Manutenção da vazão ecológica a jusante.

Os estudos realizados para definição das demandas consideradas pelo projeto, realizados à época do Relatório Técnico Preliminar em 1982, foram descritos e analisados detalhadamente no Relatório Parcial de Revisão e Adequação dos Estudos Básicos de 1993, de onde reuniram-se os dados e informações acerca das demandas previstas.

4.2.10.1 Abastecimento urbano

Para a avaliação das demandas relativas ao abastecimento d'água às localidades beneficiadas pela implantação da barragem do rio São Bento, procedeu-se a análise do sistema de abastecimento existente anteriormente à sua implantação, bem como, a projeção do crescimento populacional e a estimativa das demandas futuras. O resultado dos estudos de

projeção e as demandas progressivas de projeto, encontram-se na tabela 9, onde a qual apresenta as estimativas de vazões para o abastecimento público.

Tabela 9. Demandas progressivas para os diversos horizontes de projeto.

Ano	Alcance	População	Taxa de	População	População	Índice de	População	Q max Diária	Q média
		Total	Crescimento	Urbana	Urbana	Atendimento	Atendida		
		(hab)	(%)	(%)	(hab)	(%)	(hab)	(L/s)	(L/s)
1997	0	288.248	3,16	80,08	230.830	90,0	207.747	577	481
2007	10	393.440	3,16	82,06	322.874	91,2	294.461	818	682
2017	20	537.022	3,16	84,05	451.358	92,4	417.054	1158	965
2027	30	733.003	3,16	86,03	630.618	93,6	590.258	1640	1.366
2037	40	1.000.504	3,16	88,02	880.605	94,8	834.813	2319	1.932
2047	50	1.365.628	3,16	90,00	1.229.065	96,0	1.179.902	3278	2.731

Fonte: CASAN, 2003.

4.2.10.2 Irrigação de áreas cultivadas

Para a avaliação das demandas referentes à irrigação de áreas cultivadas a jusante do local, foi considerada a existência de uma barragem de nível à cerca de 6,5 km a jusante do aproveitamento, na localidade de São Bento Alto, com uma área de drenagem de 121,36 km², destinada à irrigação de aproximadamente 2.000 ha de áreas cultivadas com arroz.

A tabela 10 apresenta as demandas consideradas pelo projeto para irrigação das áreas cultivadas a jusante do aproveitamento, considerando a área irrigada à época dos estudos de uma previsão de aumento desta.

Tabela 10. Demandas consideradas para projeto para irrigação.

Área Cultivada (ha)	Demandas durante os meses do ano (L/s)												Demanda Média (L/s)
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
2000	1000	800	100	-	-	-	-	-	200	2000	1600	1400	
2500	1250	1000	130	-	-	-	-	-	250	2500	2000	1750	1270

Fonte: CASAN, 2003.

4.2.10.3 Vazão mínima de jusante

A vazão mínima de jusante, também denominada vazão ecológica ou vazão sanitária, é necessária para a manutenção da vida aquática, a dessedentação de animais e a preservação das demais espécies integrante do meio neste trecho de jusante ao aproveitamento.

Segundo orientações da Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina – FATMA, a vazão mínima a jusante do barramento não pode ser inferior a 50% da vazão mínima com sete dias de permanência e dez anos de tempo de retorno ($Q_{7,10}$).

Nos casos em que a série histórica não é disponível ou não apresenta extensão suficiente para a análise estatística, utilizam-se índices regionais para a obtenção da vazão mínima ($Q_{7,10}$).

Para a barragem do rio São Bento estes índices regionais foram fornecidos pela CASAN, através de estudo realizado pelo CEHPAR, obtendo-se: $Q_{7,10} = 1,7471 \text{ L/s/km}^2$. Como a área de drenagem da bacia formada a montante da barragem é de $112,12 \text{ km}^2$ (valor original de projeto), têm-se: $Q_{7,10} = 195,9 \text{ L/s}$. Seguindo-se as orientações do órgão ambiental, obteve-se o seguinte valor de vazão mínima de jusante: $Q_{\text{min.jus}} = 50 \% Q_{7,10}$ e $Q_{\text{min.jus}} = 100 \text{ L/s}$.

Por ser um problema multidisciplinar, não existe ainda um procedimento consagrado para o estabelecimento de vazões mínimas ecológicas. Estudos desta natureza transcendem o âmbito dos estudos hidrológicos, devendo agregar a estas análises os fatores que modelam a heterogeneidade ambiental dos meios fluvial e terrestre associados. Isto inclui a classificação de comunidades vegetais e sua relação com o nível e a vazão do curso d'água, assim como de aves aquáticas e peixes (SILVEIRA; SILVEIRA, 2003).

4.2.11 Descrição da política de operação da barragem do rio São Bento

A série operacional pela qual os dados são apresentados e que sustentam a base de informações desta pesquisa foi obtida através da gerência operacional da barragem do rio São Bento, onde verifica-se que esta série apresenta uma quantidade bem representativa em número de dados, visto que as modalidades do monitoramento operacional distinguem-se através de atividades relativas à obtenção de dados de hidrometeorologia, de dados hidráulicos e estruturais, sendo que os dados do monitoramento estrutural não fazem parte do escopo desta pesquisa, valendo-se portanto aos referentes à hidrometeorologia e da hidráulica do reservatório desta barragem.

Peixoto (2006), descreve que a regra de operação constitui um dos elementos principais na exploração dos sistemas de recursos hídricos, uma vez que a escolha de uma ou outra regra, ou nenhuma, determina o desempenho do sistema.

Por sua vez, o desempenho de um sistema pode ser descrito sob três pontos de vistas diferentes: (1) com que frequência o sistema falha (confiabilidade), (2) como rapidamente o sistema retorna ao estado satisfatório uma vez que a falha tenha ocorrido (resiliência), e (3) o quanto as conseqüências prováveis de falhas podem ser importantes (vulnerabilidade) (PEIXOTO, 2006).

A política de operação adotada na barragem do rio São Bento segue as normativas estabelecidas no Manual de Operação do Reservatório - MOR, manual este elaborado no ano de 2004 pela ENGEVIX Engenharia S/A, tendo esta empresa participado de serviços de assessoramento técnico à Companhia Catarinense de Águas e Saneamento – CASAN, através do acompanhamento de alguns programas ambientais exigidos pela Fundação do Meio Ambiente – FATMA, desde a sua construção até o início da operação daquele empreendimento.

O manual de operação do reservatório da barragem do rio São Bento estabelece uma regra operacional contextualizada dentro de princípios técnicos adotados na literatura de operação de barragens, onde através do levantamento de dados operativos relativos à adução, níveis do reservatório e de suas descargas, define-se então as vazões afluentes e defluentes do reservatório.

O levantamento de dados operativos processa-se dentro de uma rotina operacional que compreende intervalos de tempo que variam de uma a quatro horas, tendo o formulário padrão adotado denominado de Controle Hidráulico do Reservatório, documento este que constitui o registro dos dados relativos aos níveis do reservatório, e que por sua vez permitem a determinação dos dados de volume, vazões acumuladas, vazões dos órgãos de descarga, e finalmente a determinação das vazões defluentes e afluentes ao reservatório, compondo desta forma o balanço hídrico do reservatório.

A figura 23 representa o fluxograma de operação da barragem do rio São Bento.

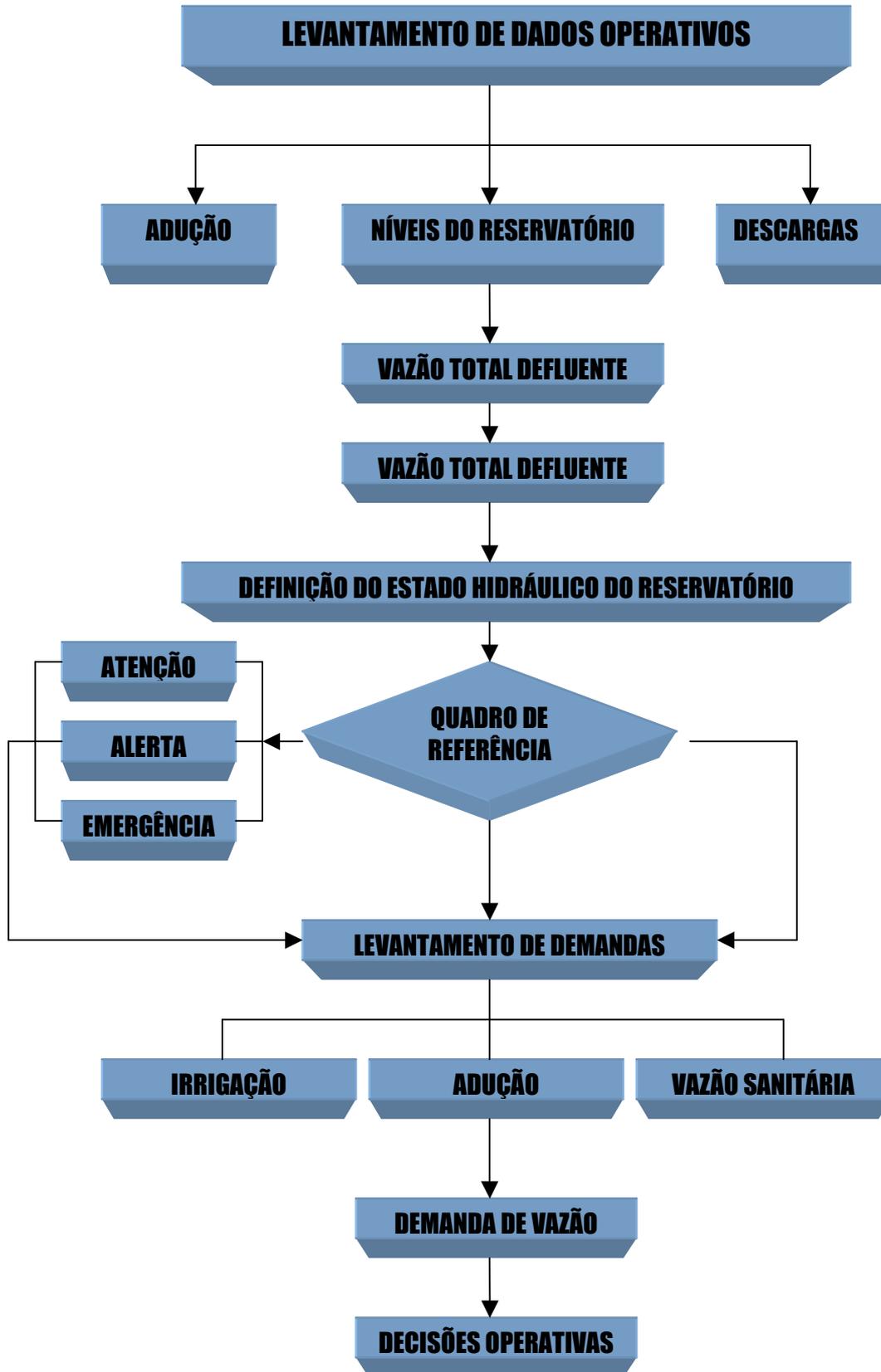


Figura 23. Fluxograma de operação da barragem do rio São Bento. Fonte: CASAN, 2003.

A série operacional relativa aos dados hidrometeorológicos é composta por dados obtidos das estações instaladas nas áreas do entorno do reservatório da barragem do rio São Bento, perfazendo um total de quatro pontos de coleta de dados, entre eles uma estação meteorológica e três estações hidrológicas, localizadas nas margens dos rios São Bento em pontos montante e jusante ao reservatório e Serrinha no seu setor montante.

A obtenção dos dados hidrometeorológicos se processa através do sistema convencional de leituras, onde os operadores da barragem do rio São Bento diariamente dirigem-se às respectivas estações hidrológicas, procedendo deste modo a leitura dos níveis dos rios nos horários das 7:00 e 17:00. A obtenção dos dados de precipitação, evaporação, temperaturas máximas e mínimas é efetuada diariamente às 09:00 horas através dos instrumentos instalados na estação meteorológica daquela unidade.

Além do processo convencional de obtenção de dados hidrometeorológicos, a Companhia Catarinense de Águas e Saneamento – CASAN possui um convênio firmado com o CIRAM – Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina, centro este vinculado à EPAGRI – Empresa de Pesquisas Agropecuárias de Santa Catarina, onde processa o registro de dados hidrometeorológicos através das estações telemétricas distribuídas nas áreas da barragem do rio São Bento, dados estes que são disponibilizados na rede mundial de computadores – internet e acessados restritamente por colaboradores da CASAN devidamente credenciados.

No decorrer da pesquisa, a aquisição dos dados hidrometeorológicos para análise é descrita conforme os processos de obtenção, ou seja, convencionais ou telemétricos, onde o critério para tal é definido conforme a comodidade e a disponibilidade dos mesmos, dependendo, portanto da discretização a ser adotada.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Generalidades

Por se tratar de uma pesquisa de estudo de caso, e tendo-se a barragem do rio São Bento a sua unidade de estudo, buscou-se através dos dados relativos ao controle hidráulico de seu reservatório elaborado pelo centro de operações daquela unidade, e pelos dados hidrometeorológicos produzidos através do convênio CASAN/CIRAM/EPAGRI, elaborar as análises relativas aos dados hidráulicos do reservatório, bem como da análise dos dados hidrometeorológicos da respectiva bacia.

A metodologia consistiu na coleta e organização cronológica destes dados, de modo a permitir a posterior análise do comportamento hidráulico do reservatório da barragem do rio São Bento e sua relação com os processos hidrológicos atuantes na respectiva bacia.

Quanto aos dados relativos ao controle hidráulico do reservatório, sua série temporal apresenta registros que variam de intervalos de meia hora a quatro horas, sendo adotado em períodos de chuvas intensas a realização do controle hidráulico do reservatório com intervalos de meia , uma ou duas horas, a fim de promover maior discretização de sua série e portanto, uma melhor observação quanto à evolução de cotas, volumes e vazões afluentes ao reservatório, possibilitando a realização de um balanço de massa mais discretizado.

5.2 O Controle hidráulico do reservatório

5.2.1 Generalidades

Entende-se por controle hidráulico do reservatório o procedimento pelo qual é realizado o registro dos níveis do reservatório através de um formulário específico em determinado período de tempo. Estes registros são elaborados pela equipe operacional da barragem do rio São Bento, onde os dados do nível do reservatório são processados e transformados em parâmetros hidráulicos que servem de base para a determinação do estado

hidráulico do reservatório, bem como para a determinação do seu balanço hídrico (CASAN, 2007).

O controle hidráulico do reservatório refere-se a operação hidráulica do aproveitamento, compreendendo as manobras para o controle dos fluxos pela torre de tomada d'água, a operação dos descarregadores de fundo e da válvula dispersora, bem como as rotinas operativas de monitoramento de níveis do reservatório, suas afluições e defluências pelo vertedouro.

5.2.2 Procedimentos adotados no registro do controle hidráulico do reservatório

Através do formulário do controle hidráulico do reservatório da barragem do rio São Bento (Figura 24), o dado inicialmente considerado é o nível do reservatório, correspondente ao final de um intervalo de tempo, onde através do qual o operador obtém os volumes do reservatório por meio da curva *cota x volume* definidas pelo Manual de Operação daquela unidade, determinando posteriormente as vazões acumuladas, onde estas somadas às vazões produzidas pelos órgãos de descarga, determina-se as vazões afluentes ao reservatório.

A partir da obtenção do dado relativo ao nível do reservatório, determina-se através das curvas *cota-volume* do reservatório e *cota-vazão dos acessórios de descarga*, o volume e as vazões respectivas conforme procedimento estabelecido pelo Manual de Operação do Reservatório – MOR.

5.2.3 Balanço hídrico do reservatório

Conforme descrito no controle hidráulico do reservatório, as variáveis data, leituras de níveis inicial e final, volumes inicial e final, intervalo de tempo, volume acumulado, vazão horária acumulada, vazões dos órgãos de descarga (adutora, válvula dispersora, descarregadores de fundo e vertedouro), são representados conforme convenção estabelecida por:

V_i = Volume inicial (hm^3)

V_f = Volume final (hm^3)

T = Período (h)

V_{Ac} = Volume Acumulado no período T

Q_{Ac} = Vazão Acumulada ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Q_{Ad} = Vazão da Adutora ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Q_{VD} = Vazão da Válvula Dispersora ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Q_{400} = Vazão do descarregador de fundo de 400 mm ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Q_{800} = Vazão do descarregador de fundo de 800 mm ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Q_{1000} = Vazão do descarregador de fundo de 1000 mm ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Q_{Vert} = Vazão do Vertedouro ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Q_{DEF} = Vazão Defluente ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Q_{AFL} = Vazão Afluente ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Sendo:

1 $\text{hm}^3 \rightarrow 1.000.000 \text{ m}^3$

h \rightarrow horas

T \rightarrow tempo ou intervalo de horas

Onde a formulação aplicada ao controle hidráulico do reservatório se dá seguinte forma:

$$V_{Ac} = V_f - V_i$$

$$Q_{Ac} = [(V_{Ac}/T).10^6].3600$$

$$Q_{DEF} = Q_{Ad} + Q_{VD} + Q_{VD} + Q_{400} + Q_{800} + Q_{800} + Q_{1000} + Q_{Vert}$$

$$Q_{AFL} = Q_{Ac} + Q_{DEF}$$

5.2.4 Corte transversal do reservatório

De modo a facilitar a visualização das cotas e volumes alocados da barragem do rio São Bento, apresenta-se através da figura 25, o corte transversal do seu reservatório, onde são indicados conforme as características de seu projeto executivo.

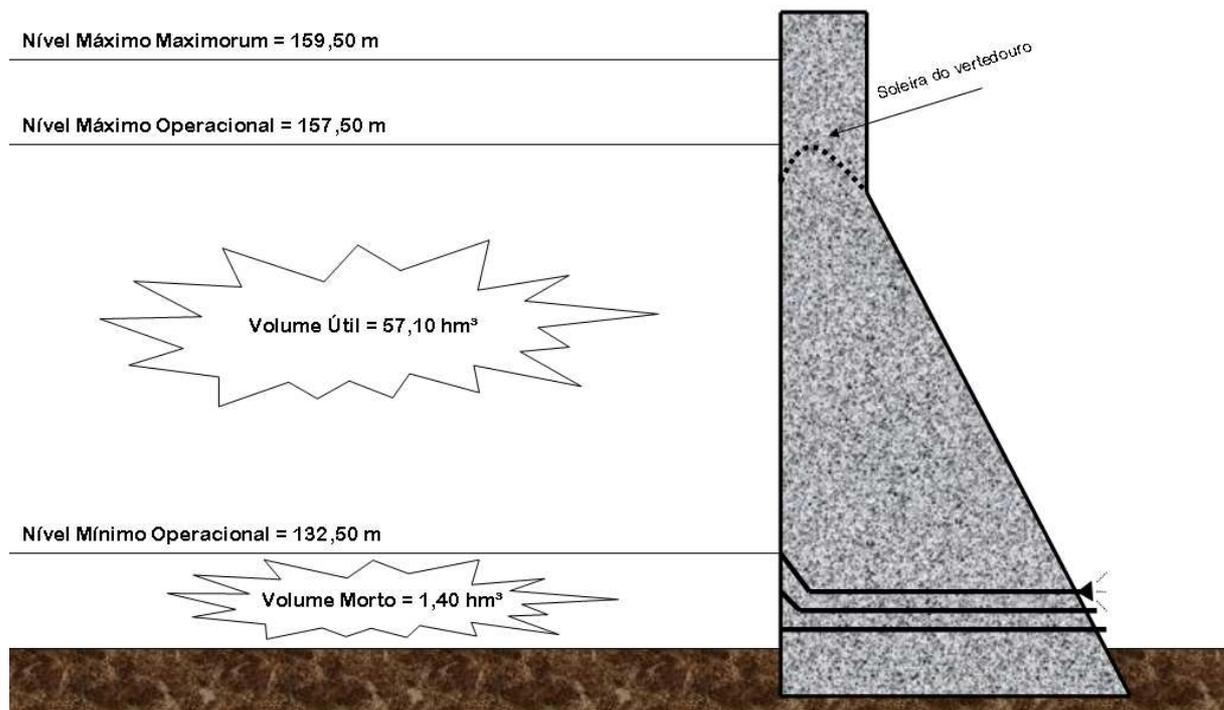


Figura 25. Corte transversal do reservatório.

A figura 26 apresenta a curva Cota x Volume do reservatório, curva pela qual é utilizada na determinação dos volumes alocados do reservatório.

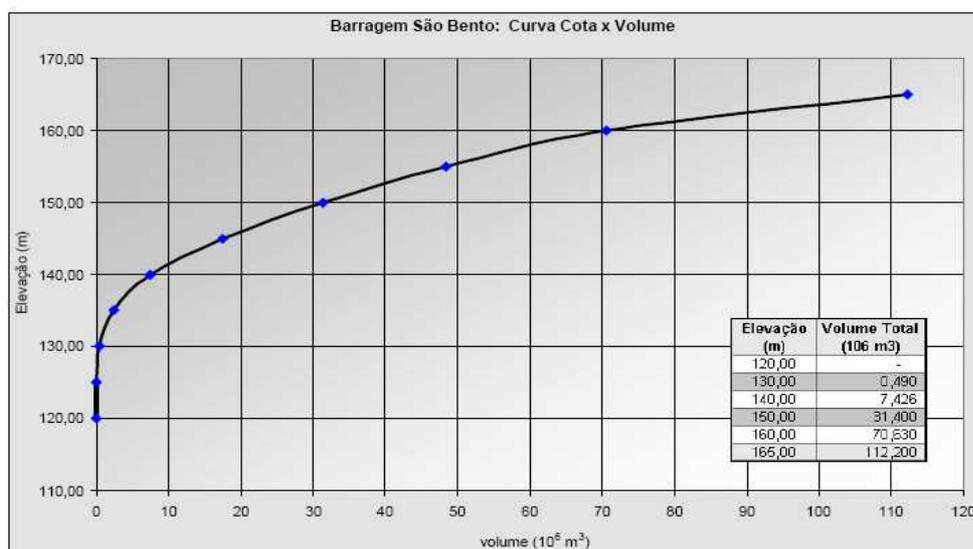


Figura 26. Curva Cota x Volume do reservatório. Fonte: CASAN, 2003.

5.3 Dados hidrometeorológicos

5.3.1 Generalidades

A hidrometeorologia tem como objetivo o estudo das fases atmosféricas e terrestres do ciclo hidrológico, com ênfase em suas inter-relações (CASAN, 2003). Em vista disto, os dados hidrometeorológicos que a CASAN utiliza para melhor auxiliar a operação da barragem do rio São Bento, são obtidos através do CIRAM/EPAGRI em convênio firmado a partir do ano de 2002.

Além das estações instaladas nas proximidades do reservatório da barragem do rio São Bento, a equipe operacional também utiliza-se dos dados hidrometeorológicos disponibilizados no site CIRAM/EPAGRI, onde os dados são apresentados em tempo real em forma tabular e gráfica, facilitando a sua visualização e evolução dos mesmos durante a operação.

Neste mesmo site, dados sobre previsão de tempo são intensamente utilizados, visto que a previsão de vazões é baseada através destas informações.

As regras de operação recomendadas no manual de operação do reservatório da barragem do rio São Bento independem das previsões de aflúncias ao reservatório, onde as decisões operativas são baseadas unicamente no estado hidráulico do reservatório e na programação de adução para o abastecimento público, irrigação e para vazão sanitária. Todavia, a avaliação de uma previsão de aflúncias num horizonte de até três dias, pode definir estratégias operativas na tomada de decisões quanto às descargas totais a serem praticadas.

5.3.2 Estações instaladas na bacia hidrográfica do rio São Bento

Nas áreas adjacentes ao lago formado pelo reservatório da barragem do rio São Bento encontram-se instaladas as estações hidrológicas automáticas telemétricas, onde as quais encontram-se distribuídas ao longo dos rios São Bento Montante, São Bento Jusante e Serrinha Montante.

Estas estações fornecem dados horários relativos aos níveis dos rios e às precipitações, onde são encaminhados via satélite ORBICOMM e recebidos pelo CIRAM/EPAGRI.

No pátio interno da barragem do rio São Bento e mais precisamente próximo da ombreira esquerda do barramento principal, encontra-se instalada a estação meteorológica convencional e uma estação meteorológica automática telemétrica, onde os dados desta última são captados e encaminhados através de telefonia fixa e recentemente via modem GPRS ao CIRAM/EPAGRI, e disponibilizados via WEB à CASAN.

No contexto dos dados hidrometeorológicos, a CASAN através da sua equipe operacional também efetua em cada estação hidrológica as medições relativas aos níveis dos rios São Bento e Serrinha, e na estação meteorológica convencional a obtenção dos dados relativos à evaporação, precipitação e temperaturas máximas e mínimas.

A figura 27 apresenta o posicionamento das estações hidrológicas e meteorológica no mapa da bacia hidrográfica do rio São Bento, onde as mesmas evidenciam-se nas proximidades do reservatório formado pela barragem do rio São Bento.

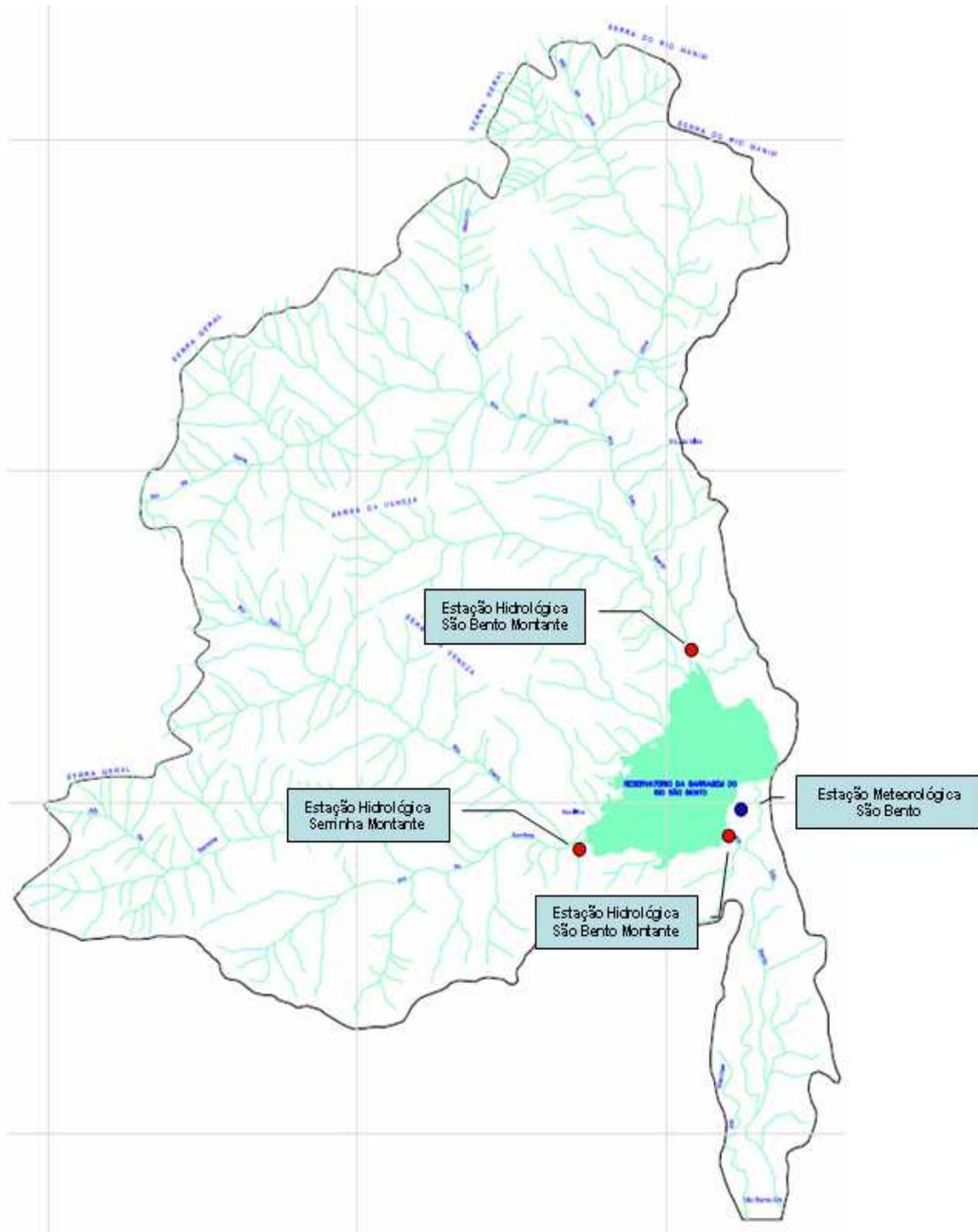


Figura 27. Alocação das estações hidrometeorológicas da barragem do rio São Bento.

5.3.2.1 Estações meteorológicas

As estações meteorológicas convencional e automática com telemetria da barragem do rio São Bento são equipadas com uma série de instrumentos, dentre os quais utilizam-se para obtenção dos seguintes dados:

- a) pluviometria;
- b) evaporação através de tanque classe A;
- c) radiação solar;
- d) temperatura do ar;
- e) direção e velocidade do vento;
- f) nível do reservatório;
- g) umidade do ar;
- h) Pressão atmosférica.

A figura 28 apresenta as estações meteorológicas localizadas ao lado do lago formado pelo reservatório da barragem do rio São Bento.



Figura 28. Estações meteorológicas – Barragem do rio São Bento. Fonte: CASAN, 2006;

5.3.2.2 Estações hidrológicas

As estações hidrológicas encontram-se distribuídas nos rios São Bento e Serrinha, onde as mesmas geram dados relativos às precipitações e níveis de rios de modo automático. Os dados gerados são transmitidos via satélite à central de recepção do CIRAM/EPAGRI e posteriormente disponibilizados para a CASAN de modo *on-line*.

As figuras 29, 30 e 31 apresentam as três estações hidrológicas instaladas em pontos dos rios Serrinha e São Bento.



Figura 29. Estação hidrológica São Bento - jusante. Fonte: CASAN, 2006.



Figura 30. Estação hidrológica São Bento - montante. Fonte: CASAN, 2006.



Figura 31. Estação hidrológica Serrinha - montante. Fonte: CASAN, 2006.

5.4 Descrição dos dados

Com relação aos dados utilizados no presente estudo, torna-se importante descrever a frequência pela qual os mesmos são gerados, de modo a caracterizar a sua discretização.

Através da estação meteorológica é realizada diariamente às 09:00 horas a coleta de dados relativos a precipitação, temperaturas máximas e mínimas e evaporação, procedimentos estes executados convencionalmente pelos operadores da barragem do rio São Bento.

Por meio dos instrumentos da estação meteorológica automática, os dados são gerados em períodos horários, apresentando uma base de dados bem discretizada, visto que a grande quantidade de dados é produzida nestes períodos de tempo. Na base de dados da respectiva estação estão dados referentes à pressão instantânea, umidade do ar, radiação solar média, temperatura instantânea do ar, direção e velocidade média do vento.

As leituras dos dados das estações hidrológicas são realizadas de forma convencional diariamente nos horários das 7:00 e 17:00 horas pelos integrantes da equipe operacional da barragem do rio São Bento, onde procede-se a leitura dos níveis dos rios Serrinha e São Bento. Além da obtenção dos dados elaborados pela equipe operacional, a estação possui instrumentos que registram os respectivos dados, onde são transmitidos via satélite em períodos horários e recepcionados pelo CIRAM/EPAGRI.

A tabela 11 apresenta de modo sintético a produção dos respectivos dados e os períodos pelos quais são gerados.

Tabela 11- Periodicidade de leituras dos dados hidrometeorológicos.

Estação	Tipo	Período de registro/hora	Dados
Hidrológica São Bento Jusante	Convencional	07:00 e 17:00	Nível do rio
	Automática	Registro horário	Nível do rio Precipitação
Hidrológica São Bento Montante	Convencional	07:00 e 17:00	Nível do rio
	Automática	Registro horário	Nível do rio Precipitação
Hidrológica Serrinha Montante	Convencional	07:00 e 17:00	Nível do rio
	Automática	Registro horário	Nível do rio
Meteorológica	Convencional	09:00	Precipitação Evaporação Temperaturas
	Automática	Registro horário	Precipitação Pressão instantânea, Umidade do ar, Radiação solar média, Temperatura instantânea do ar, Direção e velocidade média do vento

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Dados Hidráulicos

Os dados hidráulicos apresentados neste módulo reproduzem os valores obtidos da série operacional da barragem do rio São Bento relativos aos níveis do reservatório, às áreas e seus volumes, parâmetros estes que representam algumas das características físicas do mesmo. São representados conjuntamente, os dados relativos às vazões defluentes, vazões pelas quais são controladas através dos órgãos de descarga, incluindo portanto as vazões da adutora, da válvula dispersora, dos descarregadores de fundo e do vertedouro.

A evolução dos níveis e dos volumes do reservatório produzidos no decurso da série operacional é demonstrada conjuntamente pela Figura 32, onde observa-se claramente a sincronia dos respectivos parâmetros, visto que os mesmos possuem relação direta de efeitos.

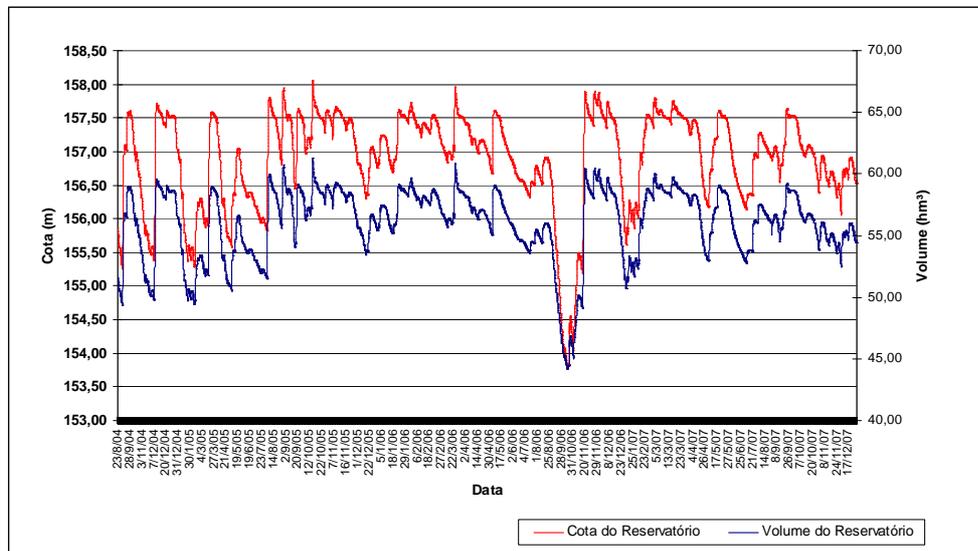


Figura 32. Evolução das cotas e volumes alocados no reservatório.

6.1.1 Níveis do reservatório

Dentro da dinâmica hidráulica do reservatório da barragem do rio São Bento, os valores relativos aos níveis registrados no período de agosto de 2004 a dezembro de 2007 são representados através da figura 33, tendo-se suas oscilações relacionadas diretamente aos processos hidrológicos atuantes na região, bem como às demandas de usos do reservatório promovidas pelas descargas defluentes.

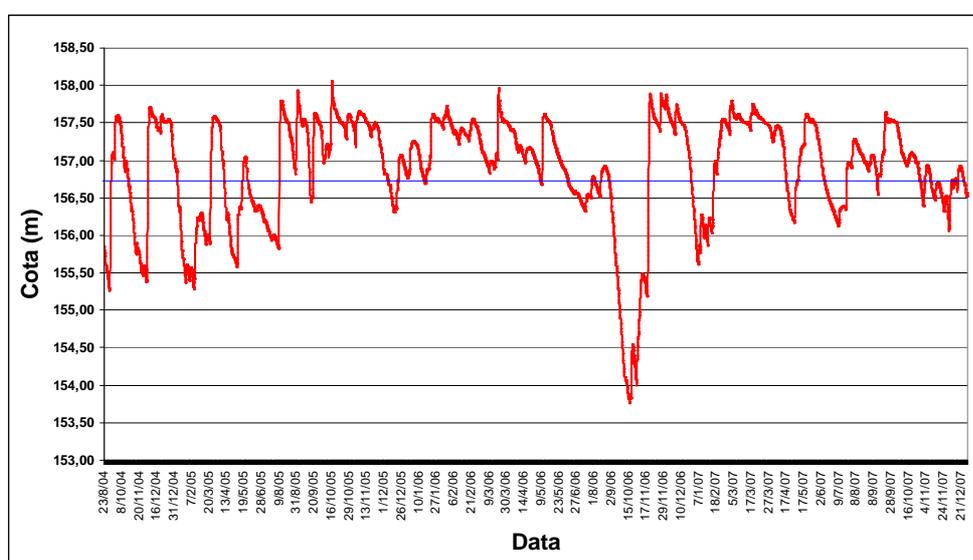


Figura 33. Cotograma do reservatório.

Por meio da análise de estatística descritiva, a Tabela 12 apresenta algumas medidas características da série de dados levantados, onde destaca-se o nível do reservatório apresentando um valor médio de 156,89 m, o que representa um valor alto se for considerado a cota mínima operacional de 132,50 m.

Tabela 12. Estatística descritiva dos níveis do reservatório.

Parâmetro	Valor
Média (m)	156,89
Mediana (m)	157,04
Moda (m)	157,51
Desvio padrão (m)	0,72
Variância da amostra (m ²)	0,52
Curtose	2,61
Assimetria	-1,43
Amplitude (m)	4,30
Cota Mínima (m)	153,76
Cota Máxima (m)	158,06

Os níveis máximo e mínimo atingidos apresentam uma amplitude total de 4,30 metros, correspondentes à oscilação entre os níveis 158,06 e 153,76 m. Tomando-se como referência a cota 157,50 m que representa o nível máximo operacional, verifica-se que os níveis operacionais comportam-se com uma margem média de 0,61 m abaixo da soleira do vertedouro.

A figura 34 apresenta a curva de permanência dos níveis do reservatório, onde observa-se que intervalos de 80 e 24% a sua oscilação dá-se entre os níveis 156,50 a 157,50 metros, mantendo desta forma grande parte do período analisado em torno de uma variação de zero a um metro da soleira livre do vertedouro, representando desta forma que o reservatório em grande parte do período apresentou cotas de espera na faixa de 1 metro de altura em relação ao nível máximo operacional, ou seja, entre zero e um metro abaixo da cota 157,50 metros. Complementando esta análise, verifica-se que 20% das cotas registradas correspondem a períodos de ocorrência de vertimentos, visto que estas cotas superam o nível máximo operacional respectivo à cota 157,50 metros.

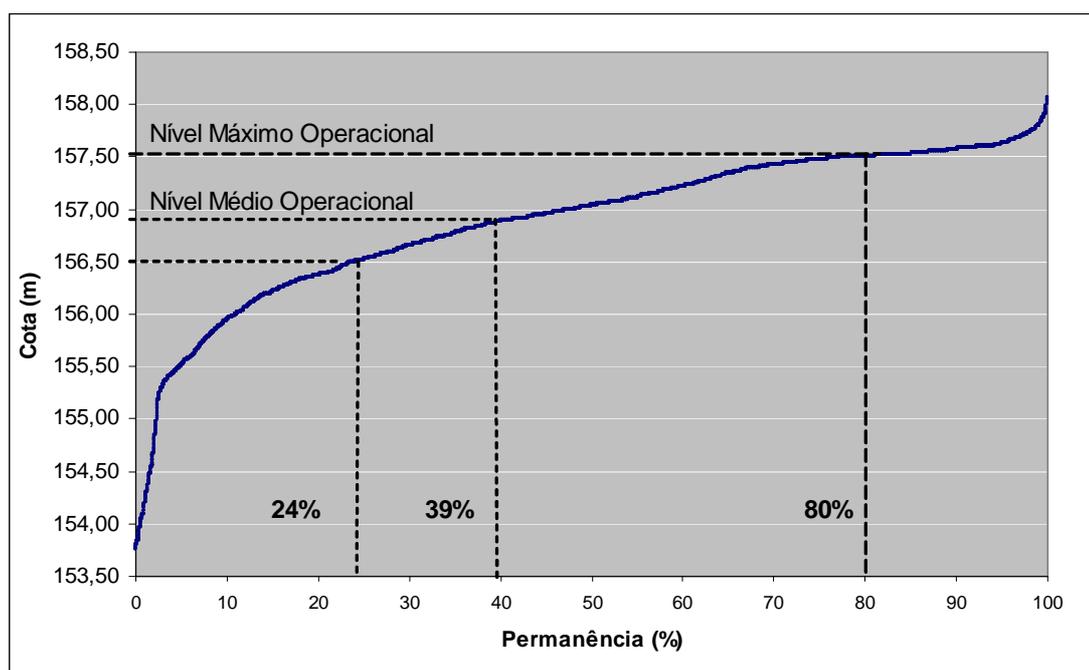


Figura 34. Curva de permanência dos níveis do reservatório.

Considerando-se os níveis mínimos e máximos operacionais representados pelas cotas 132,50 e 157,50 metros respectivamente, a diferença entre os mesmos representa a altura útil correspondente ao volume útil do reservatório. Diante dos níveis registrados na série operacional, a figura 35 apresenta a percentagem da variação das cotas com relação a sua altura útil máxima de 25 metros. Pela figura denota-se que a cota mínima atingida de

153,76 metros corresponde a um deplecionamento do reservatório em 3,74 metros, correspondente a um percentual de 15% da sua altura útil, ocorrência esta registrada no dia 17 de outubro do ano de 2006, onde o nível atingido deu-se ao longo de um período sem chuvas significativas ao reservatório. Concomitantemente, grande parte deste período está inserido as elevadas demandas de água para os canais de irrigação das áreas cultivadas com arroz no percurso do rio São Bento a jusante da barragem.

O histograma dos níveis do reservatório representado pela figura 36, mostra que grande parte dos níveis registrados concentram-se entre as cotas 156,50 e 157,50 metros, complementando portanto, a análise respectiva à figura 34, onde evidencia a distribuição de frequência dos níveis do reservatório.

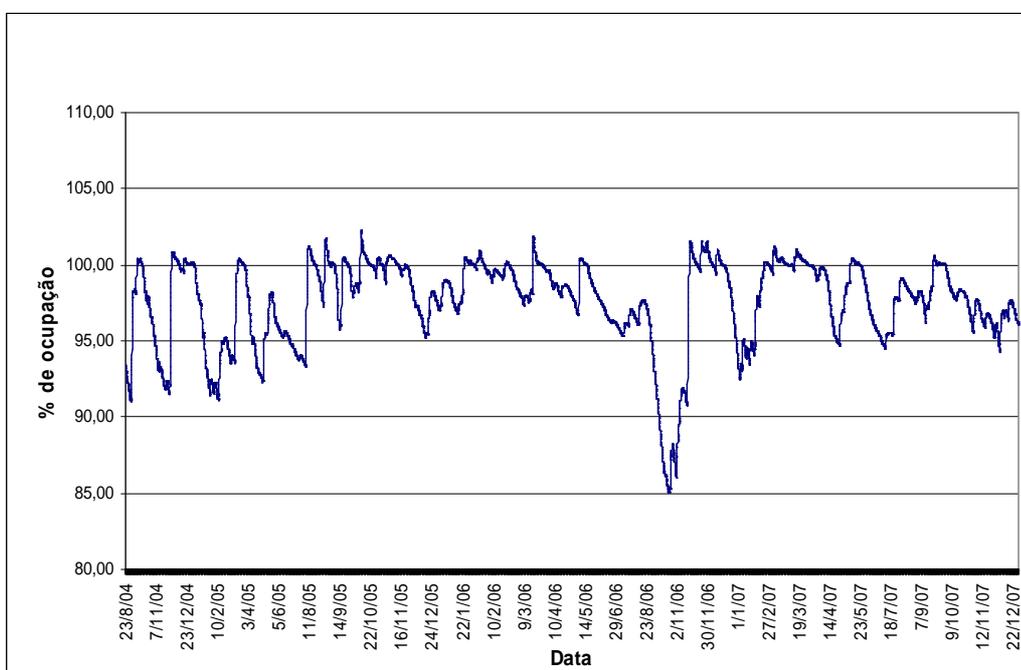


Figura 35. Variação da cota útil do reservatório.

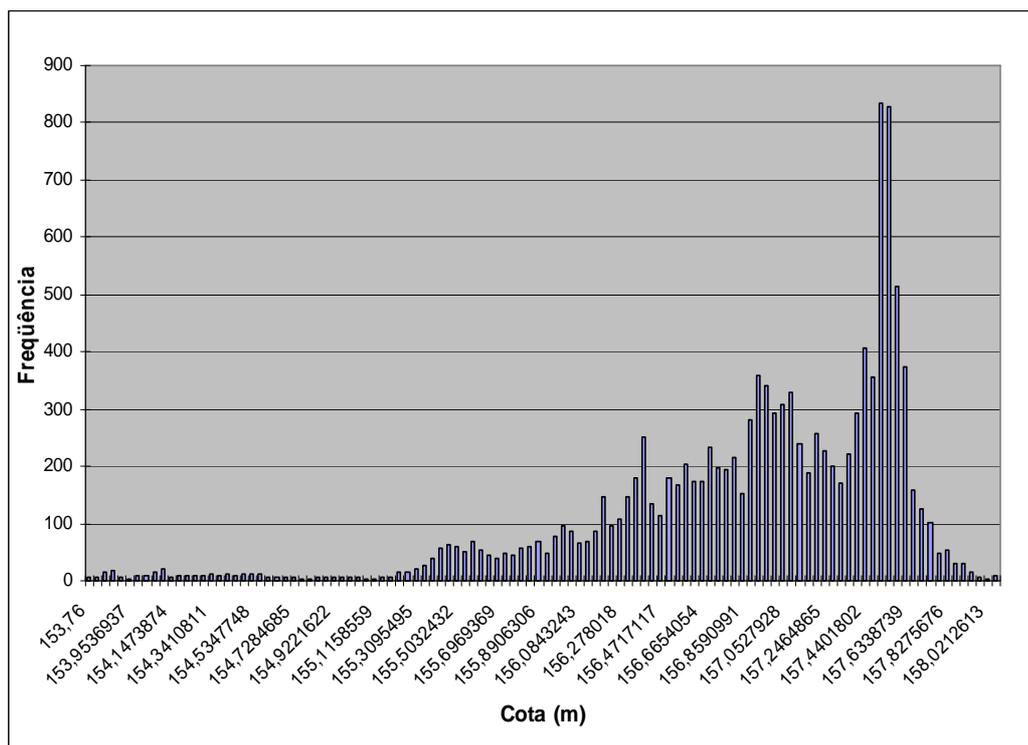


Figura 36. Histograma dos níveis do reservatório.

6.1.2 Volumes do reservatório

Através dos registros do controle hidráulico do reservatório da barragem do rio São Bento, os volumes armazenados em sua série operacional apresentam-se de forma bem discretizada, uma vez que o processamento dos dados são permanentemente efetuados, de modo a proporcionar a determinação do balanço de massa do reservatório, obtendo-se assim uma série temporal de dados horários.

Os dados relativos aos volumes registrados no período de agosto de 2004 a dezembro de 2007, são representados através da figura 37, configurando-se portanto, a evolução dos volumes armazenados no reservatório ao longo de sua série operacional, tendo-se suas oscilações relacionadas diretamente aos processos hidrológicos atuantes na localidade pelo qual encontra-se inserido, bem como das demandas dos usos do reservatório promovidas pelas descargas defluentes.

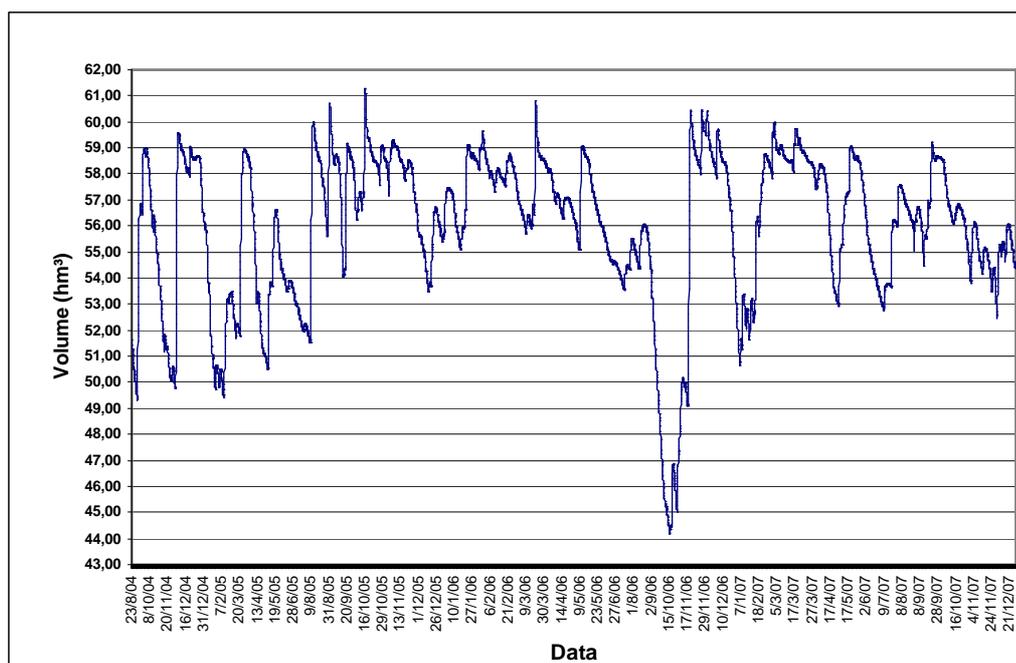


Figura 37. Evolução dos volumes do reservatório.

Utilizando-se da análise de estatística descritiva, a tabela 13 apresenta algumas medidas características da série dos dados levantados, com destaque para o volume médio do reservatório que apresenta um valor de 55,97 hectômetros cúbicos, representando um valor relativamente alto se comparado ao volume máximo de armazenamento do reservatório que é 58,50 hm³.

Tabela 13. Estatística descritiva dos volumes (hm³).

Parâmetro	Valor
Média (hm ³)	55,97
Mediana (hm ³)	56,57
Moda (hm ³)	58,55
Desvio padrão (hm ³)	2,95
Variância da amostra(hm ³) ²	8,69
Curtose	1,69
Assimetria	-1,23
Amplitude (hm ³)	17,10
Mínimo (hm ³)	44,18
Máximo(hm ³)	61,29

Os volumes máximo e mínimo atingidos apresentam uma amplitude total de 17,10 hm³, correspondentes à oscilação entre os volumes 61,29 e 44,18 hm³ respectivamente, onde, tomando-se como referência o volume máximo operacional de 58,5 hm³, verifica-se que os volumes do reservatório permanecem com uma margem média de 2,53 hm³ em relação ao volume máximo operacional.

A figura 38 apresenta a curva de permanência dos volumes armazenados no reservatório, onde observa-se que cerca de 97% da série de dados registrados apresentaram volumes superiores a 50 hm³. Considerando-se 57,1 hm³ o volume útil do reservatório, volume este correspondente às da cotas 132,50 e 157,50 metros respectivamente, a série operacional apresenta variação máxima de apenas 13% do volume útil do reservatório.

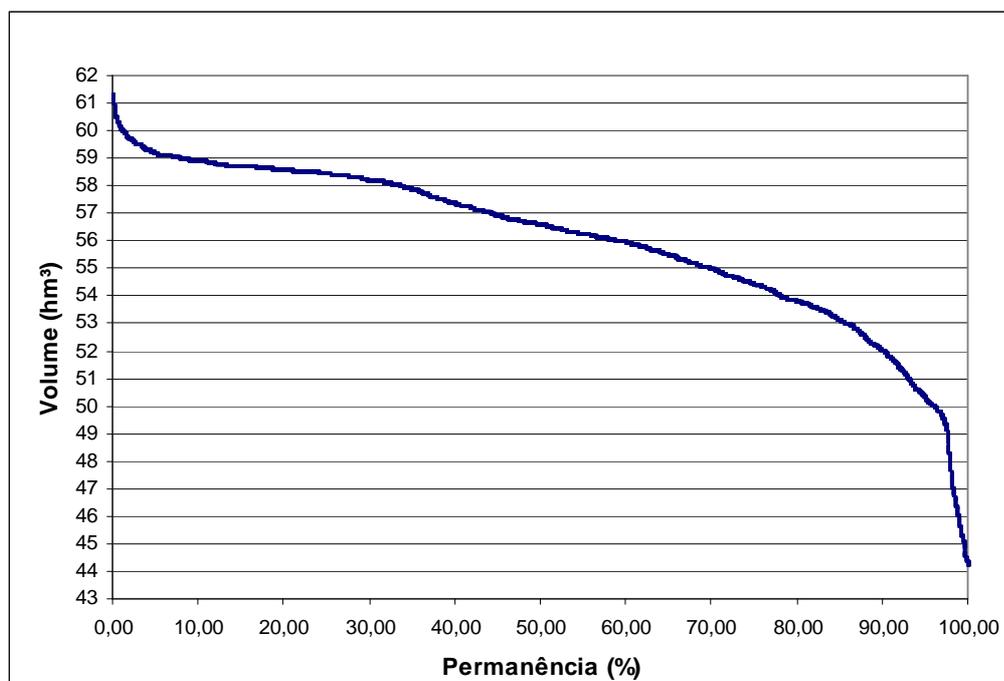


Figura 38. Curva de permanência dos volumes do reservatório.

Através da curva de permanência dos volumes, observa-se que 20% dos volumes armazenados constituem os volumes excedentes do reservatório, visto que os armazenamentos ocorridos em elevações superiores à 157,50 metros, ao atingirem a soleira do vertedouro são liberados e convertidos em vazões de vertimento ou vazões vertidas, vazões pelas quais são analisadas através da caracterização dos períodos de vertimento apresentada na tabela 14, que por sua vez estão representados através dos volumes totais respectivos a cada período.

Complementando-se à análise da curva de permanência dos volumes do reservatório, a figura 39 apresenta o histograma da série operacional relativa ao registro dos dados, evidenciando que as oscilações dos volumes ocorrem faixa entre 49 a 58 hm³.

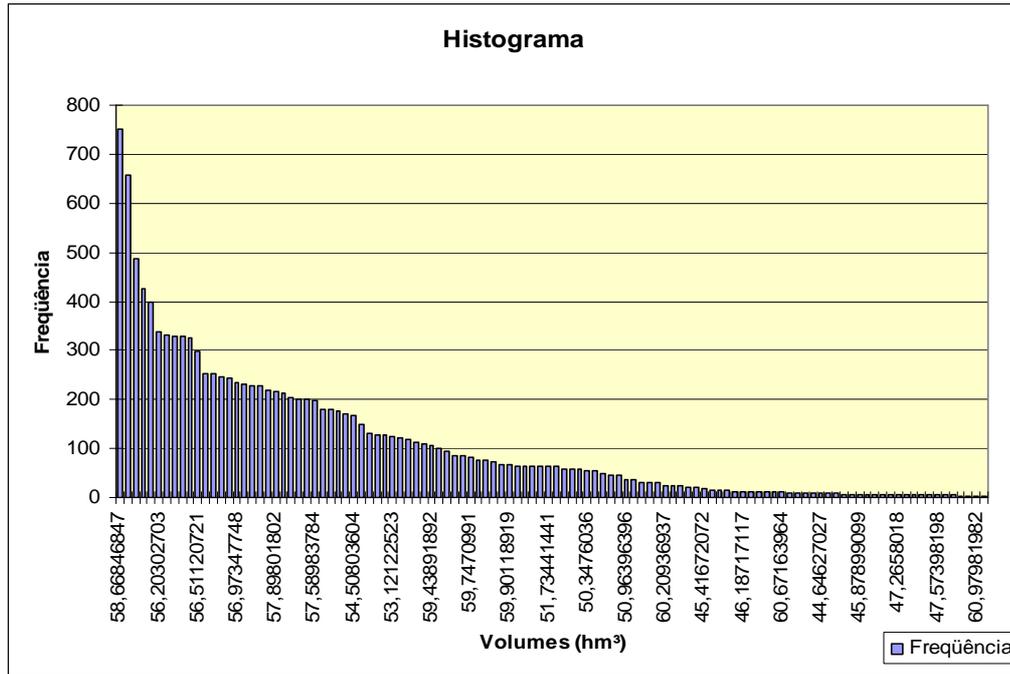


Figura 39. Histograma dos volumes armazenados.

A figura 40 representa o diagrama de massas obtido através das vazões afluentes registradas ao longo da série operacional da barragem do rio São Bento, denotando-se que no final da série pesquisada o valor do volume acumulado chega a um total de 625,90 hm³, onde através da analogia com o volume máximo operacional de 58,5 hm³, o reservatório acumula um total de 10,7 reservatórios equivalentes, valor este que leva a concluir que a área pela qual está inserida a barragem do rio São Bento apresenta um *superávit* hídrico relativo às demandas afluentes ao reservatório, ao comparar-se o tempo da série temporal pesquisada.

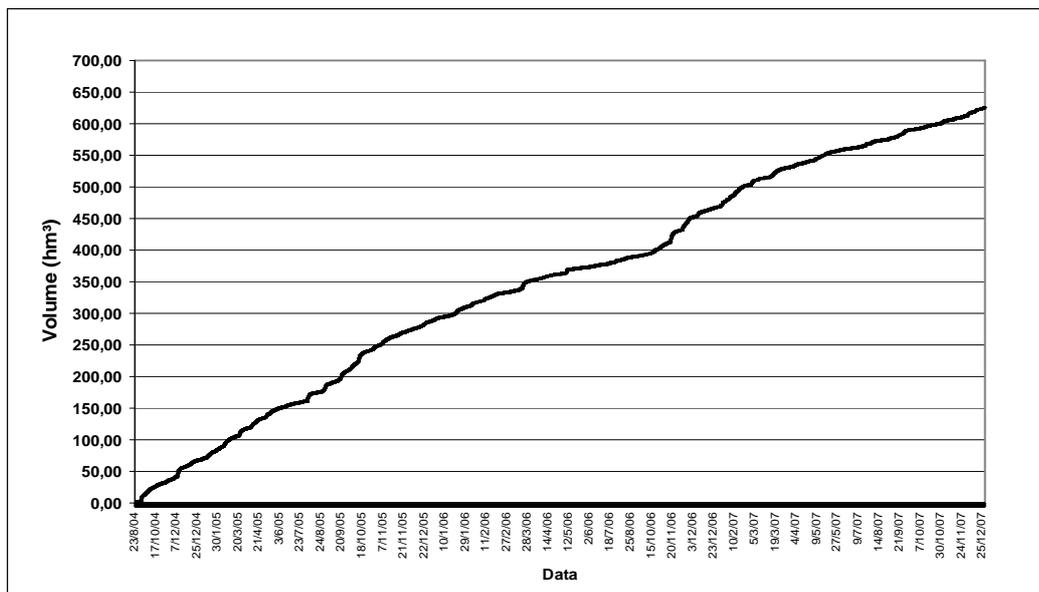


Figura 40. Volumes acumulados no reservatório.

Avaliando-se as variações dos volumes do reservatório em sua série operacional, apresentadas na figura 41, denota-se que o nível mínimo registrado de 44,184 hm³ corresponde a um deplecionamento volumétrico de 25% do volume máximo do reservatório, variação esta decorrente das altas demandas defluentes do reservatório, coincidentes com um período de baixas precipitações durante o mês de maio a outubro do ano de 2006. Verifica-se que após este rebaixamento ocorre em poucos dias o restabelecimento dos níveis normais, período pelo qual registrou-se chuvas significativas, promovendo o aporte de volumes ao reservatório de modo a representar a sua capacidade de recuperação.

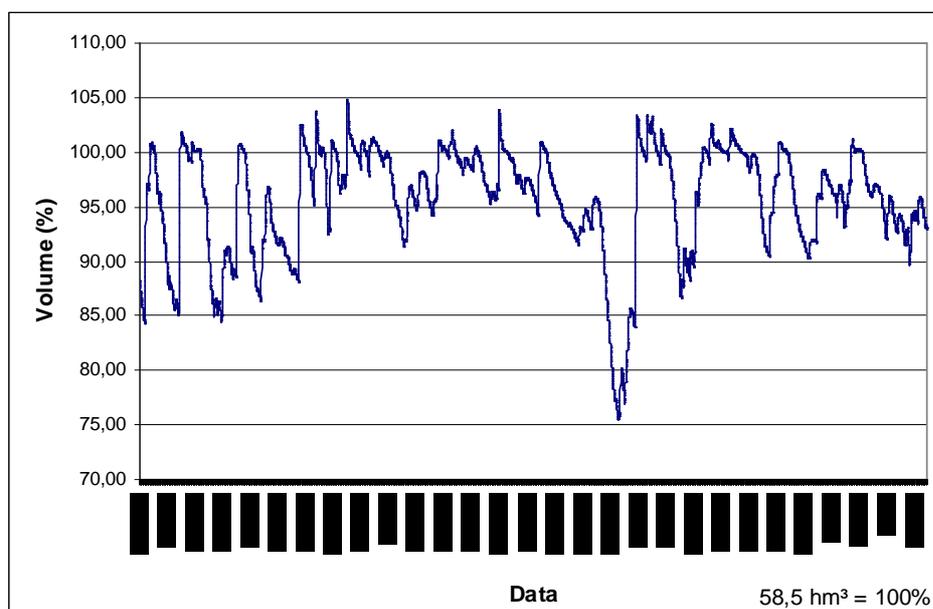


Figura 41. Níveis de ocupação em relação ao volume máximo do reservatório.

Considerando-se os períodos de setembro a março dos anos subsequentes, períodos pelos quais ocorrem as maiores demandas defluentes promovidas pelo encaminhamento de águas para o rio São Bento em razão da necessidade de suprimento de água para a rizicultura, a Tabela 14 apresenta as cotas e os respectivos volumes do reservatório durante os registros da série operacional pesquisada.

Tabela 14. Cotas e volumes do reservatório durante os períodos com demandas para irrigação ocorridos no meses de março e setembro do ano subsequente.

Período		Cotas (m)			Volumes (hm ³)		
		Mínima	Média	Máxima	Mínimo	Médio	Máximo
2004	2005	155,26	156,61	157,71	49,32	54,79	59,55
2005	2006	156,30	157,27	158,06	53,46	57,57	61,29
2006	2007	153,76	156,70	157,89	44,18	55,31	60,45
2007	2008	156,06	156,89	157,64	52,45	55,96	59,20

Denota-se que o período de setembro de 2005 a março de 2006 registrou as maiores disponibilidades de água no reservatório, fato este decorrente da abundância de chuvas ocorridas neste período. Entretanto, registre-se que no período de setembro de 2006 a março de 2007 ocorreram os maiores *déficits* de armazenamento no reservatório, conseqüente da baixa pluviosidade ocorrida no período.

6.1.3 Vazões defluentes

A série de vazões defluentes produzida pela operação hidráulica da barragem do rio São Bento possui seus valores registrados no formulário do controle hidráulico do reservatório, onde, dentro das diretrizes estabelecidas pelo gerenciamento operacional daquela unidade, procede-se estas demandas em conformidade com as necessidades requeridas.

Por tratar-se de um reservatório de múltiplos usos, a variabilidade das vazões defluentes da barragem do rio São Bento evidencia-se à medida que as demandas destinadas à irrigação se processam, pois considerando constante a vazão de adução, as grandes defluências ocorrem em razão das altas precipitações ocorridas na bacia hidrográfica do rio São Bento a montante da barragem, e precisamente neste caso, quando em períodos de ocorrência de vazões de vertimento, período pelo qual ocorre a liberação dos volumes excedentes ao reservatório através da soleira livre do vertedouro.

As defluências produzidas destinam-se à adução de águas para tratamento, vazão ecológica, irrigação e quando das excedências de volumes em ocasiões de chuvas de grandes magnitudes. Eventualmente são efetuadas manobras de abertura dos descarregadores de fundo e válvula dispersora, a fim de promover a liberação antecipada de água ao rio São Bento à

jusante da barragem, de modo a promover o esvaziamento controlado do reservatório, como forma de criar volumes de espera para uma eventual precipitação de grande volume.

A série de vazões defluentes dos períodos de agosto de 2004 a dezembro de 2007 é representada através da figura 42, onde observa-se que as suas variações ocorrem de acordo com as demandas inerentes à operação hidráulica do reservatório, denotando-se que grande parte do período pesquisado as demandas defluentes são controladas através dos órgãos de descarga, ocorrendo portanto defluências não controladas quando em períodos de vertimento, períodos pelos quais o comportamento destas vazões são regidos por conta da liberação dos volumes excedentes do reservatório através da soleira livre do vertedouro, destacando-se na respectiva figura através da ocorrência dos picos de vazão.

Destacam-se algumas características descritivas das vazões defluentes, onde tem-se registrado na série uma vazão média defluente de $7,79 \text{ m}^3/\text{s}$, para uma máxima de $104,60 \text{ m}^3/\text{s}$ ocorrida no mês de outubro do ano de 2005, e a mínima da série com $1,06 \text{ m}^3/\text{s}$ ocorrida em novembro de 2007.

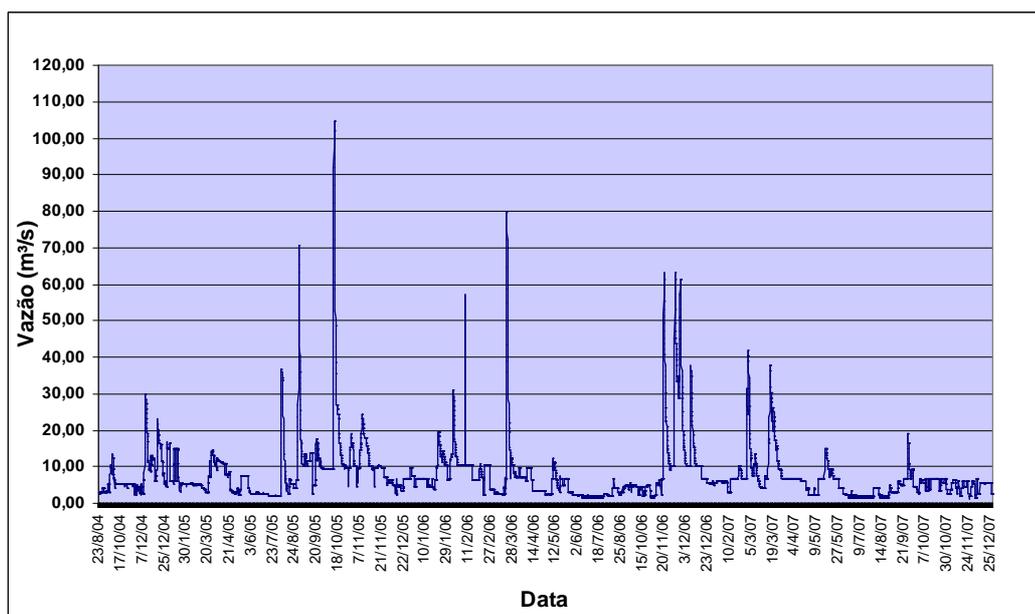


Figura 42. Série das vazões defluentes.

A figura 43 apresenta a curva de permanência das vazões defluentes do reservatório, onde verifica-se que 70% das vazões defluentes registradas apresentam valores superiores a vazão média de longo termo da série histórica de projeto que é de $3,12 \text{ m}^3/\text{s}$. Representando portanto que através da série operacional, o reservatório encaminha água em quantidade suficiente para o atendimento às suas demandas, sem o comprometimento do abastecimento público e à irrigação.

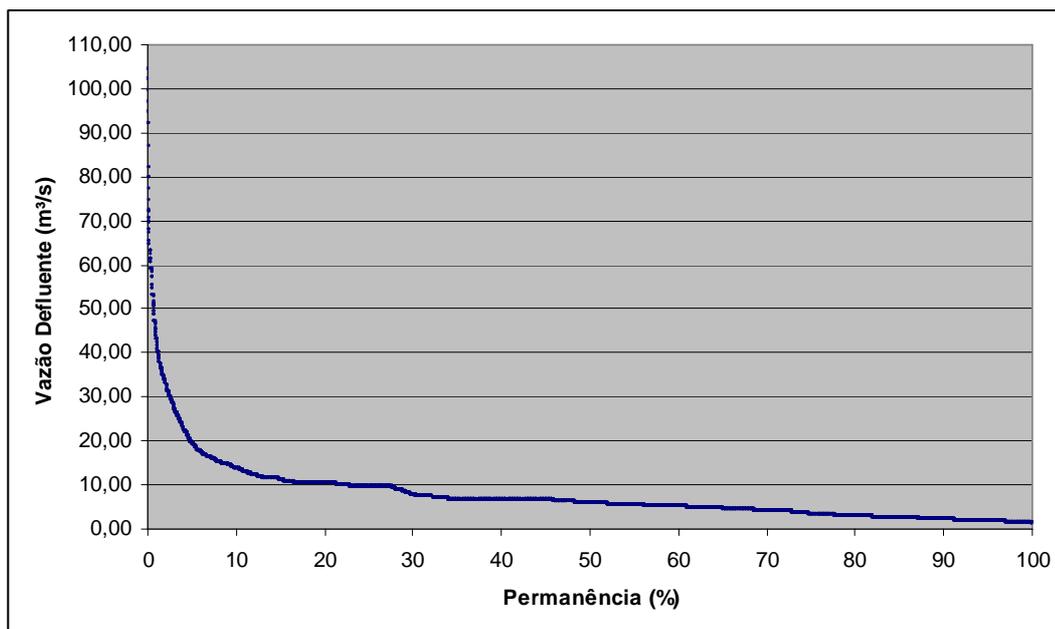


Figura 43. Curva de permanência das vazões defluentes.

6.1.3.1 Vazões de adução

A adução de água bruta compõe uma das parcelas das vazões defluentes da barragem do rio São Bento, constituindo-se na única fonte de abastecimento público de água do sistema integrado de Criciúma, onde demanda água para o atendimento à uma população de 300.000 habitantes distribuídos nos municípios de Criciúma, Içara, Nova Veneza, Forquilha e Maracajá.

O encaminhamento da água bruta para o tratamento processa-se ininterruptamente em regime diário, onde após sua chegada na Estação de Tratamento de Água do bairro São Defende no município de Criciúma, encaminha-se para o tratamento convencional e posteriormente para a distribuição. A figura 44 representa a série de vazões de adução ocorridas no período de agosto de 2004 a dezembro de 2007, onde verifica-se que inicialmente a série apresenta até o mês de novembro de 2005 uma vazão média de 670 L/s, e a partir do mês subsequente até o final da série uma vazão média de 870 L/s, incremento este decorrente da implantação de uma nova adutora de 600 mm de PVC reforçado com fibra de vidro (PVCRFV), instalada paralelamente à antiga adutora de 600 mm de ferro fundido, conforme esquema representativo apresentado na Figura 21 deste trabalho.

As variações observadas na respectiva série decorrem das manobras efetuadas na adutora, manobras estas que envolvem o controle de vazões para a estação de tratamento de água, onde esporadicamente ocorrem interrupções relativas a consertos de vazamentos acidentais em trechos da respectiva adutora.

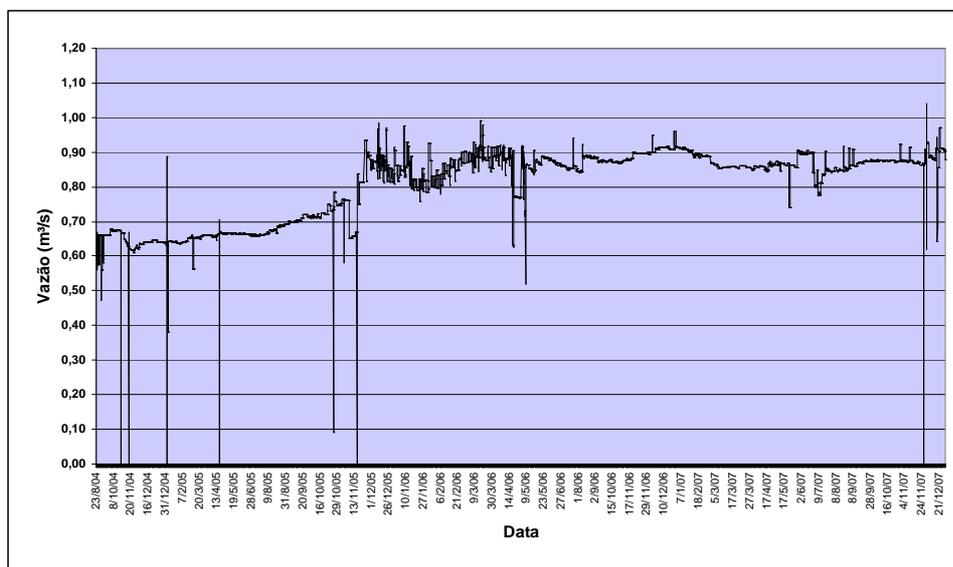


Figura 44. Série das vazões de adução.

Avaliando-se a demanda de água destinada ao abastecimento público, observa-se que atualmente a adução de água bruta apresenta valor médio de 870 L/s, valor este que comparado com a vazão média de adução apresentada na Tabela 9 de 682 L/s prevista para o ano de 2007, a demanda atual apresenta um acréscimo de 21,6 % da vazão projetada para o respectivo ano. Significando entretanto, que a projeção elaborada na época do projeto não atenderia a demanda atual do abastecimento público de água do sistema integrado de Criciúma. Fato este que merece atenção, pois, considerando-se a projeção de consumo até o ano 2017 (965 L/s), a demanda atual já representa 90% do consumo projetado para os futuros dez anos, conforme mostra a tabela 15.

Tabela 15. Vazões de projeto 2007 e 2017.

Vazão média projetada para 2007 (L/s)	Vazão média atual (2007) (L/s)	Vazão média projetada para 2017 (L/s)
682	870	965

6.1.3.2 Vazões da válvula dispersora

O encaminhamento de águas para o rio São Bento jusante à barragem, ocorrem através da válvula dispersora, equipamento este instalado junto às estruturas da casa de comando inferior, constituindo o acessório de descarga que apresenta o maior número de manobras de controle, visto que através da mesma é que se processa grande parte do controle das vazões defluentes.

Em vista de sua flexibilidade, a válvula dispersora possui acionamento eletromecânico, dispositivo este que vem facilitar de modo considerável as manobras requeridas conforme as necessidades de água no trecho jusante do rio São Bento, onde as manobras se processam de forma ágil e rapidamente.

A figura 45 apresenta a série de vazões promovidas pela válvula dispersora da barragem do rio São Bento, onde denota-se que a frequência de acionamentos ocorre de modo bem intensivo, caracterizando-se o acessório de descarga que apresenta o maior número de acionamentos, e constituindo-se num acessório de grande importância no processo de operação hidráulica da barragem do rio São Bento.

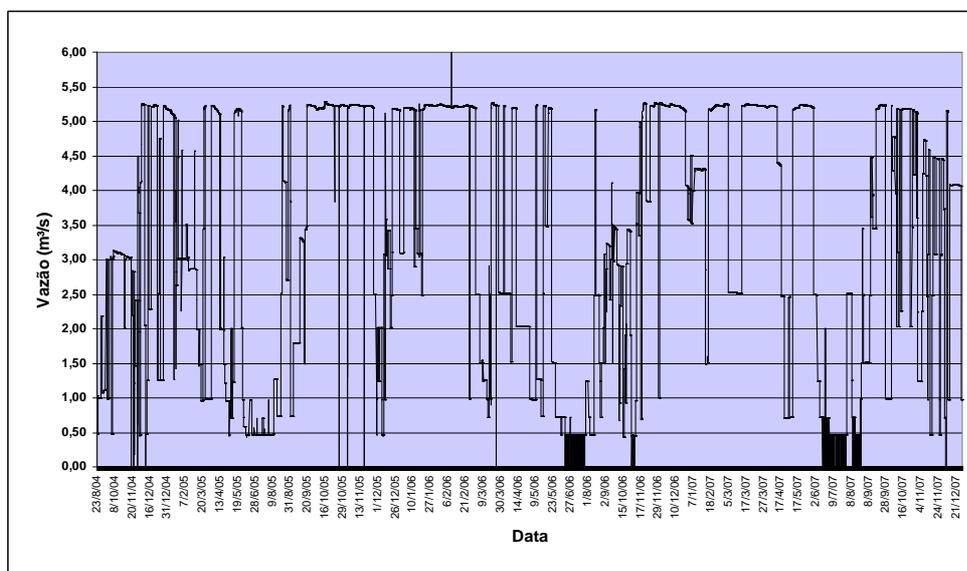


Figura 45. Série de vazões da válvula dispersora.

6.1.3.3 Vazões dos descarregadores de fundo

As séries de vazões dos descarregadores de fundo da barragem do rio São Bento são apresentadas através das figuras 46, 47 e 48, onde representam os diâmetros de 400, 800 e

1000 mm respectivamente. As descargas promovidas pelos descarregadores de fundo ocorrem de forma extemporânea, tendo-se em sua série poucos registros de manobras realizadas, visto que estes equipamentos não são providos de acessórios de automação como redutores de torque, fato este que dificulta consideravelmente as manobras de abertura e fechamento dos mesmos.

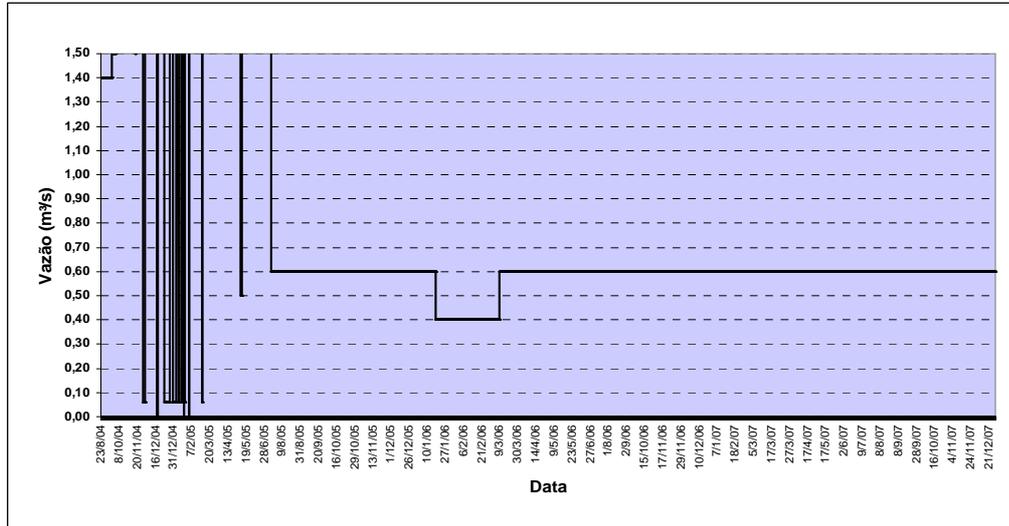


Figura 46. Série de vazões do descarregador de fundo de 400 mm.

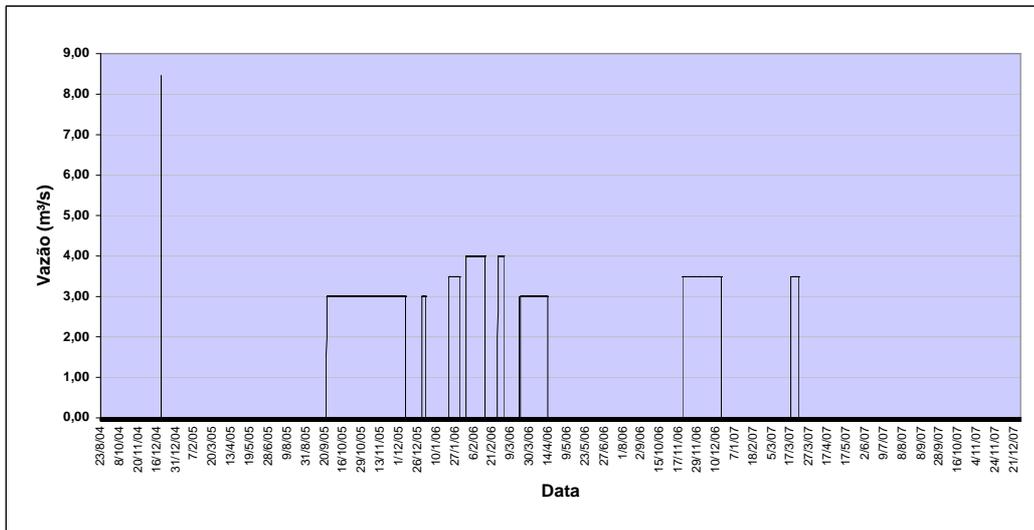


Figura 47. Série de vazões do descarregador de fundo de 800 mm

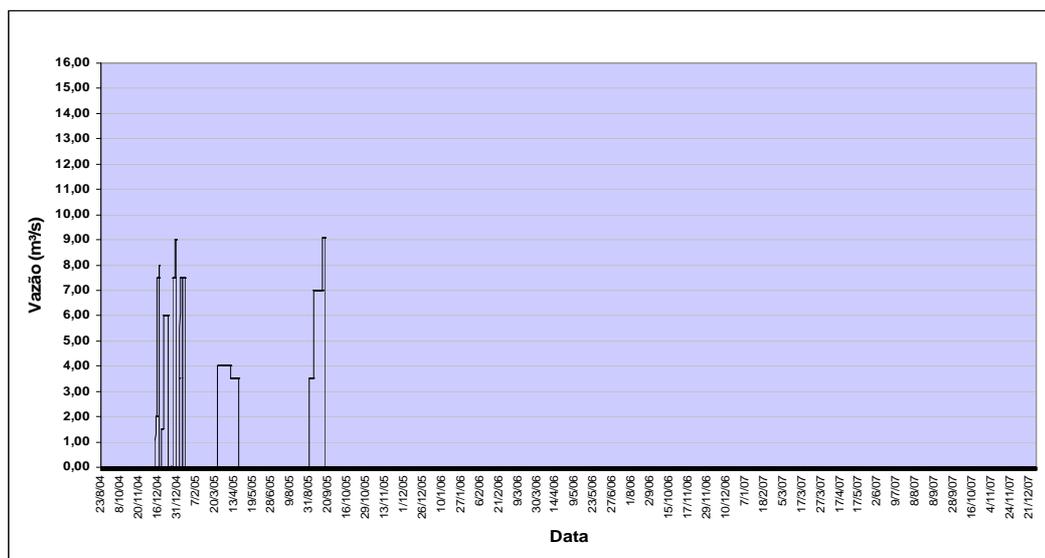


Figura 48. Série de vazões do descarregador de fundo de 1000 mm.

6.1.3.4 Vazões de vertimento

Dentre as parcelas que compõem as vazões defluentes da barragem do rio São Bento, as vazões de vertimento destacam-se sobremaneira entre os órgãos de descarga, pois apresentam os valores individualizados mais significativos no contexto das vazões defluentes registradas.

O vertedouro da barragem do rio São Bento, por caracterizar-se como do tipo soleira livre, permite que o reservatório ao atingir o nível máximo operacional promova a liberação de suas águas através do mesmo a partir da formação de volumes excedentes, ocorrência esta que comumente acontece quando em circunstâncias chuvosas que promovem descargas volumosas através da sua soleira, evidenciando-se sua capacidade de descarga em comparação à capacidade dos demais órgãos instalados

A figura 49 apresenta a série de vazões decorrentes da liberação das águas excedentes do reservatório através do vertedouro, onde registra-se a ocorrência de 28 períodos de vertimentos, tendo-se a maior vazão registrada no valor de 95 m³/s, vazão esta ocorrida em outubro do ano de 2005 em decorrência de fortes chuvas registradas.

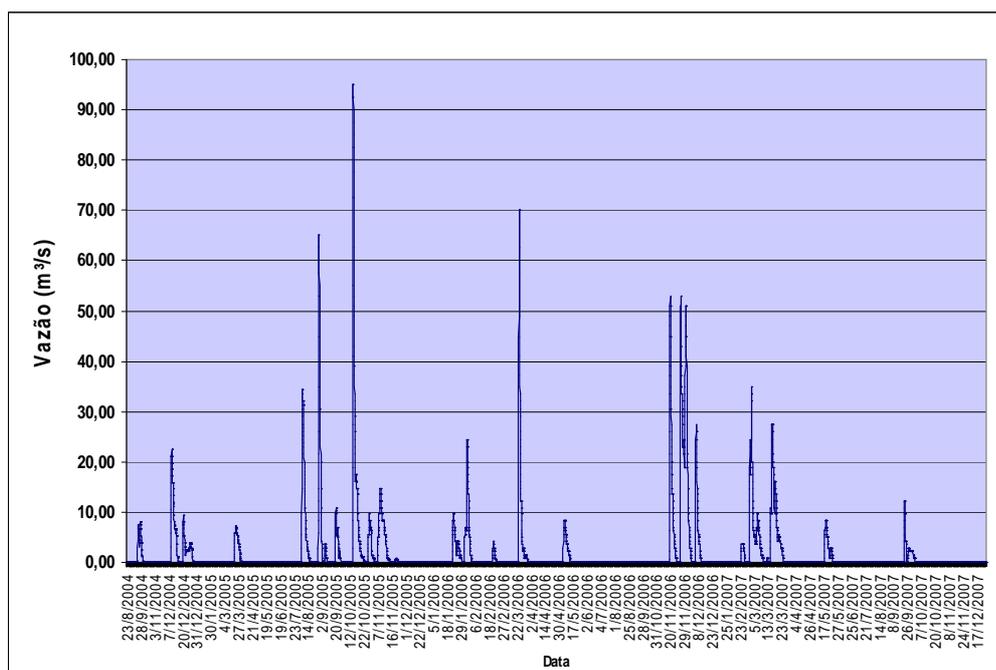


Figura 49. Série de vazões de vertimento.

A tabela 16 apresenta a caracterização de cada período de vertimento da série operacional pesquisada, agregando algumas características relativas às cotas e volumes máximos atingidos, bem como as vazões afluentes e defluentes ocorridas nos respectivos períodos.

Tabela 16. Caracterização dos períodos de vertimentos.

Ordem	Data do Início	Hora Do Início	Data do Final	Hora do Final	Duração do vertimento (dias)	Vazão Máxima de Vertimento (m³/s)	Cota Máxima Atingida (m)	Volume Vertido (hm³)	Volume Máximo atingido no Reservatório (hm³)
1º	08-mai-04	3:00	12-mai-04	12:00	8	6,30	157,59		58,95
2º	24-set-04	12:00	04-out-04	16:00	11	8,05	157,6	4,004352	59,00
3º	10-dez-04	23:00	16-dez-04	2:00	6	22,55	157,71	3,81456	59,55
4º	21-dez-04	4:00	27-dez-04	18:00	6	9,35	157,61	1,8891	59,05
5º	24-mar-05	19:00	28-mar-05	23:00	4	7,30	157,59	1,458504	58,95
6º	10-ago-05	3:00	17-ago-05	0:00	7	34,25	157,8	5,75172	60,00
7º	31-ago-05	10:00	03-set-05	19:00	3	65,00	157,94	5,7465	60,70
8º	04-set-05	6:00	05-set-05	20:00	1	3,50	157,55	0,27666	58,75
9º	20-set-05	20:00	27-set-05	2:00	7	10,90	157,63	2,48688	59,10
10º	16-out-05	8:00	23-out-05	16:00	7	95,00	158,06	10,94364	61,24
11º	28-out-05	5:00	02-nov-05	8:00	5	9,60	157,61	1,33416	59,05
12º	07-nov-05	10:00	14-nov-05	12:00	5	14,80	157,66	3,87216	59,30
13º	19-nov-05	21:00	21-nov-05	14:00	2	0,70	157,51	0,07416	58,55
14º	24-jan-06	1:00	29-nov-06	17:00	5	9,60	157,62	1,90116	59,10
15º	31-jan-06	14:00	04-fev-06	20:00	4	24,50	157,73	3,08484	59,65
16º	21-fev-06	0:00	23-fev-06	12:00	2	2,80	157,56	0,40806	58,80
17º	25-mar-06	20:00	30-mar-06	23:00	5	70,00	157,96	5,841864	60,80
18º	11-mai-06	9:00	15-mai-06	19:00	4	8,30	157,61	1,52532	59,05
19º	20-nov-06	03:00	24-nov-06	06:00	4	53,00	157,71	5,35572	59,55
20º	26-nov-06	23:00	3-dez-06	16:00	8	53,00	157,89	13,62024	60,45
21º	6-dez-06	20:00	10-dez-06	02:00	4	27,50	157,75	2,80152	59,75
22º	24-fev-07	23:00	27-fev-07	03:00	3	3,5	157,55	0,48132	58,75
23º	2-mar-07	20:00	11-mar-07	11:00	9	35	157,80	6,49548	60,00
24º	13-mar-07	16:00	14-mar-07	04:00	2	0,7	157,51	0,03024	58,55
25º	16-mar-07	22:00	24-mar-07	21:00	8	27,5	157,75	6,36372	59,75
26º	18-mai-07	03:00	23-mai-07	02:00	5	8,3	157,61	1,65492	59,05
27º	23-set-07	23:00	26-set-08	14:00	2	12,2	157,64	1,1844	59,20
28º	27-set-07	01:00	01-out-07	11:00	4	2,8	157,54	0,67032	58,70

Em análise aos dados constantes da tabela 16, denota-se que entre as vinte e oito ocorrências de vertimento registradas na barragem do rio São Bento. O 10º vertimento destaca-se por apresentar os maiores valores em relação à *vazão máxima de vertimento*, o *volume máximo* do reservatório atingido durante o evento e a *cota máxima* registrada no reservatório.

Entretanto, destaca-se que o 20º vertimento apresentou o maior volume vertido dentre todos os eventos, totalizando em um período de oito dias consecutivos de ocorrência um volume vertido de 13,62 hm³, evento pelo qual apresentou maior número de dias chuvosos se comparado ao 10º vertimento.

6.1.4 Tempo de retenção hidráulica do reservatório

Considerando-se que o processo de determinação do tempo de retenção hidráulica do reservatório tem como requisito os dados de vazões afluentes ao mesmo, bem como o volume por ele ocupado, a apresentação dos resultados até então descritos permitem a determinação do tempo de retenção hidráulica do reservatório da barragem do rio São Bento, parâmetro pelo é muito utilizado na avaliação da qualidade da água do reservatório.

Segundo Straškraba e Tundisi (2000), o tempo teórico de retenção hidráulica de um reservatório é determinado pela razão entre o volume do reservatório V e as vazões afluentes ao mesmo Q , resultando na expressão $T_{RH} = V/Q$. É atribuído a ele é também a denominação de tempo de residência, tempo de retenção hidráulica, taxa de retenção e taxa de lavagem.

O tempo teórico de retenção representa o número de dias necessários para que o reservatório atinja a sua capacidade plena. Comporta-se à medida que as precipitações e as vazões afluentes ocorrem.

Associa-se ao tempo de retenção hidráulica, às principais diferenças de qualidade de água entre os reservatórios (STRAŠKRABA; TUNDISI, 2000). Desta forma, tendo sido o mesmo utilizado como um dos parâmetros integrantes na determinação do IQAR (Índice de Qualidade de Água em Reservatórios), comumente aplicado pelo IAP – Instituto Ambiental do Paraná nas avaliações da qualidade da água dos reservatórios daquele estado, e também adotado como índice de qualidade dos reservatórios do estado de Santa Catarina, supervisionados pela FATMA – Fundação do Meio Ambiente.

Através dos dados relativos às vazões afluentes ao reservatório e seu volume máximo operacional, chegou-se à determinação do tempo de retenção hidráulica respectivo a cada mês da série operacional da barragem do rio São Bento. Denota-se, portanto, que seus valores estão relacionados diretamente às demandas de chuvas na bacia pela qual está inserido o reservatório, com seus valores comportando-se de modo inversamente proporcional aos volumes de chuva registrados mensalmente, como mostra a Tabela 19 relativa às precipitações registradas pela estação meteorológica da barragem do rio São Bento.

A tabela 17 apresenta os dados dos anos de 2005 a 2007, dos meses de janeiro a dezembro de cada ano representados através do gráfico da figura 50.

Tabela 17. Tempos de retenção hidráulica (em dias) do reservatório.

Mês/Ano	2005	2006	2007
Jan	131	68	117
Fev	103	72	77
Mar	58	52	57
Abr	116	139	153
Mai	83	142	79
Jun	285	487	578
Jul	420	299	243
Ago	40	169	235
Set	62	485	83
Out	36	194	160
Nov	62	23	157
Dez	116	68	123
TRH Médio Anual	126	183	172

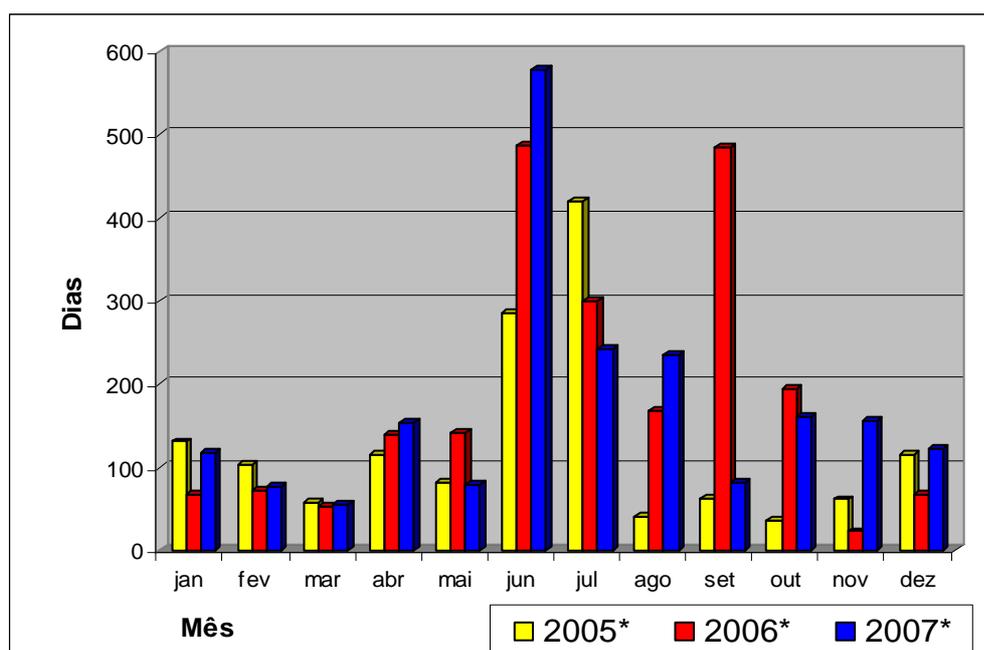


Figura 50. Tempos de retenção hidráulica no período de 2005 a 2007 nos meses de janeiro a dezembro.

Por meio da análise de correlação dos dados obtidos pela Tabela 17, obteve-se a seguinte configuração gráfica que associa as vazões afluentes do reservatório com seus respectivos tempo de retenção hidráulica, apresentado na figura 51.

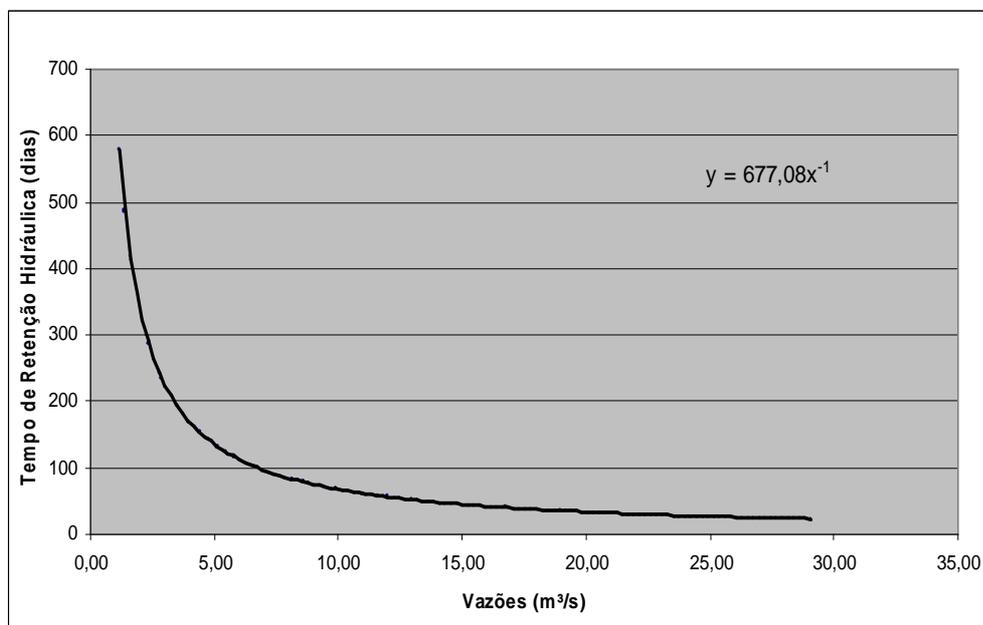


Figura 51. Curva de relação entre as vazões afluentes ao reservatório e o tempo de retenção hidráulica do reservatório da barragem do rio São Bento.

6.1.5 Vazões ecológicas

No contexto das vazões defluentes da barragem do rio São Bento, considera-se as vazões ecológicas aquelas promovidas a partir dos órgãos de descarga, subtraídas as vazões de adução, compondo-se, no entanto as descargas encaminhadas ao rio São Bento em seu trecho jusante ao reservatório.

Diferentemente da série apresentada pela figura 42, a série de vazões ecológicas são representadas através da figura 52, apresentando-se o mesmo comportamento, porém, suprimidas as vazões de adução, onde as elevações mais significativas são representadas pelos picos promovidos pelas vazões máximas de vertimento.

Os estudos elaborados no projeto básico da barragem do rio São Bento, estabelece que a vazão ecológica mínima para o rio São Bento é de 100 L/s.

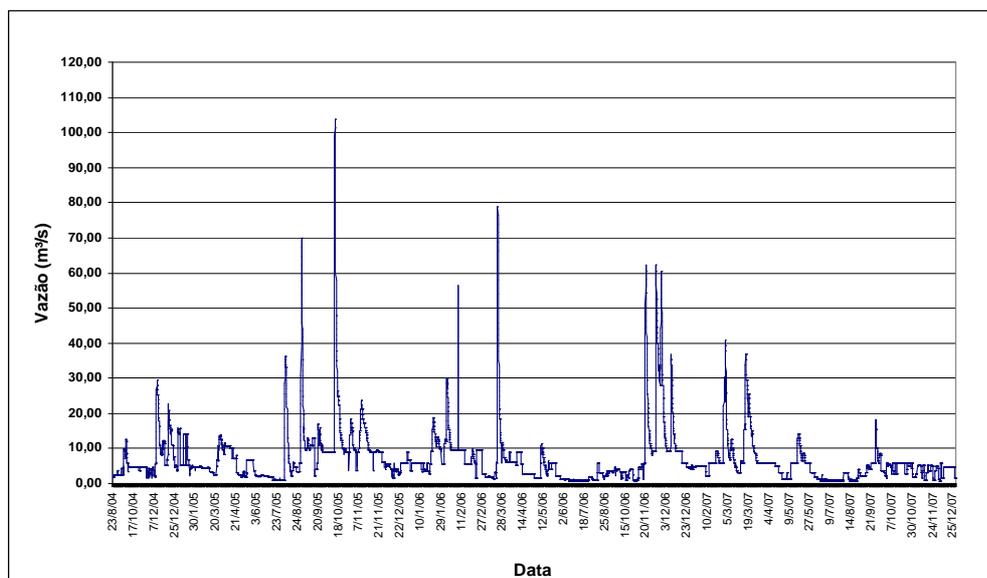


Figura 52. Série das vazões ecológicas encaminhadas ao São Bento jusante ao reservatório.

Apesar destas vazões serem consideradas ecológicas, o seu encaminhamento ao rio São Bento jusante constitui-se na água disponibilizada para a irrigação de áreas cultivadas com arroz, ocorrendo o aproveitamento máximo das mesmas durante o período de setembro ao mês de março do ano subsequente, período pelo qual compreende as fases de preparação das terras até a colheita propriamente dita.

Entende-se como vazão ecológica a quantidade de água encaminhada ao rio, através de um processo de controle determinado em razão de certas necessidades, onde incluem desde a promoção da vida aquática, navegação e a irrigação. Enfim, qualquer uso proposto de modo a promover condições de equilíbrio aos elementos da fauna íctia e a flora do rio, rio este que sofreu alterações devido a construção de obras hidráulicas, neste caso a barragem do rio São Bento. A tabela 18 apresenta os dados de vazões ocorridas no rio São Bento durante os períodos de encaminhamento de águas para a rizicultura.

Tabela 18. Vazões do rio São Bento durante os períodos com demandas para irrigação.

Período		Vazão do Rio São Bento(m ³ /s)		
		Mínima	Média	Máxima
Setembro 2004	Março 2005	1,52	6,87	29,37
Setembro 2005	Março 2006	1,32	10,18	103,89
Setembro 2006	Março 2007	0,60	9,96	67,37
Setembro 2007	Março 2008	0,60	6,43	54,87

Observa-se através dos dados de vazões médias, mínimas e máximas da série operacional nos quatro anos de demandas para a rizicultura (tabela 18), que existe uma grande amplitude entre as vazões mínimas e máximas, destacando-se que os respectivos períodos são os que apresentam as maiores vazões médias de defluências, em decorrência das demandas da rizicultura. Apesar de haver controle destas demandas, esta amplitude ocorre em duas situações: (1) Quando em ocasiões de chuvas em que o reservatório apresenta deplecionamento de seu nível as vazões defluentes são reduzidas ao máximo, de modo a aproveitar as chuvas para elevar o nível do reservatório, onde nesta situação o encaminhamento de água em grandes vazões para o rio não é necessário, pois as canchas de arroz já se encontram com nível de água ideal em decorrência destas chuvas. (2) Quando da ocorrência de chuvas com grandes volumes e que promovem os eventos de vertimento. Neste caso, sendo o vertedouro da barragem do tipo soleira livre, o comportamento das vazões de vertimento se darão em conformidade com as demandas pluviométricas na bacia durante o evento.

6.2 Dados hidrológicos

Os dados hidrológicos apresentados nesta parte da dissertação reproduzem os valores obtidos da série operacional da barragem do rio São Bento, relativos aos registros gerados pelas estações hidrológicas e meteorológica distribuídas na área da bacia hidrográfica do mesmo rio.

6.2.1 Precipitação

A tabela 19 apresenta os totais mensais e anuais dos anos de 2004 a 2007, denotando-se que novembro de 2006 apresentou o maior volume mensal registrado no valor de 561,40 mm, onde inversamente, tem-se em agosto de 2004 o mês de menor índice pluviométrico registrado com 15,80 mm.

Tabela 19. Serie de precipitações 2004 a 2007.

Meses	ANOS			
	2004	2005	2006	2007
Janeiro	224,5	134,3	322,9	221,7
Fevereiro	148,4	202,4	213,5	201,1
Março	235,5	226,1	301,9	360,8
Abril	193,2	103,7	93,1	122,5
Mai	232,5	162,1	101,8	231,2
Junho	126,0	65,0	72,2	25,8
Julho	82,5	65,2	96,8	164,0
Agosto	15,8	312,0	104,7	111,7
Setembro	260,0	195,0	39,8	194,1
Outubro	111,3	338,5	145,2	142,6
Novembro	188,8	172,4	561,4	199,2
Dezembro	225,8	204,3	140,9	196,4
Total Anual	2044,3	2181,6	2194,3	2171,3
Média Mensal	170,3	181,8	182,8	180,9

Fonte: Estação meteorológica convencional Barragem do rio São Bento.

A figura 53 representa os totais mensais de precipitação ocorridas na área da bacia da barragem do rio São Bento, descrevendo os dados contidos na tabela 19. Os totais anuais precipitados na área da barragem do rio São Bento encontram-se alocados na figura 54.

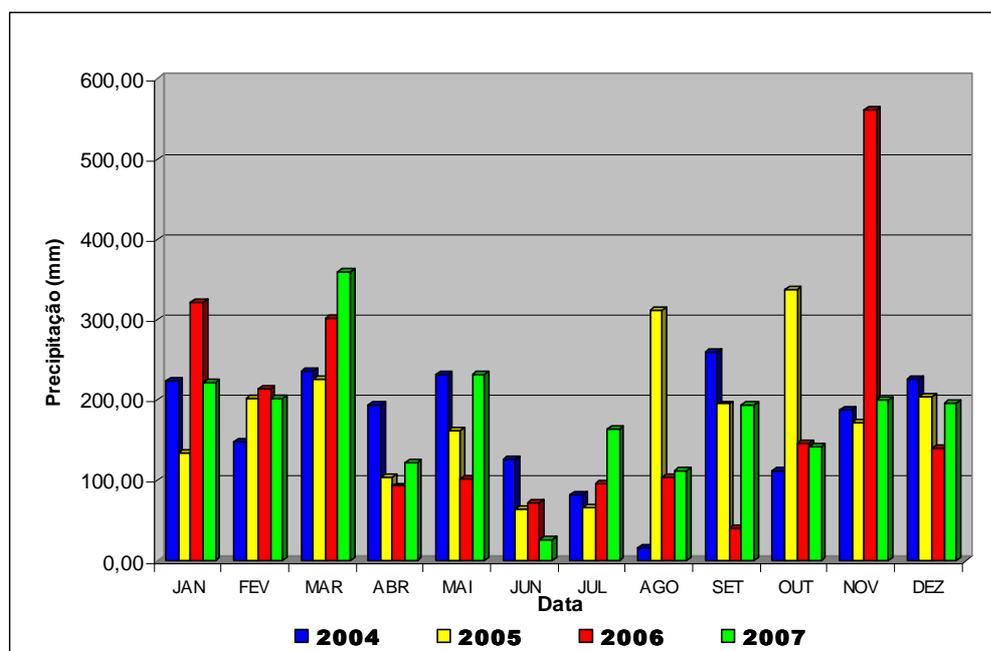


Figura 53. Totais mensais da bacia hidrográfica do rio São Bento.

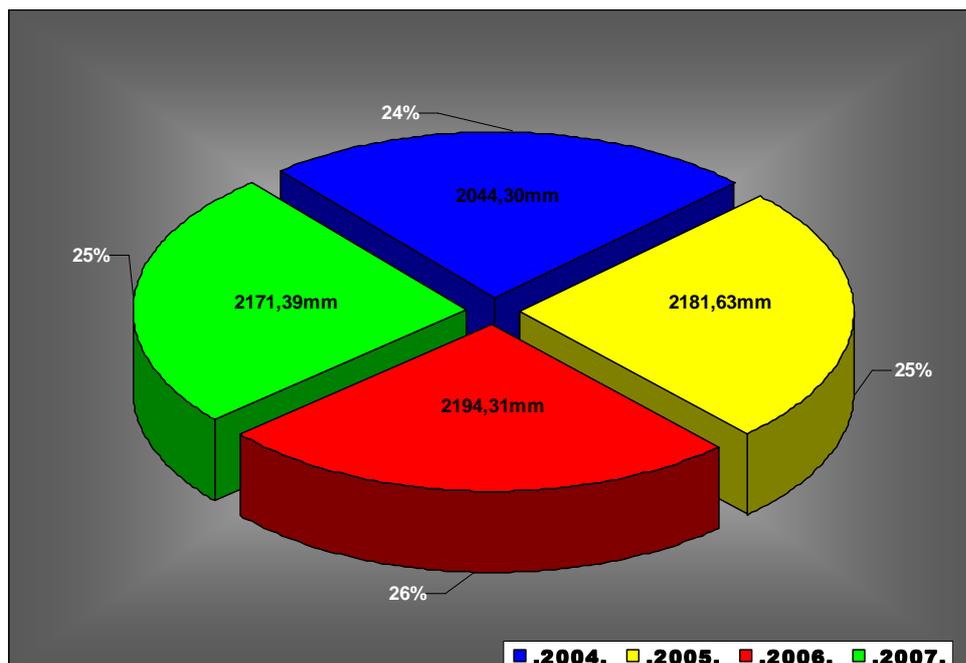


Figura 54. Totais anuais precipitados na área da barragem do rio São Bento.

Analisando-se a figura 54, observa-se que a distribuição anual das precipitações ocorridas na bacia hidrográfica do rio São Bento processa-se de forma homogênea, fato este denotado através dos valores percentuais respectivos a cada ano totalizado, em que as frações são praticamente igualadas em relação a cada ano, evidenciando quantidades de chuvas na região superiores a 2000 mm ao ano e uma média anual de 2.147,91 mm.

A tabela 20 apresenta a estatística descritiva relativa aos dados pluviométricos mensais apresentados através da tabela 19.

Tabela 20. Estatística descritiva da série de dados pluviométricos mensais.

Parâmetro	Valor
Média (mm)	178,9
Erro padrão (mm)	14,2
Mediana (mm)	180,6
Desvio padrão (mm)	98,5
Variância da amostra (mm ²)	9707,6
Curtose	3,6
Assimetria	1,2
Amplitude (mm)	545,6
Mínimo (mm)	15,8
Máximo (mm)	561,4

As precipitações médias mensais obtidas da Estação Meteorológica da barragem do rio São Bento, registradas entre os anos de 2004 e 2007, são apresentadas na tabela 21.

Tabela 21. Precipitações mensais (mm) na estação meteorológica São Bento entre 2004 e 2007.

	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Média	225,8	191,3	281,1	128,2	181,9	72,3	102,2	136,1	172,3	184,4	280,5	191,9
Máxima	322,9	213,5	360,8	193,2	232,5	126,0	164,0	312,3	260,0	338,5	561,4	225,8
Mínima	134,3	148,4	226,1	93,1	101,8	25,8	65,2	15,8	39,9	111,3	172,4	140,9

Comparando-se a série de precipitações da estação Meleiro (Tabela 4) durante os anos de 1942 a 1992, com os registros das precipitações de 2004 a 2007 obtidos da série de dados da barragem do rio São Bento (Tabela 21), verifica-se que a série operacional apresenta valores médios e mínimos ligeiramente elevados em relação à série de dados da estação Meleiro, apresentando valores médios que chegam a superar o dobro dos valores da Estação Meleiro, evidenciando-se através dos valores mínimos, que a série operacional da barragem do rio São Bento apresenta meses com valores que chegam próximos de trinta vezes superiores que os apresentados na série da estação Meleiro.

Através destas observações, denota-se que a bacia hidrográfica do rio São Bento possui um regime pluviométrico mais intenso comparativamente à série de dados que serviu de base para elaboração dos estudos preliminares da barragem do rio São Bento, pois dentro desta tendência, valores médios e mínimos maiores que a de referência, levam a concluir que a bacia pela qual insere-se a barragem do rio São Bento, apresenta índices de pluviosidade média superiores ao de projeto.

A tabela 22 apresenta as maiores precipitações ocorridas durante o intervalo de um dia registrados na Estação Meteorológica da barragem do rio São Bento durante os anos de 2004 a 2007, destacando-se a data de 26 de março do ano de 2006 com o total precipitado de 151,40 mm.

Tabela 22. Precipitações máximas diárias da barragem do rio São Bento entre 2004 e 2007

Data	Precipitação (mm)
26/03/06	151,40
20/11/06	123,60
03/03/07	100,30
12/05/04	100,00
19/11/06	89,70
27/11/06	86,60
07/12/06	83,70
14/11/06	73,10
10/08/05	67,00
16/10/05	64,90
03/08/07	63,00
09/08/05	62,50
23/03/05	59,10
06/12/07	57,10
11/12/04	57,10
07/02/06	56,40
18/05/05	55,20
01/09/05	53,50
24/03/05	50,00

Avaliando-se os dados respectivos à tabela 22, verifica-se que o ano de 2006 apresenta as maiores precipitações diárias registradas, representando 75% das ocorrências de precipitação diária registrada com volumes superiores a 70 mm.

A tabela 23 apresenta as maiores alturas de chuvas ocorridas no período de uma hora, registrados através das estações telemétricas distribuídas ao longo do reservatório da barragem do rio São Bento.

Tabela 23. Maiores alturas de chuvas ocorridas no período de uma hora.

Data/Hora	Precipitação (mm)	Estação
25/3/2006 17:00	120,0	Meteorológica
25/3/2006 18:00	63,4	São Bento Montante
18/3/2006 15:00	62,4	São Bento Jusante
2/3/2007 19:00	44,4	São Bento Jusante
6/2/2006 18:00	40,4	São Bento Jusante
2/3/2007 20:00	34,2	São Bento Jusante
25/3/2006 18:00	33,6	Meteorológica
13/3/2007 13:00	31,0	Meteorológica
13/3/2007 13:00	28,6	Meteorológica
1/11/2006 19:00	28,4	Meteorológica
7/10/2007 17:00	28,2	São Bento Jusante

Com base nos dados apresentados na tabela 23, e aplicando a equação de chuvas intensas de Urussanga ajustada com os dados do pluviógrafo (BACK, 2002), pode-se calcular o período de retorno respectivo ao valor de intensidade de 120 mm/h como sendo de 4280

anos. Esses dados reforçam a observação de Mendiondo et al. (2003) que apontam as incertezas entre as estatísticas da população e da amostra como aspectos importantes a serem observados na simulação hidrológica.

Registre-se como efeito hidráulico desta precipitação, que o nível do reservatório apresentou uma elevação de 95 cm num período de doze horas, correspondente à elevação da cota 157,01 para 157,96 metros, tendo sido observado na ocasião do evento, os maiores registros de elevações de níveis e volumes em períodos horários ocorridos na série pesquisada.

As tabelas 24 e 25 apresentam respectivamente o número de dias não chuvosos, e número de dias seguidos não chuvosos, ocorridos nos meses de janeiro a dezembro durante os anos de 2005 a 2007. Conforme descreve Uggione (2006), os referidos dados tornam-se importante dentro da aplicação da probabilidade relativa à ocorrência de períodos secos, sendo de grande utilidade em vários setores da economia. Exemplificando, o estudo pode ser aplicado à agricultura e à irrigação, onde conhecendo-se os períodos secos é possível uma grande economia de água. Também é utilizado na construção de estradas, pontes e outras obras, pois as informações sobre os períodos que serão secos ou que ocorrerão chuvas numa quantidade que não prejudique o andamento das obras, seguramente a economia será maior com relação a gasto com material, maquinário e mão-de-obra.

Tabela 24. Número de dias não chuvosos no período de 2005 a 2007.

ANO	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2005	19	9	14	15	20	22	21	18	10	7	14	8
2006	12	10	21	23	21	22	20	22	19	14	10	15
2007	12	8	9	15	16	23	21	18	17	16	20	16

Tabela 25. Número de dias seguidos não chuvosos no período de 2005 a 2007.

ANO	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2005	4	6	8	5	7	11	9	6	5	2	6	3
2006	7	3	7	8	7	9	8	11	8	5	5	4
2007	4	3	4	7	7	15	7	9	13	6	6	5

6.2.2 Evaporação

Os dados relativos à evaporação da bacia hidrográfica do rio São Bento são apresentados na tabela 26, dados estes obtidos das leituras efetuadas diariamente através do Tanque Classe A instalado nas dependências da estação meteorológica da barragem do rio São Bento. Os respectivos dados são graficamente representados através da figura 55.

Tabela 26. Evaporação em milímetros ocorrida no período de 2004 a 2007.

Meses	ANOS		
	2005	2006	2007
Janeiro	161	175	160
Fevereiro	137	119	117
Março	155	134	72
Abril	80	104	90
Mai	94	73	78
Junho	61	62	69
Julho	89	84	65
Agosto	128	115	75
Setembro	97	104	106
Outubro	97	126	114
Novembro	138	154	160
Dezembro	153	145	163
Total Anual	1389	1395	1271
Média Mensal	116	116	106

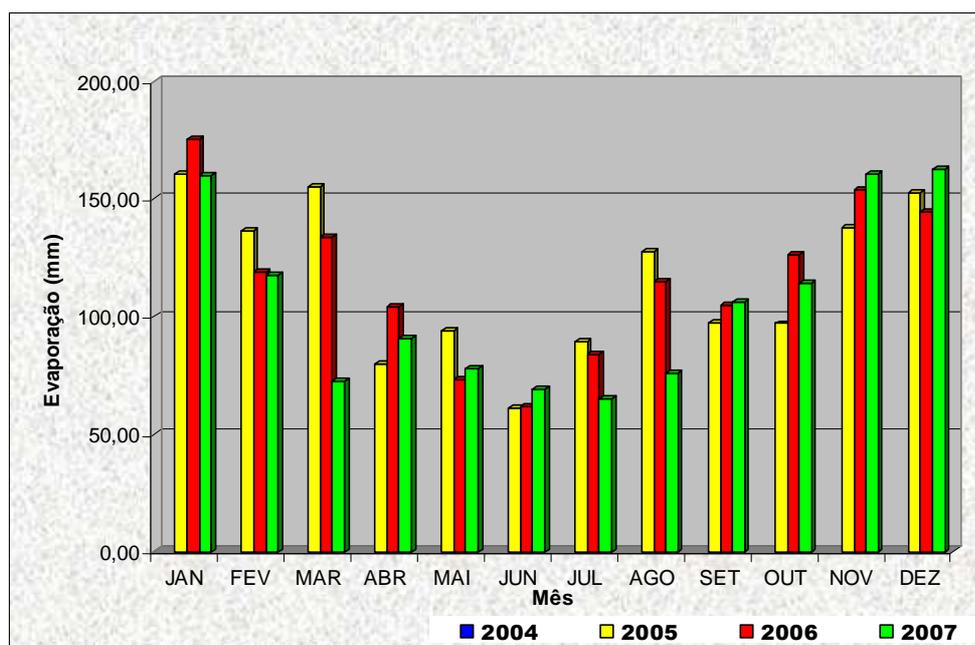


Figura 55. Evaporações ocorridas nos anos de 2005 a 2007.

Tem-se através da tabela 27, a estatística descritiva dos dados de evaporação registrados na barragem do rio São Bento.

Tabela 27. Estatística descritiva dos dados de evaporação de 2005 a 2007.

Parâmetro	Valor
Média (mm)	112,61
Erro padrão (mm)	5,69
Mediana (mm)	110,20
Desvio padrão (mm)	34,15
Variância da amostra (mm ²)	1166,09
Curtose	-1,23
Assimetria	0,16
Amplitude (mm)	114,35
Mínimo (mm)	60,98
Máximo (mm)	175,33

Considerando-se os dados de evaporação registrados entre os anos de 2005 e 2007 apresentados na tabela 26, obtém-se através da metodologia adotada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico, a evaporação no lago (E_{LAGO}), evaporação pela qual é estimada em 70% da evaporação registrada no tanque classe A (E_{TANQUE}), e apresentada na tabela 28.

Tabela 28. Valores de E_{TANQUE} e E_{LAGO} para o aproveitamento da barragem do rio São Bento.

Ano	Localização	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
2005	ETANQUE	161	137	155	80	94	61	89	128	97	97	138	153	1389
	ELAGO	113	96	108	56	66	43	62	89	68	68	97	107	972
2006	ETANQUE	175	119	134	104	73	62	84	115	104	126	154	145	1395
	ELAGO	123	83	94	73	51	43	59	80	73	89	108	101	976
2007	ETANQUE	160	117	72	90	78	69	65	75	106	114	160	163	1271
	ELAGO	112	82	51	63	54	48	45	53	74	80	112	114	889

6.2.3 Níveis de rios

Os registros relativos aos níveis dos rios São Bento Montante, Serrinha e São Bento Jusante, são apresentados neste módulo do trabalho, sendo os mesmos obtidos dos dados telemétricos gerados pelas estações hidrológicas instaladas nos respectivos rios durante os anos de 2005 a 2007, considerando-se portanto, que o início da geração de dados telemétricos deu-se a partir do segundo semestre do ano de 2005, quando da oportunidade da instalação das respectivas estações.

Embora exista uma base de dados de níveis de rios bastante extensa, encontrou-se dificuldades de se estabelecer a curva-chave dos rios São Bento Montante e Serrinha, visto que a hidrodinâmica característica dos respectivos rios apresenta variabilidade à medida que ocorrem vazões de alta magnitude, alterando frequentemente as seções dos mesmos, impedindo desta forma o estabelecimento das curvas-chaves respectivas.

Entretanto, quanto ao rio São Bento Jusante, a curva-chave foi encontrada através do estudo de correlação dos dados de níveis do rio com os dados de vazão ecológica, visto que o mesmo apresenta uma seção estável, apesar de possuir uma hidrodinâmica variável e controlada pelo processo operacional da barragem do rio São Bento.

6.2.3.1 Nível do rio São Bento montante

Os níveis máximos registrados no rio São Bento em sua porção montante ao reservatório da barragem do rio São Bento são apresentados através da tabela 29, apresentando suas maiores elevações nos anos de 2005 e 2006.

Tabela 29. Níveis do rio São Bento Montante em centímetros.

Valores	ANOS		
	2005	2006	2007
Médio	44,02	34,19	39,47
Máximo	165,00	165,00	143,00
Mínimo	18,00	3,00	9,00

6.2.3.2 Nível do rio Serrinha

Os níveis do rio Serrinha são apresentados através da tabela 30, onde registra-se suas maiores elevações anos de 2005 e 2006, apresentando uma média considerada uniforme ao longo dos anos pesquisados.

Tabela 30. Níveis do rio Serrinha em centímetros.

Valores	ANOS		
	2005	2006	2007
Médio	47,16	50,01	54,21
Máximo	181,00	181,00	118,00
Mínimo	17,00	35,00	39,00

6.2.3.3 Nível do rio São Bento jusante

A tabela 31 apresenta os registros dos níveis do rio São Bento em sua porção jusante ao reservatório da barragem do rio São Bento, onde verifica-se sua máxima elevação no ano de 2005, ano pelo qual ocorreu a maior elevação do nível do reservatório, que consequentemente gerou a maior vazão de vertimento da série histórica operacional daquela unidade.

Através da mesma tabela 31, observa-se que o rio São Bento jusante apresenta uma média anual de nível sem poucas oscilações visto que a regularização das vazões defluentes do reservatório são promovidas através do controle operacional da barragem do rio São Bento.

Tabela 31. Níveis do rio São Bento jusante em centímetros.

Valores	ANOS		
	2005	2006	2007
Médio	56,16	57,24	56,47
Máximo	191,00	181,00	125,00
Mínimo	16,00	33,00	31,00

6.2.4 Vazões afluentes

As vazões afluentes ao reservatório da barragem do rio São Bento ocorrem através das afluições promovidas pelo escoamento superficial da bacia hidrográfica do rio São Bento

em sua porção montante ao reservatório. Estas afluições são promovidas em grande parte pelas vazões dos rios São Bento e Serrinha, onde estes representam aportes de 60 e 40% respectivamente (CASAN, 2003).

Através do balanço hídrico efetuado a partir do controle hidráulico do reservatório, estas vazões são determinadas por meio dos dados das vazões de acumulação do reservatório e das vazões dos órgãos de descarga, obtendo-se do somatório destas parcelas, a determinação das vazões afluentes ou contribuintes ao reservatório.

A figura 56 apresenta o hidrograma representativo da série de vazões afluentes da barragem do rio São Bento, calculadas a partir do controle hidráulico do reservatório, procedimento este que define o seu balanço de massa.

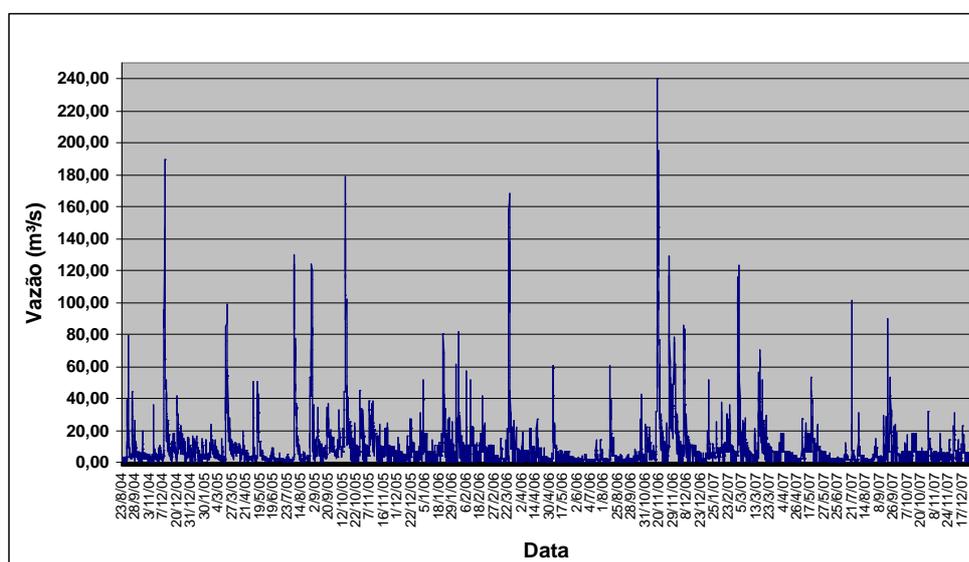


Figura 56. Hidrograma das vazões afluentes ao reservatório.

Através dos dados da série operacional buscou-se elaborar a estatística descritiva dos dados de vazões afluentes ao reservatório, dados estes demonstrados na tabela 32.

Tabela 32. Estatística descritiva das vazões afluentes ao reservatório.

Parâmetro	Valor
Média (m^3s^{-1})	8,66
Erro padrão (m^3s^{-1})	0,14
Mediana (m^3s^{-1})	5,13
Modo (m^3s^{-1})	10,24
Desvio padrão (m^3s^{-1})	15,15
Variância da amostra (m^3s^{-1}) ²	229,61
Curtose	54,35
Assimetria	6,03
Máximo (m^3s^{-1})	239,98

A Figura 57 apresenta a curva de permanência dos dados das vazões afluentes ocorridas de o mês de agosto do ano de 2004 a dezembro de 2007, onde verifica-se que valores superiores a vazão média afluente de 8,66 m³/s possuem frequência de ocorrência a 50% da série estudada.

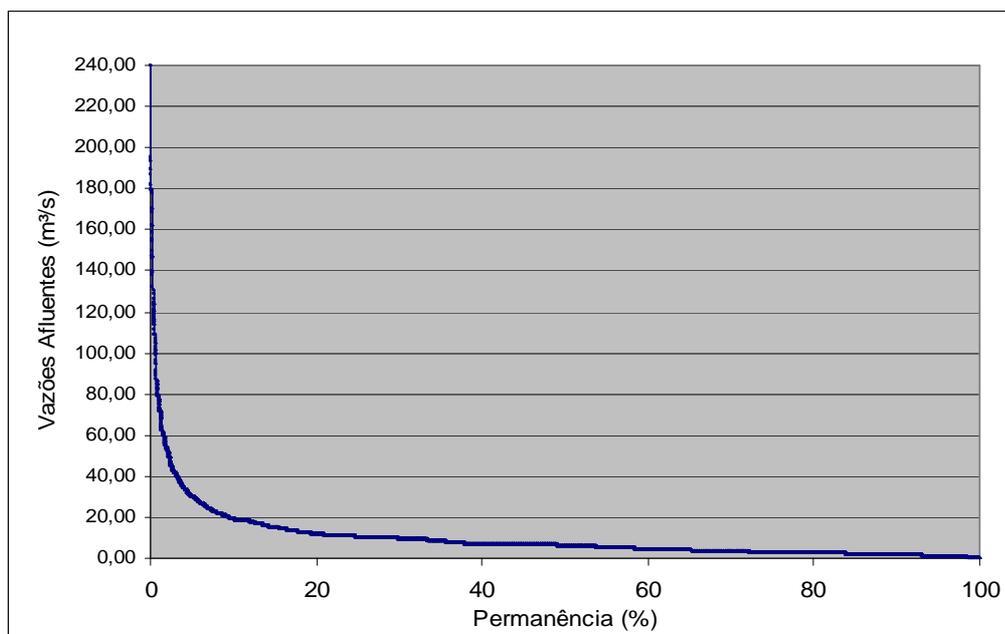


Figura 57. Curva de permanência das vazões afluentes ao reservatório.

A tabela 33 apresenta os dados relativos às vazões afluentes registradas na série operacional da barragem do rio São Bento no período de agosto de 2004 a dezembro de 2007.

Tabela 33. Vazões afluentes ao reservatório.

	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Média	6,95	8,27	12,11	5,05	7,17	1,65	2,22	6,30	7,63	7,54	11,96	9,00	7,15
Máxima	79,90	82,03	168,65	26,85	60,78	9,00	18,35	130,06	89,99	179,31	239,98	189,31	106,18

Comparando-se os dados das tabelas 5 e 33, verifica-se que a série operacional da barragem do rio São Bento apresenta valores relativamente superiores aos dados que serviram de base para a elaboração do projeto da mesma.

Tomando-se como parâmetro as vazões máximas, verifica-se que ocorrem diferenças que superam aproximadamente vinte vezes o valor da vazão de projeto, como é o caso da vazão máxima do mês de novembro relativa às afluições do reservatório, ou seja, enquanto que a série de projeto apresenta em novembro uma vazão máxima de 12,05 m³/s, a série

operacional 2004 a 2007 apresenta no mesmo mês uma vazão máxima de 239,98 m³/s, uma diferença equivalente a 19,9 vezes.

Esta observação permite inferir que a metodologia adotada por meio da transposição das vazões do posto Forquilha determinou a estimativa de vazões inferiores às observadas na bacia hidrográfica do rio São Bento, levando a concluir que a realidade operacional deste empreendimento demonstra que a bacia hidrográfica do rio São Bento possui potencial hídrico superior às vazões estabelecidas para o seu projeto, fato este que leva a deduzir que a capacidade de suprimento de água da barragem do rio São Bento está muito além daquela definida em sua concepção.

6.2.5 Escoamento superficial

Através dos dados relativos às precipitações e às vazões afluentes ao reservatório, buscou-se determinar os coeficientes superficiais mensais, onde para isto se procedeu a conversão das vazões afluentes obtidas do balanço hídrico do reservatório em volumes precipitados, considerando-se a área da bacia do rio São Bento em 113,79 km². Diante disto, buscou-se definir a razão entre as precipitações ocorridas na bacia e os volumes obtidos, determinando-se os respectivos coeficientes superficiais mensais através da tabela 34.

Tabela 34. Coeficientes superficiais mensais obtidos através da série operacional.

Meses	ANOS		
	2005	2006	2007
Jan	0,91	0,72	0,61
Fev	0,69	0,94	0,93
Mar	1,21	0,99	0,78
Abril	1,29	1,19	0,82
Mai	1,19	1,10	0,87
Jun	0,83	0,44	1,04
Jul	0,58	0,55	0,40
Ago	1,26	0,90	0,59
Set	1,28	0,80	0,96
Out	1,32	0,57	0,70
Nov	1,45	1,18	0,49
Dez	0,67	1,66	0,66
Anual	1,06	0,92	0,74

Denota-se que alguns coeficientes apresentaram valores superiores a um, representando portanto que a distribuição de pluviômetros na área da bacia hidrográfica do rio São Bento pode ser um fator interveniente no processo de estabelecimento destes coeficientes, uma vez que, expandindo-se o número de pluviômetros distribuídos na bacia, maior será a precisão destes valores.

Através dos valores obtidos, conclui-se que o coeficiente de escoamento superficial médio da bacia hidrográfica do rio São Bento é 0,90.

Torna-se importante o conhecimento das características morfométricas da bacia hidrográfica do rio São Bento, pois através das mesmas pode-se fundamentar de modo mais consistente os fatores que regem o escoamento superficial produzido na mesma.

6.3 Análise e correlações

6.3.1 Generalidades

Ao agrupar o conjunto de dados hidráulicos e hidrológicos da série operacional da barragem do rio São Bento gerada durante os anos de 2004 a 2007, permitiu-se estabelecer o nível de relação entre as diversas variáveis hidráulicas e hidrológicas, de modo que se pôde determinar o grau de correlação entre as mesmas, e permitir que se produzisse análises de relação causa-efeito dos processos atuantes na bacia de contribuição ao reservatório da barragem do rio São Bento. Dentre o conjunto de análises possíveis de serem elaboradas, a tabela 35 apresenta as características dos respectivos dados, bem como a finalidade do estudo destas correlações.

Tabela 35. Processos e variáveis do estudo de correlações.

Processos/Variáveis	Atributo do dado	Objetivo/finalidade
Nível dos Rios São Bento Montante x Serrinha	Hidrometeorológicos	Verificação da distribuição da precipitação na bacia e comportamento relacional entre os dois rios
Vazões Afluentes X Nível dos Rios Precipitação X Nível dos rios	Hidráulicos e Hidrometeorológicos	Simulação de afluências em função dos níveis dos rios.
Nível do Reservatório (cota) X	Hidrometeorológicos	Determinação do modelo correspondente
Volume do Reservatório Vazão de vertimento X	Hidráulicos	Determinação do modelo correspondente
Vazão afluente Vazão de vertimento X	Hidráulicos	Determinação da capacidade de amortecimento das vazões afluentes
Cota do reservatório Precipitação X	Hidráulicos	Determinação do modelo correspondente
Vazões afluentes Evaporação X Precipitação	Hidrometeorológicos e Hidráulicos	Determinação do modelo Precipitação-Vazão
Vazões Defluentes X Níveis do Rio São Bento Jusante	Hidrometeorológicos	Determinação do percentual de evaporação com relação às chuvas.
	Hidráulicos e Hidrometeorológicos	Determinação da curva chave do rio São Bento Jusante

6.3.2 Correlação entre os níveis dos rios São Bento montante e Serrinha

Ao iniciar os trabalhos relativos às análises de correlação, primeiramente procurou-se avaliar o grau de relação entre os níveis dos rios São Bento montante e Serrinha, rios pelos quais abastecem o reservatório da barragem do rio São Bento, onde através da série de dados telemétricos dos respectivos rios, buscou-se identificar os períodos que apresentaram picos de elevação ocasionados por precipitações incidentes nas áreas localizadas à montante do reservatório, onde, agrupou-se em cada período, os dados relativos aos níveis dos rios no transcorrer das respectivas datas e horas do evento.

Para tanto, após o agrupamento dos dados procedeu-se a confecção dos gráficos relativos aos períodos pesquisados, gráficos estes que descrevem o comportamento e a

evolução dos rios à medida que ocorre a precipitação. Em seguida, através da análise de regressão, pôde-se obter a curva ajustada aos pontos plotados, fornecendo deste modo a equação de regressão, o coeficiente de determinação R^2 e o coeficiente de correlação R .

Dentro da série de dados levantados, pôde-se elencar todos os períodos em que houve as referidas elevações, porém, devido a problemas relacionados às falhas técnicas das estações telemétricas São Bento montante e Serrinha respectivamente, falhas estas relacionadas a transmissão de dados, problemas em equipamentos e até mesmo alimentação de energia destas estações, observou-se em certos períodos algumas inconsistências relativas a geração destes dados, havendo portanto, dados em alguns períodos de uma estação, enquanto que em outra não se dispunha de dado nenhum e vice e versa, não permitindo deste modo, realizar as análises de correlação de todos os períodos de pico referentes a série operacional completa.

No contexto geral dos dados referentes aos níveis dos rios São Bento montante e Serrinha, conseguiu-se agrupar quarenta e um períodos, períodos pelos quais permitiram a elaboração da análise de correlação. Na análise de regressão foram testados os modelos linear, exponencial, potência e polinomial de grau dois a seis, tendo como modelo adotado neste trabalho o modelo polinomial de grau dois.

Dentre os períodos analisados, várias configurações gráficas foram obtidas das elevações dos rios São Bento montante e Serrinha, onde as figuras 58, 59, 60 e 61, representam hidrogramas com um, dois, três e quatro picos de elevação respectivamente, caracterizando variações das precipitações e conseqüentes efeitos sucessivos nos níveis dos respectivos rios.

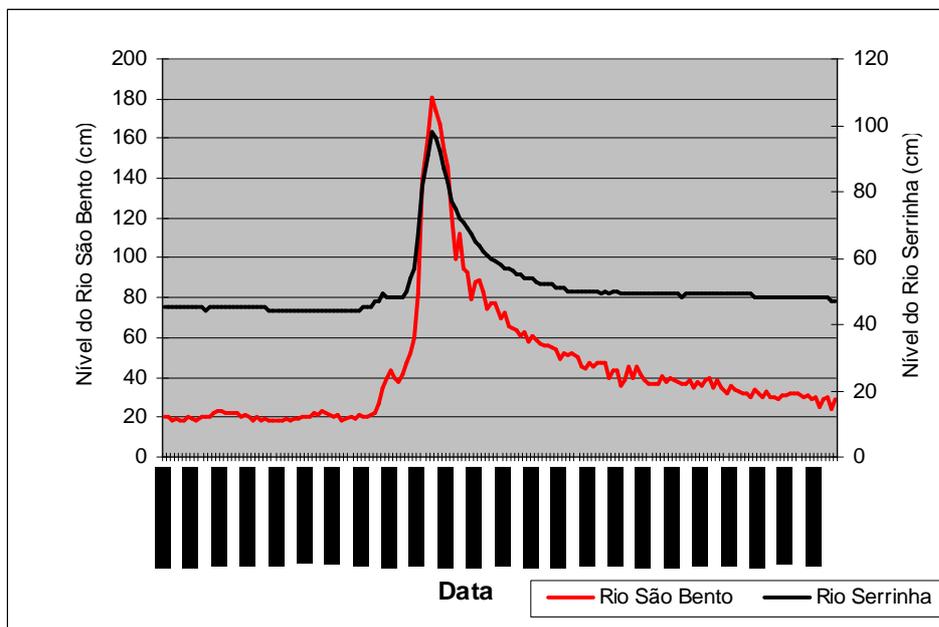


Figura 58. Período com ocorrência de apenas um pico de elevação dos rios.

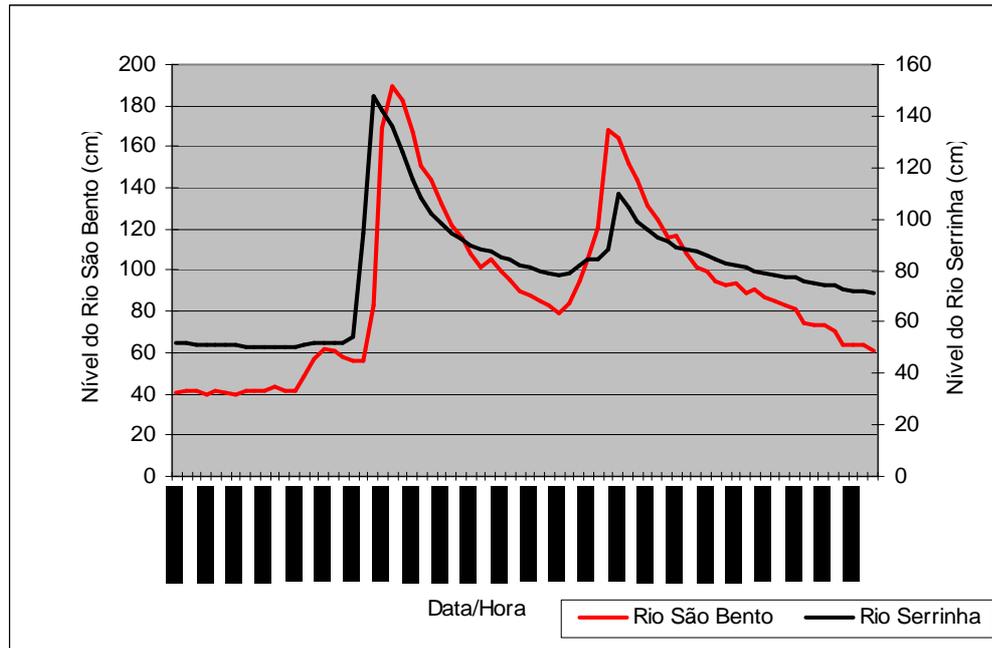


Figura 59. Período com ocorrência de dois picos de elevação dos rios.

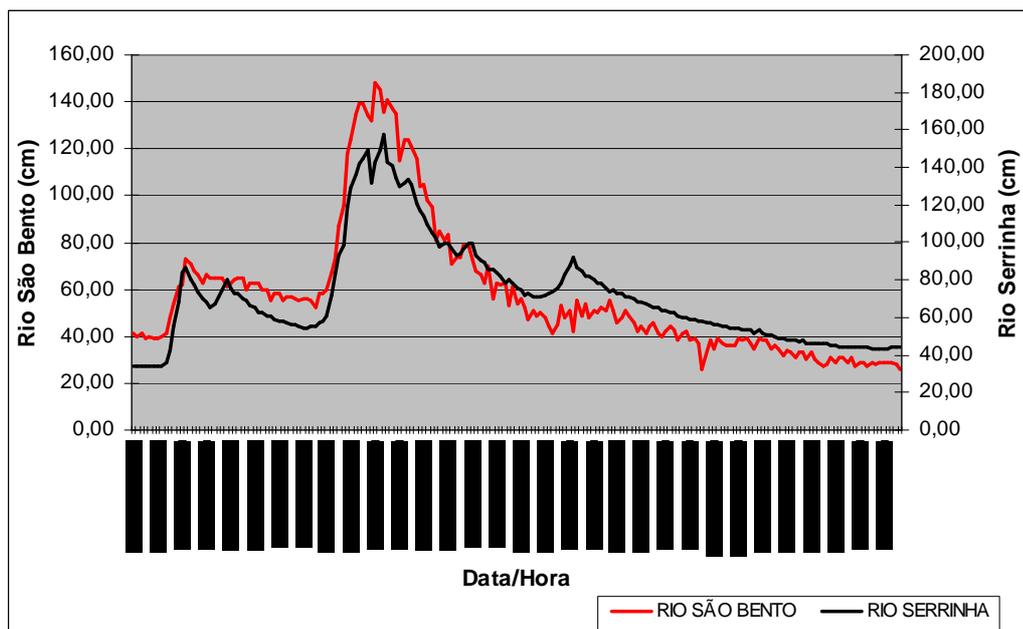


Figura 60. Período com ocorrência de ocorre três picos de elevação dos rios.

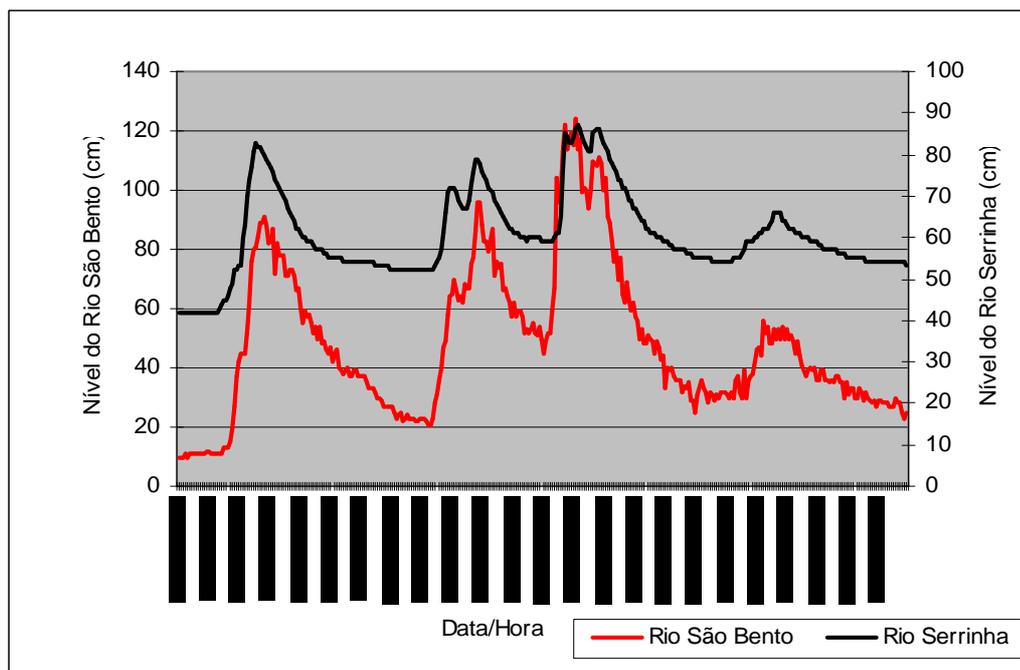


Figura 61. Período com ocorrência de quatro picos de elevação dos rios.

A tabela 36 apresenta os períodos analisados, onde respectivamente são apresentados os coeficientes de determinação e de correlação, bem como a classificação referente ao nível de correlação encontrado.

Tabela 36. Coeficientes e classificação dos períodos analisados das elevações dos rios São Bento montante e Serrinha.

Seqüência	Período		Determinação	Correlação	Classificação de R
	Data Inicial	Data Final	R ²	R	
1	8-mai-05	11-mai-05	0,9011	0,94926	Ótima
2	22-jul-05	29-jul-05	0,872	0,93381	Ótima
3	7-ago-05	18-ago-05	0,9426	0,97088	Ótima
4	30-ago-05	3-set-05	0,9784	0,98914	Ótima
5	4-set-05	7-set-05	0,9428	0,97098	Ótima
6	26-set-05	27-set-05	0,9046	0,95110	Ótima
7	4-out-05	13-out-05	0,4515	0,67194	Medíocre
8	14-out-05	21-out-05	0,9428	0,97098	Ótima
9	17-nov-05	22-nov-05	0,8903	0,94356	Ótima
10	1-dez-05	21-dez-05	0,6394	0,79962	Razoável
11	1-fev-06	5-fev-06	0,7044	0,83929	Boa
12	10-fev-06	12-fev-06	0,5284	0,72691	Razoável
13	19-fev-06	24-fev-06	0,712	0,84380	Boa
14	9-mar-06	13-mar-06	0,8108	0,90044	Ótima
15	20-mar-06	23-mar-06	0,5444	0,73783	Razoável
16	25-mar-06	28-mar-06	0,9237	0,96109	Ótima
17	9-abr-06	14-abr-06	0,8467	0,92016	Ótima
18	4-out-06	14-out-06	0,759	0,87121	Boa

...continuação

...continuação

19	16-out-06	19-out-06	0,6961	0,83433	Boa
20	20-out-06	25-out-06	0,9255	0,96203	Ótima
21	1-jan-06	3-nov-06	0,7287	0,85364	Boa
22	11-nov-06	14-nov-06	0,5803	0,76177	Razoável
23	27-nov-06	28-nov-06	0,9389	0,96897	Ótima
24	28-nov-07	3-fev-07	0,8996	0,94847	Ótima
25	10-fev-07	14-fev-07	0,9076	0,95268	Ótima
26	2-mar-07	4-mar-07	0,7504	0,86626	Boa
27	7-mar-07	8-mar-07	0,8359	0,91428	Ótima
28	16-mar-07	28-mar-07	0,6757	0,82201	Boa
29	15-abr-07	30-abr-07	0,7782	0,88216	Boa
30	6-mai-07	11-mai-07	0,9161	0,95713	Ótima
31	13-mai-07	16-mai-07	0,9229	0,96068	Ótima
32	17-mai-07	22-mai-07	0,9042	0,95089	Ótima
33	7-jul-07	13-jul-07	0,933	0,96592	Ótima
34	20-jul-07	26-jul-07	0,9803	0,99010	Ótima
35	2-ago-07	5-ago-07	0,9545	0,97699	Ótima
36	31-ago-07	4-set-07	0,6356	0,79725	Razoável
37	16-set-07	20-set-07	0,9126	0,95530	Ótima
38	20-set-07	22-set-07	0,9128	0,95541	Ótima
39	23-set-07	25-set-07	0,8342	0,91335	Ótima
40	26-set-07	29-set-07	0,8659	0,93054	Ótima
41	16-set-07	29-set-07	0,893	0,94499	Ótima

Dentro do conjunto dos períodos analisados, verifica-se que 100% destes apresentaram níveis de correlação considerados razoáveis a ótimos, resultados que levam a prognosticar que os rios São Bento montante e Serrinha possuem relação direta aos efeitos das precipitações que ocorrem na bacia do rio São Bento, pois o comportamento de seus níveis apresentam uma certa sincronia nas suas respectivas elevações, apresentando graus de correlação considerados entre bom e ótimo em 85,36% dos períodos estudados, segundo a classificação preconizada por Milone (2006) e apresentada na tabela 37.

Embora os níveis de correlação vislumbram resultados promissores, denota-se que a distribuição das chuvas na área a montante do reservatório da barragem do rio São Bento não se processa homogeneamente, haja vista que em nenhum período estudado apresentou coeficiente de correlação igual a um, evidenciando portanto que as precipitações distribuem-se na bacia de modo não uniforme.

Tabela 37. Número de ocorrências e sua respectiva classificação.

Ocorrência	Classificação	%
27	Ótima	65,85
8	Boa	19,51
6	Razoável	14,63

6.3.3. Correlação entre os níveis do reservatório e as vazões de vertimento

Através dos dados do balanço hídrico do reservatório, buscou-se relacionar as vazões vertidas com os níveis do reservatório registrados na série operacional da barragem do rio São Bento entre agosto de 2004 a dezembro de 2007.

Apesar da equipe operacional daquela unidade utilizar a tabela de valores dos níveis do reservatório e suas respectivas vazões de vertimento definidas pelo Manual de Operação do Reservatório, buscou-se relacionar estas duas variáveis como oportunidade de encontrar um modelo que identificasse esta relação, modelo este que vem de encontro à futura aplicabilidade em rotinas de simulação em programa para operação daquele empreendimento.

Os vários períodos de vertimento ocorridos ao longo da série operacional são demonstrados através da figura 62, evidenciando-se que as linhas apresentam um forte sincronismo nas suas evoluções, visto que à medida em que ocorre a elevação da cota do reservatório, as vazões de vertimento comportam-se de modo diretamente proporcional.

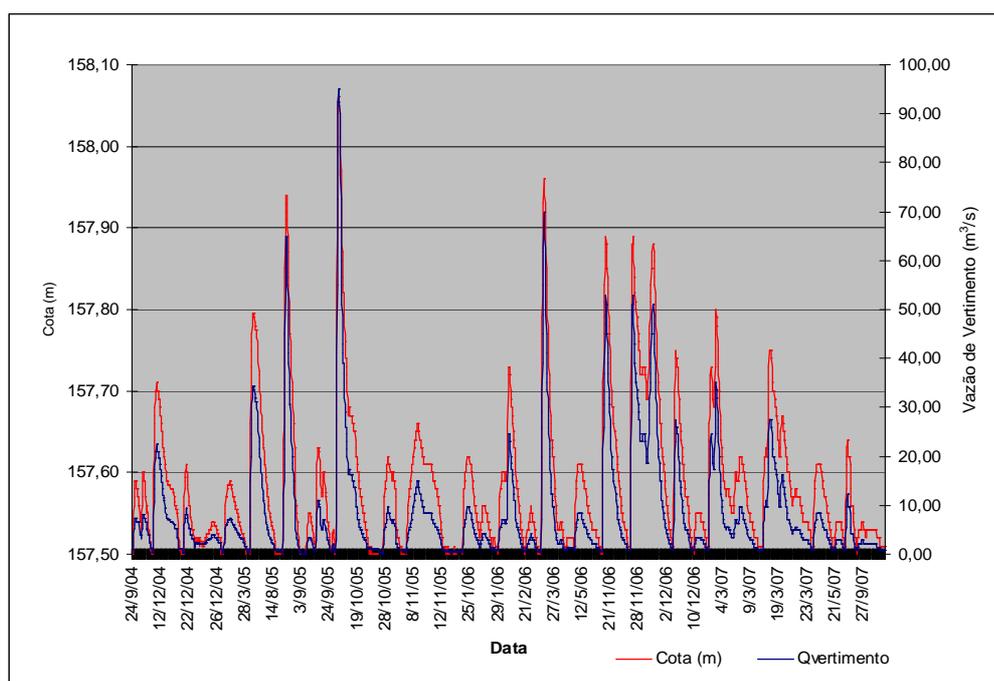


Figura 62. Evolução das cotas do reservatório e as respectivas vazões de vertimento.

A figura 63 apresenta o modelo ajustado da relação cota do reservatório e as vazões defluentes registradas na série operacional.

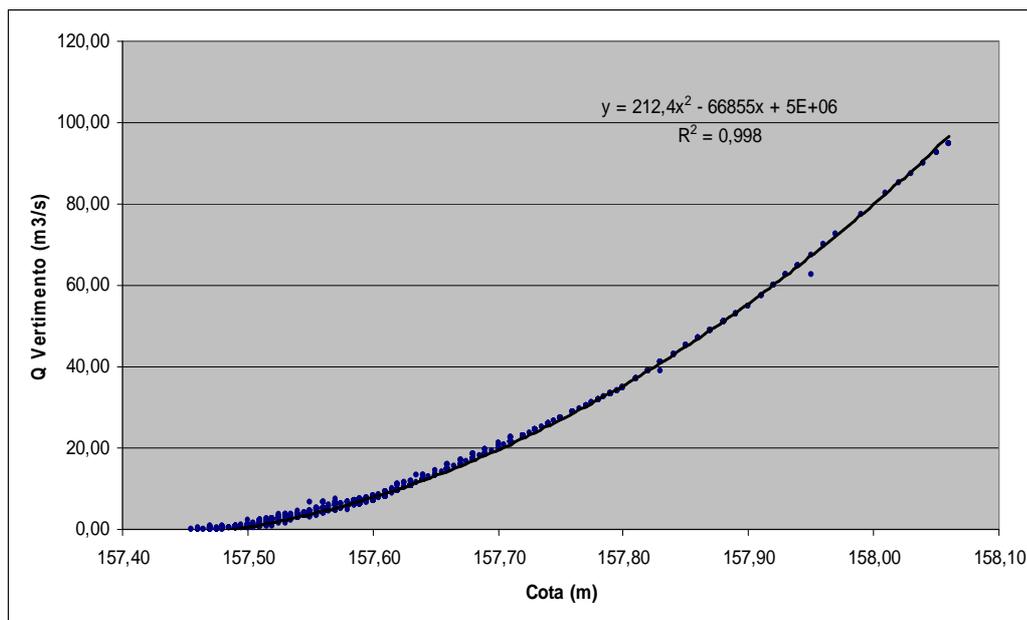


Figura 63. Curva gerada da análise de regressão entre as cotas do reservatório e as vazões de vertimento.

6.3.4 Correlação entre os níveis e os volumes do reservatório

Buscou-se através da série operacional correlacionar os níveis do reservatório com os respectivos volumes registrados no formulário do controle hidráulico do reservatório, cotas e volumes estes encontrados no Manual de Operação do Reservatório utilizado pela equipe operacional.

Através dos registros constantes do Manual de Operação do Reservatório, a figura 64 representa a evolução destes parâmetros ao longo da série operacional, denotando que o comportamento do volume do reservatório responde diretamente aos valores das cotas do reservatório.

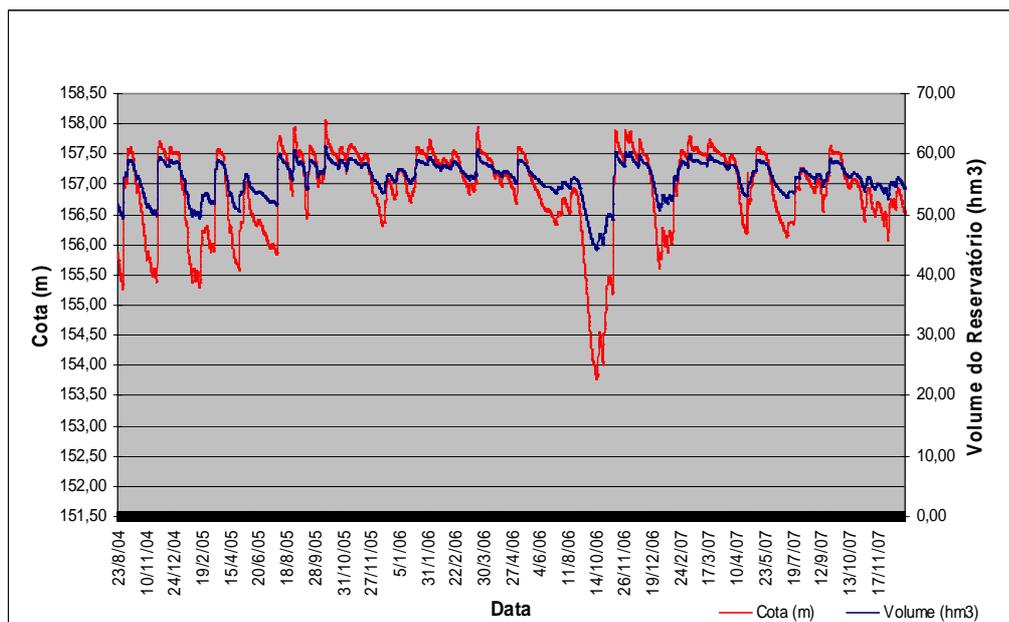


Figura 64. Evolução dos níveis e volumes do reservatório.

Visto que o referido manual não dispõe do modelo de regressão que descreve as observações destes parâmetros, a figura 65 representa o diagrama de dispersão dos dados observados, bem como do modelo que descreve esta relação uma equação polinomial de grau dois, com o respectivo coeficiente de determinação no modelo linear de valor 0,9975.

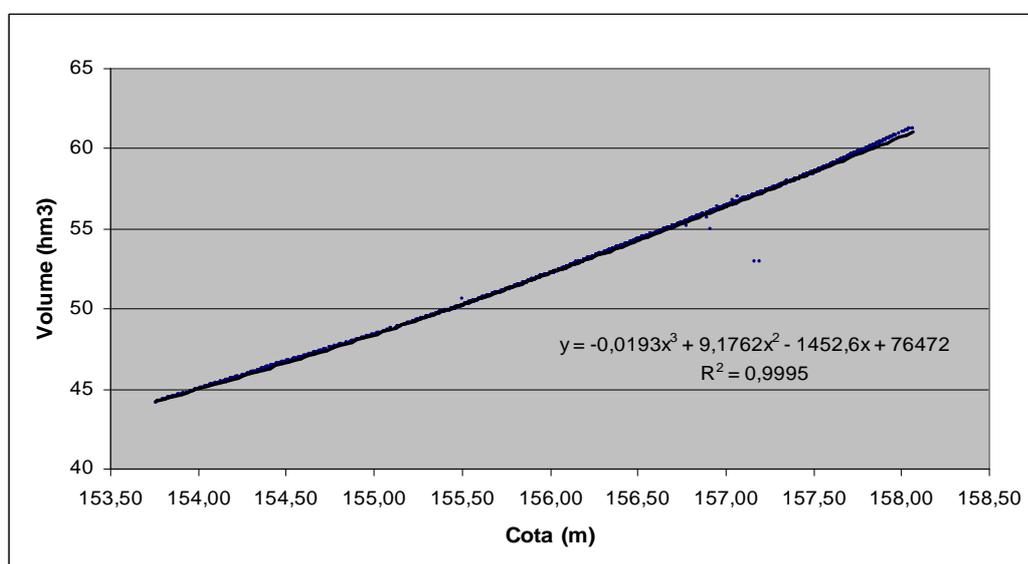


Figura 65. Curva gerada da análise de regressão entre as cotas e os volumes do reservatório.

6.3.5 Correlação entre os dados dos níveis e as áreas da superfície do reservatório

Apesar da incessante busca de dados referentes às áreas da superfície do reservatório da barragem do Rio São Bento, conseguiu-se através do projeto básico elaborado pela Magna Engenharia Ltda. os dados constantes da tabela 38, onde apesar dos poucos dados disponíveis foi possível elaborar a análise da relação entre os parâmetros cota e área.

Tabela 38. Relação cota x área do reservatório.

Cota (m)	Área (ha)
120,00	0,00
122,50	1,00
125,00	2,00
127,50	7,00
130,00	12,00
132,50	39,70
135,00	67,50
137,50	100,70
140,00	134,00
142,50	185,50
145,00	237,00
147,50	274,50
150,00	312,00
152,50	355,50
155,00	399,00
157,50	448,50
160,00	498,50
162,50	559,80
165,00	622,80

Fonte: CASAN, 2003.

Diante do diagrama de dispersão produzido através dos dados da tabela 38, pôde-se chegar a determinação do modelo de regressão que descreve a correlação entre os respectivos dados. Porém, apesar da pouca quantidade de dados obtidos da referida tabela, o modelo apresenta uma ótima correlação, sendo que para a obtenção de um valor com maior confiabilidade seria necessário uma maior discretização nos intervalos de cota do reservatório para posterior plotagem dos valores de área, fato pelo qual as respectivas cotas apresentam intervalos de 2,5 metros, onde o ideal seria variação centimétrica, a fim de discretizar de forma mais ampla a amostra dos referidos dados.

A figura 66 apresenta o diagrama de dispersão, a curva ajustada e o modelo de regressão que descreve a correlação entre as variáveis cota e área do reservatório.

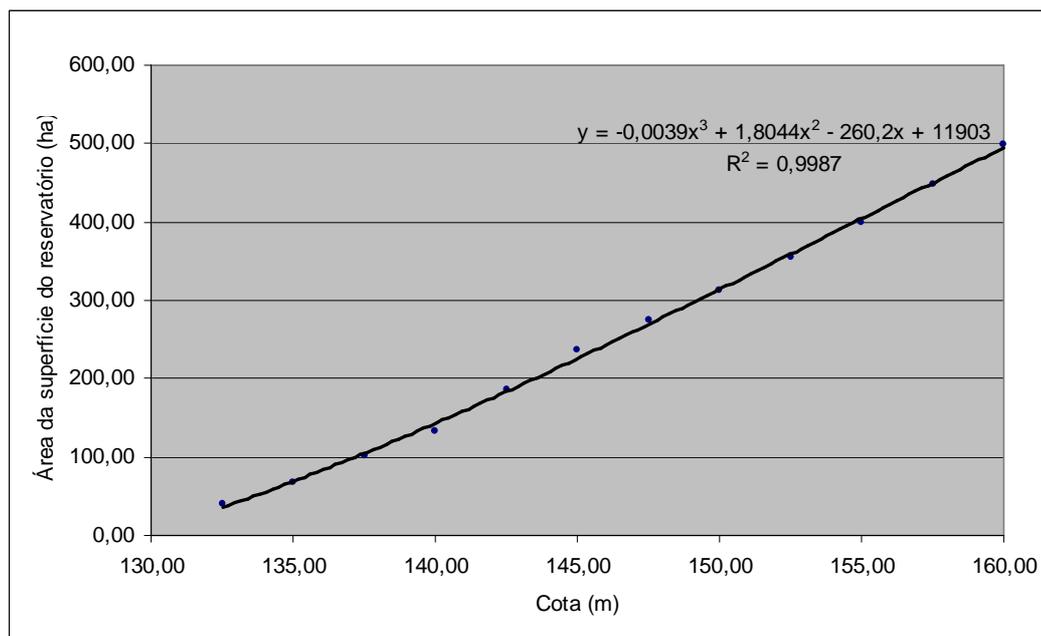


Figura 66. Curva obtida da análise de regressão cota e área do reservatório.

6.3.6 Correlação entre as vazões defluentes e os níveis do rio São Bento jusante

A partir da série operacional da barragem do rio São Bento, os dados relativos ao controle hidráulico do reservatório permitiram a obtenção da curva-chave do rio São Bento em seu trecho jusante à barragem, pois através da organização dos dados das vazões defluentes subtraídas das vazões de adução, pôde-se chegar aos valores das demandas ecológicas destinadas ao respectivo rio durante o período de maio de 2005 a dezembro de 2007.

O processo de confecção da curva-chave consiste em reunir os dados relativos aos registros das leituras da régua limnométrica instalada na seção do rio, onde através da análise de correlação, procurou-se associar estes valores às vazões dos órgãos de descargas da barragem do rio São Bento, obtendo-se desta forma, a equação de regressão que representa o comportamento entre as variáveis nível do rio com as respectivas vazões, bem como o coeficiente de determinação que define o grau de afinidade entre as mesmas.

Verifica-se que em períodos de vertimento ocorrem os maiores valores de vazões, pois o vertedouro da barragem do rio São Bento constitui o elemento hidráulico com maior capacidade de descarga, onde em períodos de grandes volumes de chuvas, as águas excedentes do reservatório são encaminhadas ao rio São Bento através da sua soleira livre, elevando conseqüentemente os níveis do rio.

Em vista destes resultados, denota-se que a determinação destas vazões é obtida através das variáveis hidráulicas do reservatório, em especial das vazões dos órgãos de descargas, tais como: os descarregadores de fundo de 400, 800 e 1000 mm, válvula dispersora e vertedouro, elementos hidráulicos estes que nem sempre operam conjuntamente por razão de regras operacionais adotadas pela gerência técnica do empreendimento.

A curva-chave encontrada é do tipo polinomial de segunda ordem, equação esta que representa o comportamento das vazões do rio São Bento jusante. A equação apresenta coeficiente de determinação $R^2 = 0,9916$, e é representada graficamente através da figura 67.

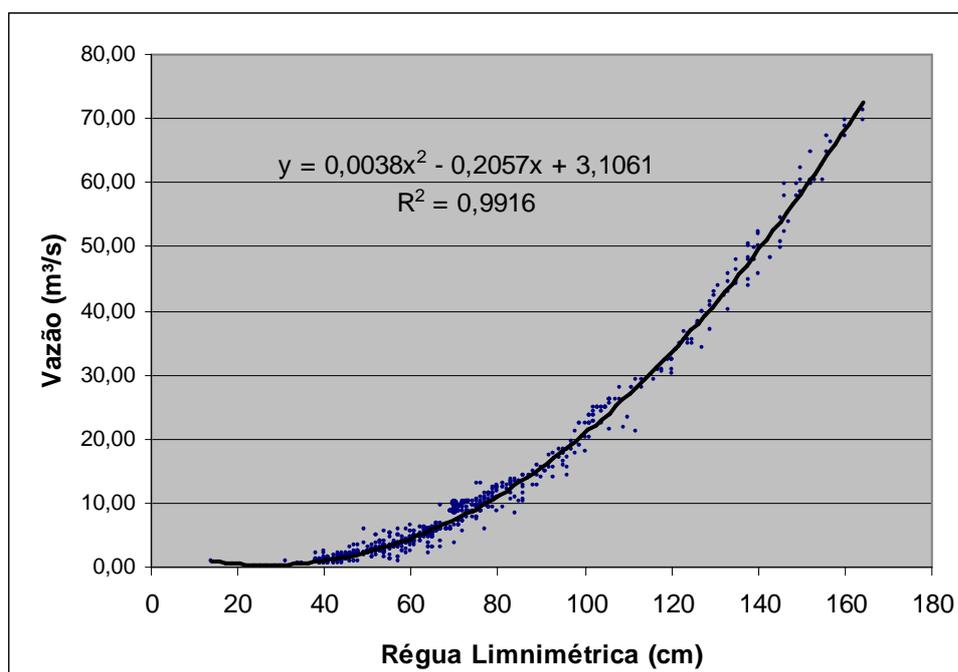


Figura 67. Curva-chave rio São Bento jusante – Anos 2005 a 2007.

Dentro do tratamento adotado para estas vazões, sabe-se que as mesmas são determinadas através das curvas características dos órgãos de descargas, portanto através de variáveis hidráulicas. Assim sendo, estas tornam-se variáveis hidrológicas a partir do momento em que são lançadas ao rio, constituindo-se desta forma, as vazões ecológicas do rio São Bento jusante à barragem, determinando assim, o regime hidráulico do respectivo rio.

A régua limnimétrica pela qual os dados são obtidos, está instalada junto à estação hidrológica São Bento jusante, próximo à ponte Carlos Valdate, localizada aproximadamente 200 m após à barragem principal, conforme apresentado na figura 27. As leituras das régua ocorrem dentro do procedimento convencional, que consiste no registro de duas leituras diárias, sendo efetuadas às 07:00 e 17:00 horas através dos integrantes da equipe operacional da barragem do rio São Bento.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Dentro do objetivo geral desta pesquisa, entende-se que a descrição quantitativa e analítica dos eventos hidrológicos e hidráulicos registrados na série operacional da barragem do rio São Bento, sem sombra de dúvida vem auxiliar consideravelmente o processo operacional deste empreendimento. Além da análise e compreensão da integração dos processos hidráulicos e hidrológicos da Barragem do rio São Bento, este trabalho permite obter as seguintes conclusões:

1) A operação do reservatório da barragem do rio São Bento ocorre em níveis e volumes considerados elevados tomando-se por base os valores médios respectivos à série operacional, significando que o suprimento de água decorrente das precipitações ocorridas na bacia hidrográfica do rio São Bento atendem as demandas requeridas de consumo, sejam elas para o abastecimento público ou para a irrigação.

2) Denota-se através das observações efetuadas que as maiores demandas de consumo de água da barragem do rio São Bento destinam-se à irrigação, visto que as vazões médias defluentes do reservatório durante os períodos que compreende o preparo de terra até a colheita do arroz (setembro a março) apresentam seus maiores valores.

3) Tomando-se como referência as demandas estimadas nos estudos preliminares da barragem do rio São Bento, os registros operacionais demonstram que as demandas atuais de água para o cultivo do arroz apontam um acréscimo significativo comparativamente às vazões estabelecidas no projeto. Tal demanda decorre do aumento das áreas cultivadas com arroz, e que fazem uso das águas do rio São Bento na sua porção jusante à barragem. Denotadamente em períodos de estiagem os níveis do reservatório registram deplecionamentos consideráveis, fato este que levam a avaliar os níveis de incerteza e risco que estas demandas podem acarretar no processo operacional. Requerendo desta forma, uma atenção quanto às possíveis restrições futuras relacionadas ao controle das águas para irrigação, bem como da ampliação das áreas de cultivo de arroz.

4) Os dados analisados indicam precipitação na bacia do Rio São Bento é maior que a observada na Estação meteorológica de Urussanga, e que serviu de base para os estudos hidrológicos do projeto da barragem. Esta constatação permite inferir que as vazões reais também sejam superiores as vazões estimadas, e conseqüentemente a capacidade de atendimento seja maior que a prevista no projeto.

5) Os atuais excessos hídricos observados não podem incentivar o aumento indiscriminado de área de plantio de arroz, pois com o aumento da demanda de consumo doméstico e a ampliação dos sistemas de abastecimento previstos, implicarão na restrição do fornecimento de água para a irrigação.

6) Com base nas previsões elaboradas nos estudos preliminares de vazões do projeto da barragem do rio São Bento, destaca-se que as demandas de água atualmente aduzidas ao sistema integrado de Criciúma mostram uma ligeira elevação se comparadas aos valores previstos nos respectivos estudos. Comportamento pelo qual merece atenção da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento com relação aos estudos de ampliação da adução de águas ao referido sistema, bem como de uma avaliação das abrangências futuras do atendimento pelo respectivo sistema.

7) Em função da preocupação e desconhecimento das características de transporte de sedimentos e da natureza geomorfológica da bacia, recomenda-se que seja realizado um estudo mais acurado sobre os parâmetros físicos e morfométricos da bacia hidrográfica do rio São Bento, e um estudo das condições de transporte dos sedimentos e assoreamento da respectiva bacia.

8) Há a necessidade de melhorar o sistema de transmissão de dados das estações pluviométricas existentes na bacia do Rio São Bento. Embora a rede telemétrica instalada na bacia do rio São Bento forneça condições de produzir dados suficientemente necessários para auxiliar a operação da barragem do rio São Bento, recomenda-se a sua ampliação, no sentido de que sejam instalados mais pluviógrafos na área da bacia, bem como a instalação de sensores de níveis nos rios: Morto, da Serra e da Mina, de modo a permitir a produção de dados que venham a refletir também a realidade hidrológica dos afluentes formadores dos rios Serrinha e São Bento, rios pelos quais constituem os contribuintes do reservatório da barragem do rio São Bento.

9) Recomenda-se rever o modelo operacional da barragem do Rio São Bento com a inclusão dos dados de evaporação no balanço hídrico do reservatório e a revisão das relações cota x volume e cota x área do reservatório.

10) Diante das dificuldades encontradas de definir-se as curvas-chaves dos rios São Bento montante e Serrinha, recomenda-se em seções definidas destes rios, a construção de barragens de níveis que possam promover a formação de seções fixas de fluxo de água destes, e que através de réguas limnimétricas instaladas nestas seções, possa-se monitorar e obter o traçado das respectivas curvas-chaves.

11) Os estudos de correlações apresentados nesta pesquisa mostram que há uma forte relação entre os efeitos provocados pelos processos hidrológicos no comportamento hidráulico da barragem do rio São Bento. Em vista disto, recomenda-se que sejam elaborados estudos mais acurados de correlações entre os processos hidrológicos e hidráulicos, a fim de usa-los como suporte para os trabalhos de simulação operacional da barragem do rio São Bento.

12) Em função da importância do empreendimento, e como forma de subsidiar ainda mais os conhecimentos da CASAN com relação à operação de reservatórios de acumulação de água, recomenda-se que sejam mantidos e atualizados os estudos realizados neste trabalho, e ampliados os sistemas de monitoramento conforme indicações acima expostas.

REFERÊNCIAS

BACK, A. J. Análise Morfométrica da Bacia do Rio Urussanga-SC. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. Criciúma, Ano 7, n. 2. p.107-115, 2006.

_____. Chuvas intensas e chuva de projeto de drenagem superficial no estado de Santa Catarina. **Boletim Técnico**, n. 123. Florianópolis: Epagri, 2002. 65p.

_____. Análise dos dados de Vento. **Revista de Tecnologia e Ambiente**. Criciúma, v.5. n.2. p7-17, 1999.

BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. **Estatística: para cursos de engenharia e informática**. São Paulo: Atlas, 2004. 410 p.

BETTES JUNIOR, H. **Santa Catarina**. Curitiba: Nova Didática, 2001.

BRAVO, J. M.. **Otimização da operação de um reservatório para controle de cheias com base na previsão de vazão**. 2006. 136f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFGRS - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre 2006.

CAMARGO, A. F. M.; SCHIAVETTI, A.. **Conceitos de bacias hidrográficas : teorias e aplicações**. Ilhéus, BA: Editus, 2002. 289 p.

CASAN - COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO. **Relatório Operacional 2004-2006** – Controle Hidráulico do Reservatório. 2007.

_____- COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO. **Dados Hidrometeorológicos** - Complexo São Bento/Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina – CIRAM, 2006.

_____- COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO. **Relatório técnico**. Manual de operação do reservatório: barragem do rio São Bento. Santa Catarina, 2003.

_____- COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO (MAGNA). **Estudo de impacto ambiental - barragem do rio São Bento**. Siderópolis, SC, 1995. 223 p.

EPAGRI. **Zoneamento Agroecológico e Socioeconômico do Estado de Santa Catarina.** 1999. CD

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia.** 2 ed São Paulo: Edgard Blücher, 1988. 291 p.

GENOVEZ, A. M. Método de determinação de volumes de armazenamento de reservatórios para regularização anual. In: PAIVA, J. B. D. de; PAIVA, E. M. C. D. de. **Hidrologia aplicada á gestão de pequenas bacias hidrográficas.** Porto Alegre: ABRH, p. 223.-235. 2003.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear : modelos e algoritmos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. 518 p. ISBN 8535215204

GOLDEFUM, J. A. **Pequenas bacias hidrológicas: Conceitos básicos.** In: PAIVA, J. B. D. de; PAIVA, E. M. C. D. de. **Hidrologia aplicada á gestão de pequenas bacias hidrográficas.** Porto Alegre: ABRH, p.3 - 14. 2003

LINSLEY, R. K; FRANZINI, J. B. **Engenharia de Recursos Hídricos.** São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, 1978.

MACHADO, F. W., **Modelagem Chuva-Vazão mensal utilizando redes neurais artificiais.** 2005. 156f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais). Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2005.

VILLELA, S. M., **Hidrologia aplicada.** São Paulo: Ed. McGraw-Hill do Brasil, 1975. 237p.

MENDONÇA; A. S. Balanço hídrico. In: PAIVA, J. B. D. de; PAIVA, E. M. C. D. de. **Hidrologia aplicada á gestão de pequenas bacias hidrográficas.** Porto Alegre: ABRH, 2003. p. 165.-168.

MENDIONDO; E. M.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Noções básicas de escalas dos processos hidrológicos. In: PAIVA, J. B. D. de; PAIVA, E. M. C. D. de. **Hidrologia aplicada á gestão de pequenas bacias hidrográficas.** Porto Alegre: ABRH, p. 15.-30. 2003.

MILONE, Giuseppe. **Estatística aplicada.** São Paulo: Ed. Atlas, 1995. 286 p.

MING, L. **Sistema Computacional para Previsões de Inundações: aplicação à bacia hidrográfica do Rio São Bento - SC** 2007. 223f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária-Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC. Florianópolis, 2007.

NASCIMENTO, L. S. V., **Estudo da operação otimizada aplicada a um sistema de reservatórios destinado à geração de energia elétrica**.2006. 126f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, 2006.

NERILO, N.; MEDEIROS, P. A., CORDEIRO, A. **Chuvas Intensas no Estado de Santa Catarina**. Editora da UFSC/Edifurb, Florianópolis, 2002.

OLIVEIRA JUNIOR, J. C.; DIAS, H. C. T. Precipitação efetiva em fragmento secundário da Mata Atlântica. **Revista. Árvore**, v. 29, n. Viçosa, 2005. Disponível em:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622005000100002&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 15 mar 2007.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. RE 3/214/2004. **Evaporações Líquidas nas Usinas Hidrelétricas**, 2004.

PAIVA, E. M. C. D. de. Métodos de estimativa da produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas In: PAIVA, J. B. D. de; PAIVA, E. M. C. D. de. **Hidrologia aplicada á gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, p. 313.-364. 2003.

PEIXOTO, L. S. **Derivação de regras operacionais de proteção contra déficits de suprimento de sistemas de reservatórios via algoritmos genéticos**.2006. 227f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, 2006.

PINTO, N. L. S. (...[et al.]). **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000. 278p.

RAMOS, F.; Associação Brasileira de Recursos Hídricos. **Engenharia hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH, 1989. 404 p.

RIGHETTO, A. M.. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. São Carlos: EESC, 1998. 819 p. ISBN 85-85205-24-5

SANTA CATARINA (Estado). Secretaria de Estado de Coordenação Geral e Planejamento. Subsecretaria de Estudos Geográficos e Estatísticos. **Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral**. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro/IOESC. 1996, 173 p.

SANTA CATARINA (Estado). Secretaria de Estado de Coordenação Geral e Planejamento. Subsecretaria de Estudos Geográficos e Estatísticos. **Atlas escolar de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 2000.

SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO URBANO E MEIO AMBIENTE - **SEDUMA**. Bacias Hidrográficas de Santa Catarina: diagnóstico geral. Florianópolis, 1997. 163 p.

SILVEIRA, A. L. L.; SILVEIRA, G. L. Vazões mínimas. In: PAIVA, J. B. D. de; PAIVA, E. M. C. D. de. **Hidrologia aplicada á gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, p. 125.-163. 2003.

SIMOES, S. J.; COIADO, E. M. Processos erosivos. In: PAIVA, J. B. D. de; PAIVA, E. M. C. D. de. **Hidrologia aplicada á gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, p. 283.-293. 2003.

SPIEGEL, Murray R. **Estatística**. 3 ed. São Paulo: Ed. McGraw-Hill, 1994. 645 p.

STRAŠKRABA, M.; TUNDISI, J. G. **Diretrizes para o gerenciamento de lagos**. São Carlos. ILEC; IIE, 2000.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística**. Tradução de Alfredo Alves de Farias ; revisão de Eliana Farias e Soares; colaboração de Vera Rregina L. F. Flores M. 7.ed Rio de Janeiro: LTC, 1999. 410 p.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia:ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 1997. 943p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 669 p ISBN 85-7025-445-8.

UGGIONE, A. B. **Utilização da modelagem matemática no planejamento ambiental no litoral sul de Santa Catarina**. 2006. 60f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). Universidade do Extremo Sul Catarinense/UNESC, 2006.

ZEILHOFER, P. **Hidrografia** – apresentação em Power Point. Depto de Geografia, UFMT.2007.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)