

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO ABASTECIMENTO DOMÉSTICO A PARTIR DA COLETA DAS ÁGUAS PLUVIAIS

Adriano Augusto de Miranda¹, Heinz Dieter Oskar August Fill²

RESUMO --- O trabalho visa verificar a viabilidade do abastecimento residencial através da coleta, armazenamento e distribuição de águas pluviais, como fonte alternativa de abastecimento.

O estudo foi efetuado no município de Curitiba, utilizando dados pluviométricos da estação meteorológica localizada no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná. O método adotado consiste em identificar os valores do máximo déficit acumulado anual das alturas de chuvas diárias e sua distribuição de probabilidade para avaliar a viabilidade de implantação de sistemas de abastecimento domiciliar, usando reservatórios de regularização.

Na viabilidade foram consideradas as condições técnicas e econômicas, identificando o grau de risco e a taxa interna de retorno do investimento. Empregou-se para determinação do risco a análise estatística dos máximos déficits acumulados anuais, utilizando registros de 83 anos dos dados pluviométricos diários.

Para o cálculo da taxa interna de retorno considerou-se o benefício líquido obtido pela economia relativa a fatura da concessionária pública, considerando a probabilidade de falha do sistema.

Conclui o presente trabalho que, para obter taxas de retorno atraentes, o risco de falha deverá ser relativamente elevado (tempo de retorno da ordem de 2 anos), sendo o valor da taxa interna de retorno maior quanto maior área de captação e o consumo.

ABSTRACT --- The present work aims to check the viability of residential supplying through of collection, storage and distribution of rainfall, as an alternative source of storage.

The study was carried out in Curitiba municipality, using rainfall data from meteorological station located at Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná. The adopted method consists in identifying the values of the maximum annual deficit accumulated from the height of the daily rainfall and its probability distribution to value the viability of implantation of a residential source sistem, using reservoir of regularization.

In the viability were considered the technical and economical conditions, identifying the degree of risk and the inner rate of the investment return. It was used to determine the risk, statistics analysis from the maximum annual deficits accumulated, using registers of 83 years of daily rainfall data.

To calculate the return of the inner rate it was considered that the liquid benefit obtained by the relative economy the public dealer's invoice, considering the probability of the sistem's failure.

This work concluded that, to obtain attractive return rates, the failure risk should be relatively high (time of the order return: two years) the more bigger the area of pick up and of the consumption the more will be the price of the inner rate's return.

Palavras Chaves: Uso Racional das Águas Pluviais; Análise de Séries Temporais; Máximo Déficit Acumulado.

1) Engenheiro Civil, Especialista em Gestão Ambiental pela Universidade Federal do Paraná, Mestre em Engenharia de Recursos Hídrico e Ambiental pela Universidade Federal do Paran. Travessa Brasil, 88. 83005-330. São José dos Pinhais. E_mail: adrianoam@sanepar.com.br.

2) Engenheiro Mecânico, Doutor em "Civil & Environmental Engineering – Cornell University", professor Senior da Universidade Federal do Paraná. Centro Politécnico, Bloco H, Sala 9-17. Jardim das Américas. 80011-970 – Curitiba, PR.

1. INTRODUÇÃO

O sistema tradicional de coleta de águas superficiais ou subterrâneas destinadas ao abastecimento através de concessionárias de serviço público é composto geralmente de: captação, recalque, adução, tratamento, armazenamento e distribuição. Em muitos casos, a disponibilidade de novas bacias com potencialidade para atender as necessidades de consumo crescente está diminuindo, seja pela degradação da qualidade da água, seja pelo esgotamento dos mananciais limitados. Rios mais distantes maior o custo de implantação e operação.

Nesse contexto as águas pluviais podem vir a se tornar uma fonte alternativa de caráter complementar para o abastecimento de água destinado a edificações residenciais, comerciais ou industriais. Entretanto para viabilizar essa fonte de abastecimento é necessário efetuar avaliações quantitativas reais do seu potencial e das necessidades de regularização dentro de um enfoque probabilístico do risco envolvido.

Este trabalho apresenta uma avaliação considerando as relações funcionais entre demanda, capacidade de armazenamento e risco de falha do sistema. Como estudo de caso foi escolhido a região metropolitana de Curitiba - PR, porém o método proposto é bastante geral e pode ser aplicado em outros locais com regime pluvial diferenciado.

Para tanto este estudo identifica as características físicas das instalações necessárias para a coleta, armazenamento e distribuição das águas pluviais, considerando o caráter aleatório das precipitações diárias e determinar a viabilidade econômica do sistema em uma residência unifamiliar de características médias, no Município de Curitiba.

Inicialmente, após a coleta dos dados referentes as precipitações diárias da estação pluviométrica de Curitiba, operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET do período de 01 de janeiro de 1922 a 31 de dezembro de 2004, em uma série contínua de 83 anos.

A partir desses dados foi identificado o volume máximo possível de ser captado de águas pluviais, para um regime de regularização intra-anual, ou seja, para um período de regularização inferior a um ano. Em seguida foi quantificado o máximo déficit acumulado em cada ano, considerando o consumo constante e uma escala de tempo diária. Ordenando estes máximos déficits foi possível estimar a probabilidade de falha para diferentes volumes de regularização.

Mediante o ajuste de uma distribuição de probabilidades, no caso a lognormal de três parâmetros (distribuição de Galton Gibrat), foi possível estabelecer um modelo relacionando risco, volume de regularização e demanda.

Foram estimados os custos do sistemas, para verificar a viabilidade econômica comparando os custos da implantação e manutenção com a tarifa de água e esgoto, considerando o risco de falha.

2. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso visa avaliar a viabilidade do abastecimento doméstico a partir da coleta das águas pluviais, considerando as características meteorológicas, econômicas e sociais prevalentes dentro do Município de Curitiba, Capital do Estado do Paraná.

Os dados pluviométricos utilizados neste trabalho, corresponde aos valores observados na estação meteorológica de Curitiba (código ANEEL: 02549006), atualmente localizada no Campus Politécnico, da Universidade Federal do Paraná, no Município de Curitiba. Este estudo utiliza as observações diárias de precipitação entre 01 de janeiro de 1922 a 31 de dezembro de 2004. A tabela 1 apresenta a precipitação total anual para este período.

TABELA: 1 - QUADRO RESUMO DA PRECIPITAÇÃO TOTAL ANUAL, em Curitiba.

Ano	P(mm)	Ano	P(mm)	Ano	P(mm)
1922	1623,1	1950	1469,9	1978	1055,4
1923	1344,5	1951	1190,2	1979	1299,4
1924	902,4	1952	1386,4	1980	1638,1
1925	1408	1953	1268,5	1981	947,4
1926	1532,5	1954	1730	1982	1609,3
1927	1493,2	1955	1462	1983	1992,7
1928	1433,7	1956	1196,5	1984	1479,9
1929	1406	1957	2165,2	1985	765,5
1930	1204,3	1958	1431,9	1986	1364,2
1931	1632,1	1959	1205,4	1987	1388
1932	1513,4	1960	1629,8	1988	1233,2
1933	795,2	1961	1682,8	1989	1459,8
1934	1302,3	1962	1167,1	1990	1866,8
1935	1598,3	1963	1413,9	1991	1243,9
1936	1366,5	1964	1325,9	1992	1255,7
1937	1413,9	1965	1753,4	1993	1876,2
1938	1648,8	1966	1433,7	1994	1479,1
1939	1413,5	1967	1287,3	1995	1650,5
1940	1131,3	1968	1111,3	1996	1891,8
1941	1318,1	1969	1614,4	1997	1848,8
1942	1145,2	1970	1713	1998	2071,2
1943	1227,8	1971	1308,8	1999	1683,4
1944	1177	1972	1870,9	2000	1502
1945	1274,6	1973	1710,5	2001	1894,1
1946	1700,2	1974	1306,8	2002	1577,6
1947	1608,8	1975	1537,3	2003	1175
1948	1341,1	1976	1480,5	2004	1206,6
1949	1233,9	1977	1473,7	Média	1446,1

Fonte: ANEEL, 2000.

Avaliação do volume de regularização

Para avaliação do volume de regularização adotou-se o método do máximo déficit acumulado (GOMIDE,1986).Esse método determina em cada intervalo de tempo o déficit que é igual a demanda menos a precipitação (ou afluência) acumulando o mesmo ao longo do tempo, enquanto positivo. Se o valor acumulado resultar negativo o déficit acumulado é igualado a zero. A escala de tempo, isso é o intervalo de acumulações no tempo, foi considerada igual a um dia.

O maior valor do déficit acumulado dentro do horizonte de planejamento, denominado “máximo déficit acumulado” é igual ao volume útil necessário para regularizar a demanda. Se os períodos de regularização forem sempre igual ou inferior a um ano a regularização é dita sazonal, caso contrário é plurianual, sendo o período de regularização um ciclo completo de operação do reservatório, isto é iniciando cheio e após esvaziamento total ou parcial voltar a condição de cheio.

O máximo déficit acumulado que é função do consumo, pode ser calculado mediante a equação:

$$D(0) = 0$$

$$D(t) = \text{máx.} [D(t-1) + C - P(t); 0] \quad t=1, 2, \dots T \quad (1)$$

$$D_{\text{máx}} = \text{máx.} [D(1), D(2), \dots, D(T)]$$

Onde:

t = tempo, em dias

D(t) = Déficit Acumulado, em mm, no período: t

P(t) = Precipitação diária no período: t, em mm

C = Consumo, em mm

D_{máx} = máximo déficit acumulado do período T (mm)

Determinação do Ano Hidrológico

Uma série anual de precipitações diárias correspondente a um ano histórico, pode ser considerado como uma realização de um processo estocástico gerador de chuvas diárias e os máximos déficits acumulados em cada ano, podem ser consideradas variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas.

Foi verificado que um consumo de 2,5 mm/dia constitui o consumo máximo onde os intervalos deficitários estão sempre contidos dentro de um ano, a tabela 2 ilustra essa situação. Em função do caso 4 definiu-se um ano hidrológico iniciando no dia 1º de março, encerrando no dia 28 ou 29 de fevereiro do ano seguinte. A rigor o ano hidrológico, que deve conter todo ciclo de regularização, deveria se estender de 21/02 a 20/02 do ano seguinte. Porém optou-se no caso por utilizar um ano hidrológico contendo um número inteiro de meses.

TABELA: 2 - MÁXIMO PERÍODO DE REGULARIZAÇÃO

Caso	Consumo máximo (l/m ² . dia)	Déficit Máximo (mm)	Início	Fim	Duração (dias)
1	1,0	58,3	16.05.68	09.10.68	146
2	1,5	127,5	30.03.63	01.10.63	185
3	2,0	212,0	30.03.63	22.10.63	206
4	2,5	304,0	21.02.33	21.02.34	365

Fonte: Autor, 2007.

Na tabela 3, foram identificados os valores das precipitações totais em cada um dos anos hidrológicos.

TABELA: 3 - PRECIPITAÇÃO ACUMULADA NO ANO HIDROLÓGICO

Início	Fim	P(mm)	Início	Fim	P(mm)	Início	Fim	P(mm)
01/03/22	28/02/23	1413,4	01/03/50	28/02/51	1490,5	01/03/78	28/02/79	1132,9
01/03/23	29/02/24	1247,5	01/03/51	29/02/52	1238,2	01/03/79	29/02/80	1318,3
01/03/24	28/02/25	1002,4	01/03/52	28/02/53	1353,9	01/03/80	28/02/81	1580,1
01/03/25	28/02/26	1493,4	01/03/53	28/02/54	1420,6	01/03/81	28/02/82	1057,5
01/03/26	28/02/27	1465,2	01/03/54	28/02/55	1446,5	01/03/82	28/02/83	1654,3
01/03/27	29/02/28	1474,4	01/03/55	29/02/56	1501,4	01/03/83	29/02/84	1779,0
01/03/28	28/02/29	1493,7	01/03/56	28/02/57	1386,6	01/03/84	28/02/85	1558,9
01/03/29	28/02/30	1423,9	01/03/57	28/02/58	2116,9	01/03/85	28/02/86	905,1
01/03/30	28/02/31	1280,7	01/03/58	28/02/59	1440,9	01/03/86	28/02/87	1300,3
01/03/31	29/02/32	1547,7	01/03/59	29/02/60	1179,9	01/03/87	29/02/88	1329,8
01/03/32	28/02/33	1433,7	01/03/60	28/02/61	1566,9	01/03/88	28/02/89	1440,0
01/03/33	28/02/34	941,4	01/03/61	28/02/62	1628,6	01/03/89	28/02/90	1407,0
01/03/34	28/02/35	1044,0	01/03/62	28/02/63	1376,7	01/03/90	28/02/91	1758,4
01/03/35	29/02/36	1697,8	01/03/63	29/02/64	1149,9	01/03/91	29/02/92	1189,7
01/03/36	28/02/37	1381,2	01/03/64	28/02/65	1453,2	01/03/92	28/02/93	1525,5
01/03/37	28/02/38	1495,5	01/03/65	28/02/66	1720,7	01/03/93	28/02/94	1864,4
01/03/38	28/02/39	1697,9	01/03/66	28/02/67	1428,4	01/03/94	28/02/95	1620,2
01/03/39	29/02/40	1303,1	01/03/67	29/02/68	1393,2	01/03/95	29/02/96	1518,7
01/03/40	28/02/41	1153,6	01/03/68	28/02/69	1083,4	01/03/96	28/02/97	2041,7
01/03/41	28/02/42	1358,3	01/03/69	28/02/70	1563,4	01/03/97	28/02/98	1550,5
01/03/42	28/02/43	1172,7	01/03/70	28/02/71	1757,8	01/03/98	28/02/99	2505,2
01/03/43	29/02/44	1287,0	01/03/71	29/02/72	1565,0	01/03/99	29/02/00	1227,9
01/03/44	28/02/45	1071,9	01/03/72	28/02/73	1548,6	01/03/00	28/02/01	1716,7
01/03/45	28/02/46	1596,6	01/03/73	28/02/74	1685,9	01/03/01	28/02/02	1727,8
01/03/46	28/02/47	1595,0	01/03/74	28/02/75	1305,6	01/03/02	28/02/03	1455,6
01/03/47	29/02/48	1413,4	01/03/75	29/02/76	1598,5	01/03/03	29/02/04	1148,8
01/03/48	28/02/49	1199,4	01/03/76	28/02/77	1485,3	01/03/04	28/02/05	1213,8
01/03/49	28/02/50	1325,8	01/03/77	28/02/78	1270,5	Média		1442,8

Fonte: Autor, 2007.

Calculo do máximo déficit acumulado em cada ano

O sistema de abastecimento doméstico a partir da precipitação constitui essencialmente um sistema dinâmico, onde a água a ser utilizada para consumo provém da água precipitada em forma de chuva, regularizada através de um reservatório. A água armazenada e consumida regularmente a uma taxa constante, reponde de forma irregular e aleatória pela precipitação. Assim o déficit acumulado representa a quantidade de água a ser suprida pela depleção do reservatório.

Nestas condições para o período de estudo foram identificados os maiores déficits acumulados, em cada ano, através de simulações a nível diário. O método utilizado consiste em identificar através do algoritmo descrito no item 4.2.1, o máximo déficit acumulado aplicando o algoritmo a cada ano hidrológico que inicia em 1º de março de cada ano e termina no dia 28 de fevereiro do ano seguinte. Cada ano hidrológico é identificado pela sua data de início de modo que o último ano hidrológico recebe a denominação de 2004. Na tabela 4 são representados os valores para diferentes consumos.

TABELA: 4 - CONSUMO X MÁXIMO DÉFICIT ACUMULADO (mm)

Ano	t	P - anual (mm)	P, médio diário (mm)	C (mm/dia)				
				0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
1922	1	1413,4	3,87	9,9	23,4	38,4	56,4	76,4
1923	2	1247,5	3,42	13,1	29,6	46,1	62,6	82,7
1924	3	1002,4	2,75	14,1	43,4	77,9	136,6	217,1
1925	4	1493,4	4,09	8,5	28,3	64,8	101,3	137,8
1926	5	1465,2	4,01	9,8	20,3	30,8	41,3	75,1
1927	6	1474,4	4,04	6,8	16,2	29,6	46,7	65,4
1928	7	1493,7	4,09	10,8	23,8	36,8	49,8	62,8
1929	8	1423,9	3,90	6,6	20,5	39,0	59,1	82,5
1930	9	1280,7	3,51	12,2	28,3	83,9	146,2	208,7
1931	10	1547,7	4,24	7,1	16,1	31,3	46,8	62,3
1932	11	1433,7	3,93	9,6	22,6	35,6	49,9	74,4
1933	12	941,4	2,58	14,2	38,0	100,8	187,8	288,4
1934	13	1044,0	2,86	10,8	25,3	46,3	116,2	193,2
1935	14	1697,8	4,65	8,1	23,7	49,2	83,2	130,0
1936	15	1381,2	3,78	9,4	22,3	47,5	86,5	134,5
1937	16	1495,5	4,10	9,2	24,2	44,3	84,8	149,3
1938	17	1697,9	4,65	6,7	15,8	25,8	36,6	47,6
1939	18	1303,1	3,57	10,3	23,1	40,4	71,9	111,2
1940	19	1153,6	3,16	11,2	27,9	54,8	102,3	150,3
1941	20	1358,3	3,72	7,0	16,0	27,1	43,2	73,7
1942	21	1172,7	3,21	8,1	18,6	36,8	65,0	134,9

Tabela 4 Continuação

Ano	t	P - anual		C				
		(mm)	P, médio diário (mm)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
1943	22	1287,0	3,53	6,9	23,7	43,7	71,0	115,8
1944	23	1071,9	2,94	10,0	31,3	60,2	149,4	252,4
1945	24	1596,6	4,37	15,3	33,5	62,7	95,7	128,7
1946	25	1595,0	4,37	8,2	22,3	39,3	56,3	91,2
1947	26	1413,4	3,87	8,4	19,4	32,3	60,8	115,4
1948	27	1199,4	3,29	14,2	31,2	50,2	73,2	103,9
1949	28	1325,8	3,63	11,0	25,3	49,4	82,4	139,3
1950	29	1490,5	4,08	13,7	35,0	64,8	107,7	188,7
1951	30	1238,2	3,39	15,8	50,3	89,4	156,1	256,4
1952	31	1353,9	3,71	12,2	35,2	63,8	97,8	131,8
1953	32	1420,6	3,89	10,5	26,0	41,5	57,0	89,0
1954	33	1446,5	3,96	11,6	24,6	37,6	57,5	86,6
1955	34	1501,4	4,11	9,7	23,3	39,4	60,0	86,5
1956	35	1386,6	3,80	9,8	20,8	37,7	58,2	101,5
1957	36	2116,9	5,80	7,9	19,4	37,3	58,2	96,3
1958	37	1440,9	3,95	8,7	25,7	54,8	90,6	126,6
1959	38	1179,9	3,23	10,1	28,1	46,1	64,1	102,5
1960	39	1566,9	4,29	11,5	25,0	39,3	54,8	70,3
1961	40	1628,6	4,46	16,8	50,9	86,4	125,3	166,3
1962	41	1376,7	3,77	7,2	16,2	31,1	97,2	170,2
1963	42	1149,9	3,15	11,6	53,6	127,5	212,0	299,6
1964	43	1453,2	3,98	11,9	28,2	45,2	63,6	83,6
1965	44	1720,7	4,71	9,2	19,1	30,6	42,1	53,6
1966	45	1428,4	3,91	7,5	17,5	29,1	45,3	76,8
1967	46	1393,2	3,82	14,8	40,8	68,7	100,6	133,1
1968	47	1083,4	2,97	18,7	58,3	99,8	175,0	263,2
1969	48	1563,4	4,28	8,9	36,9	68,5	104,0	139,5
1970	49	1757,8	4,82	12,8	32,1	52,1	74,1	100,1
1971	50	1565,0	4,29	9,0	19,3	45,5	79,3	138,5
1972	51	1548,6	4,24	13,7	31,4	60,3	100,6	141,1
1973	52	1685,9	4,62	6,8	14,4	23,0	32,0	50,4
1974	53	1305,6	3,58	16,3	33,3	50,3	67,3	84,8
1975	54	1598,5	4,38	7,6	16,3	25,3	43,9	70,9
1976	55	1485,3	4,07	9,4	19,9	30,4	44,8	65,1
1977	56	1270,5	3,48	14,0	40,2	73,2	118,2	178,0
1978	57	1132,9	3,10	13,5	36,0	59,5	82,5	121,7
1979	58	1318,3	3,61	6,7	16,2	35,1	76,8	122,8
1980	59	1580,1	4,33	6,8	21,9	52,8	85,8	118,8
1981	60	1057,5	2,90	7,9	33,6	73,1	143,7	228,4
1982	61	1654,3	4,53	11,4	23,9	36,4	67,9	104,2
1983	62	1779,0	4,87	13,4	29,8	47,9	66,4	88,0
1984	63	1558,9	4,27	10,3	22,8	35,3	47,8	60,3
1985	64	905,1	2,48	20,9	57,2	102,5	169,6	262,2
1986	65	1300,3	3,56	9,3	24,8	46,7	82,1	124,6
1987	66	1329,8	3,64	8,0	18,0	31,4	53,7	98,4

Tabela 4 Continuação

Ano	t	P - anual P, médio		C				
		(mm)	(mm)	(mm/dia)				
				0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
1988	67	1440,0	3,95	26,6	58,1	97,5	137,5	211,1
1989	68	1407,0	3,85	10,2	26,2	50,0	89,5	129,0
1990	69	1758,4	4,82	8,5	17,5	26,5	35,5	45,6
1991	70	1189,7	3,26	17,6	36,1	55,0	97,0	144,5
1992	71	1525,5	4,18	11,4	24,3	37,3	50,3	63,3
1993	72	1864,4	5,11	6,0	15,7	29,7	46,2	73,0
1994	73	1620,2	4,44	10,7	31,4	58,9	88,5	164,2
1995	74	1518,7	4,16	11,3	33,3	55,3	77,3	103,7
1996	75	2041,7	5,59	11,5	33,4	57,4	90,6	128,1
1997	76	1550,5	4,25	12,8	27,8	81,5	119,5	166,1
1998	77	2505,2	6,86	7,3	19,7	38,2	56,7	81,9
1999	78	1227,9	3,36	14,4	45,8	77,3	108,8	140,3
2000	79	1716,7	4,70	10,6	48,9	96,8	142,8	188,8
2001	80	1727,8	4,73	11,7	23,7	36,5	51,5	66,5
2002	81	1455,6	3,99	7,0	14,0	23,9	44,5	79,5
2003	82	1148,8	3,15	18,4	45,4	72,4	99,4	137,8
2004	83	1213,8	3,33	16,6	37,6	63,9	96,6	137,6

Fonte: Autor, 2007.

Os valores do máximo déficit acumulado que constam da tabela 4 quando dispostos em ordem crescente aliados a uma estimativa de sua probabilidade de não excedência [e. g. $p_i = \frac{i}{(n+1)}$] constituem uma função de distribuição acumulada empírica.

Inferência estatística e Análise de risco

No caso após a obtenção do máximo déficit acumulado em cada ano ajustou-se a este uma distribuição teórica, lognormal de três parâmetros (LN3), comparando os resultados teóricos com estimativa não-paramétrica das probabilidades dos valores observados (posição de plotagem) através de um teste estatístico apropriado.

Uma das condições necessárias para a análise não-paramétrica é que as variáveis aleatórias envolvidas que correspondem as observações da amostra sejam independentes e identicamente distribuídas ou seja que a amostra disponível seja uma amostra aleatória (CASELLA E BERGER, 1990).

Um conceito importante para analisar a dependência de variáveis aleatórias seqüenciais é o coeficiente de auto correlação linear dado pela expressão:

$$r_1 = \frac{\sum_{t=1}^{n-1} (X_{t+1} - X_{med}) * (X_t - X_{med})}{\sum_{t=1}^n (X_t - X_{med})^2} \quad (2)$$

Para uma distribuição das variáveis aleatórias normal basta que o coeficiente de correlação seja nulo, para garantir a independência das variáveis aleatórias. (CASELLA E BERGER, 1990).

Para testar a nulidade do coeficiente de auto-correlação e portanto a independência das precipitações anuais (normalmente distribuídas) definiram-se intervalos de confiança do coeficiente de auto-correlação amostral sob a hipótese nula de $\rho = 0$ e verificou-se que o valor amostral situava-se dentro do intervalo de confiança.

Sob a hipótese nula de $\rho = 0$ (auto-correlação nula) a distribuição amostral de r_1 é aproximadamente normal e os limites do intervalo de confiança para um nível α (probabilidade de r_1 estar contido no intervalo igual a α) podem ser estabelecidos como (Loucks et al, 1981)

$$\text{Lim } r_1 = -\frac{1}{n} \pm \frac{Z_{(1-\alpha)/2}}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Onde Z_p é o p-esimo quantil da variável normal padrão e n é o número de observações.

Para as precipitações anuais resultou $r_1 = 0,073$, considerando $n=83$ e $\alpha = 95\%$, o limite do intervalo de confiança será de: $-0,227 \leq r_1 \leq 0,203$.

Foi efetuada uma análise semelhante testando a nulidade da auto-correlação dos máximos déficits anuais para vários níveis de consumo. O valor de r_1 amostral e os respectivos intervalos de confiança para $\alpha = 95\%$ estão listados na tabela 5.

TABELA: 5 – INTERVALOS DE CONFIANÇA DE AUTO-CORRELAÇÃO (MAX. DEFICIT)

Consumo (l/m ² .dia)	r_1	Lim. inf.	Lim. sup.	$H_0 : \rho_1 = 0$
1,0	-0,0003	-0,227	0,203	Não rejeita
1,5	-0,0515	-0,227	0,203	Não rejeita
2,0	0,0429	-0,227	0,203	Não rejeita
2,5	0,0503	-0,227	0,203	Não rejeita

Fonte: Autor, 2007.

Também no caso dos máximos déficits acumulados anuais a hipótese de auto-correlação nula não pode ser rejeitada, em nenhum caso.

Para avaliar a probabilidade de um dado valor do máximo déficit anual foi ajustado aos dados uma distribuição log normal de 3 parâmetros (LN3) observando-se um excelente ajuste.

A distribuição LN3 é descrita pela função densidade:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma(x - \xi)} \exp \left\{ -\frac{[\ln(x_i - \xi) - \mu]^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (4)$$

Os parâmetros da distribuição LN3 foram estimados seguindo o procedimento proposto por Stedinger (1980) sendo:

$$\hat{\xi} = \frac{x_{(1)}x_{(n)} - x_{med}^2}{x_{(1)}x_{(n)} - 2x_{med}} \quad (5)$$

$$\hat{\mu} = \frac{\sum \ln(x_i - \xi)}{n} \quad (6)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum [\ln(x_i - \xi) - \mu]^2}{n}} \quad (7)$$

Sendo:

$x_{(1)}$ o menor valor da amostra;

$x_{(n)}$ o maior valor da amostra;

x_{med} a mediana da amostra;

n o número de observações.

A tabela 6, mostra os valores numéricos obtidos para os parâmetros para consumos variando de 1,0 mm/dia a 2,5 mm/dia.

TABELA: 6 - PARÂMETROS DA LN3 AJUSTADA AO MÁXIMO DÉFICIT ACUMULADO

Consumo (l/m ² .dia)	ξ	μ	σ
1,0	8,1	2,879	0,517
1,5	13,6	3,492	0,557
2,0	9,8	4,184	0,490
2,5	4,2	4,776	0,426

As figuras 6 a 9 comparam o ajuste teórico com as estimativas empíricas da probabilidade pela posição de plotagem de Weibull [$p = i / (n+1)$] expressos pela variável normal padrão Z.

Os gráficos mostram os valores de $\ln(D - \xi)$ como função da variável normal reduzida Z . No caso dos valores teóricos ajustados resulta numa reta $Y = \hat{\sigma} \cdot Z + \hat{\mu}$. No caso dos valores observados $Z = \phi^{-1} \cdot [i / (n+1)]$ onde i representa a ordem de classificação do valor observado de $\ln(D - \xi)$.

A confiabilidade do sistema (ou alternativamente do risco) consiste em determinar, para cada nível de consumo, as probabilidades de excedência do máximo déficit acumulado igual ao volume de regularização do sistema de abastecimento.

No caso de regularização pluri-anual os 83 anos hidrológicos do registro histórico não mais constituem uma amostra válida do processo estocástico de geração de precipitações e seria necessário desenvolver um modelo para gerar um conjunto de séries sintéticas de precipitação cada uma com duração de vários anos.

No caso intra-anual, assumido a validade do ajuste da distribuição LN3, a avaliação da confiabilidade para um dado volume de regularização consiste simplesmente em calcular a probabilidade de não excedência do quantil normal padrão, Z_p dado por:

$$Z_p = \frac{\ln(V - \xi) - \mu}{\sigma} \quad (8)$$

Sendo V o volume útil de regularização.

FIGURA: 6 - AJUSTE DA DISTRIBUIÇÃO LN3 PARA CONSUMO; $C = 1,0 \text{ l/m}^2 \cdot \text{dia}$

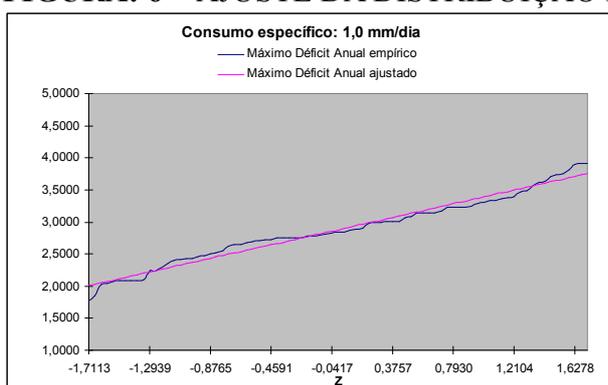


FIGURA: 7 – AJUSTE DA DISTRIBUIÇÃO LN3 PARA CONSUMO; C = 1,5 l/m².dia

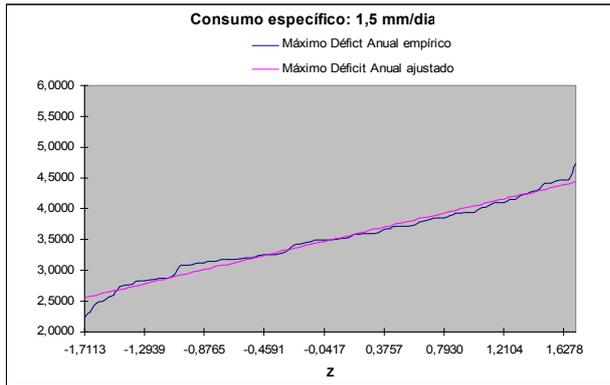


FIGURA: 8 - AJUSTE DA DISTRIBUIÇÃO LN3 PARA CONSUMO; C = 2,0 l/m².dia

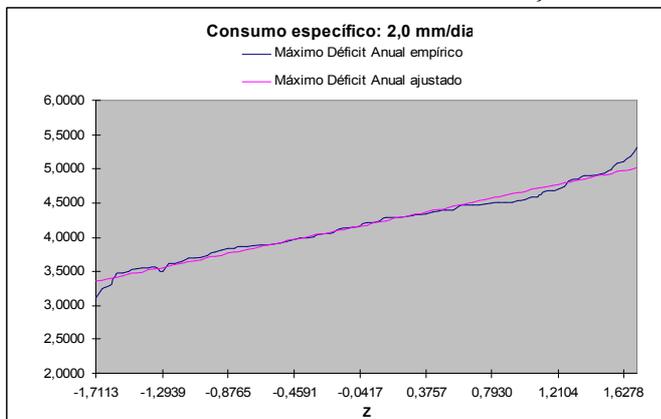
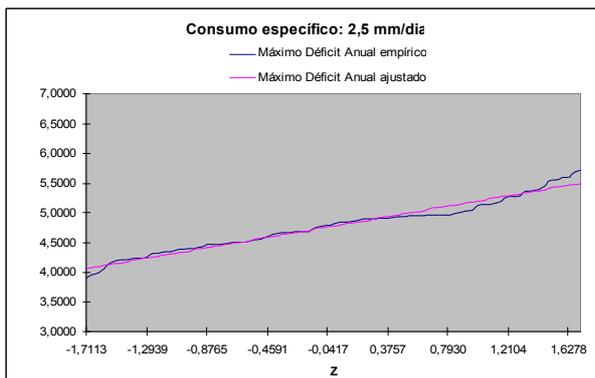


FIGURA: 9 - CONFIABILIDADE DO SISTEMA, CONSUMO; C = 2,5 l/m².dia



A tabela 7 apresenta os volumes de regularização necessários para consumos de 1,0 a 2,5 mm/dia considerando vários riscos de falha anual. Estes valores foram obtidos pela inversão da equação (8):

$$V = \exp[\sigma \cdot Z_p + \mu] + \xi \quad (9)$$

Sendo p a confiabilidade do sistema ($p = 1 - \text{risco}$) e Z_p o p -ésimo quantil da distribuição normal padrão.

TABELA: 7 - VOLUMES DE REGULARIZAÇÃO (em mm) PARA VÁRIOS RISCOS

Risco	Consumo (l/m ² .dia)			
	1,0	1,5	2,0	2,5
1%	67,5	133,9	215,4	324,3
5%	49,9	96,0	157,1	243,8
10%	42,8	81,0	133,3	209,7
15%	38,6	72,2	119,0	189,0
20%	35,7	66,3	108,8	174,6
25%	33,4	61,6	101,4	162,7
30%	31,5	56,9	94,9	143,9
40%	28,4	51,4	84,3	127,8
50%	25,9	43,2	65,6	114,2

Fonte: Autor, 2007.

3. ANÁLISE ECONÔMICA

Considerando uma residência com três quartos com área de captação do telhado de 200,00 m² e consumo mensal igual a 21 m³. Segundo especificação do Decreto n° 791 da Secretaria do Meio Ambiente (CURITIBA, 2003) as águas pluviais devem ser utilizadas para, lavagem de automóveis, regar jardim e válvulas de descargas de vasos sanitários.

O consumo mensal de água pluvial, para seis pessoas no domicílio especificado, está descrito na tabela 8.

TABELA: 8 – CONSUMO CONFORME DECRETO n° 791.

Especificação	Consumo Unitário	Consumo Parcial
Lavagem de automóveis	0,4 litro/pessoa.dia	2,4 litros / dia
Jardim ou Grama	2,2 litro/pessoa.dia	13,2 litros / dia
Válvula de Descarga	33,0 litros/pessoa.dia	198,0 litros / dia
TOTAL		213,6 litros / dia

Fonte: Decreto n° 791. (Curitiba, 2003)

Considerando os 3 usos previstos para águas pluviais resulta um consumo de aproximadamente 213,6 l/dia. Considerando ainda perdas de 15% no sistema (evaporação, vazamentos) resulta um consumo de 293,7 l/dia que foi arredondado para 300 l/dia, o que equivale a um consumo mensal de 9 m³/mês.

Para uma área de captação de 200 m² isso corresponde a um consumo de 1,5 mm/dia, perfeitamente enquadrado nas possibilidades de regularização intra-anual das precipitações.

Volume do reservatório de regularização

Considerando um consumo de 1,5 l/m².dia para a residência padrão do estudo de caso os volumes necessários em mm, para diferentes riscos, são mostrados na tabela 7 e transferidos para a tabela 9. Na tabela 9 esses valores são convertidos para m³ considerando uma área de captação de 200 m², conforme estabelecido.

TABELA: 9 - Volumes necessários para regularização (m³)

Risco	Volume para 300 l/dia (1,5 l/m ² .dia)	
	mm	m ³
1%	133,9	26,8
5%	96,0	19,2
10 %	81,0	16,2
15 %	72,2	14,4
20 %	66,3	13,3
25 %	61,6	12,3
30%	56,9	11,4
40%	51,4	10,3
50%	43,2	9,2

Fonte: Autor, 2007.

Orçamento

O orçamento da instalação para a captação e regularização de águas pluviais para abastecimento doméstico considerou a possibilidade de diferentes volumes de reservatório. Os orçamentos foram detalhados considerando os serviços de escavação do solo, estrutura, rede hidráulica, rede elétrica, moto-bomba e filtros. A tabela 10, apresenta o resumo referente da execução de diferentes reservatórios.

TABELA: 10 - RESUMO DO CUSTO DE INSTALAÇÃO DE DIFERENTES RESERVATÓRIOS

Análise	Reservatório m ³	Custo Implantação R\$
1	35	18.802,32
2	30	16.375,71
3	25	13.307,87
4	20	11.445,56
5	15	8.980,50
6	10	6.515,43
7	5	4.050,36
8	3	3.301,41
9	2	2.850,20
10	1	2.390,30

Fonte: Autor, 2007.

Análise Custo - Benefício:

No sistema de captação de águas pluviais para o abastecimento residencial pode ocorrer a necessidade de adquirir a água da concessionária a mais que o previsto, devido a possível falha do sistema.

Segundo (SANEPAR, 2005), no caso de Curitiba toda a edificação residencial ligada ao sistema de abastecimento de águas e coleta de esgoto paga a concessionária um valor fixo mínimo. Para edificações residenciais que consomem menos que 10 m³ paga-se uma taxa fixa de R\$ 30,25 ao mês, considerando o abastecimento de água e a coleta de esgoto. Edificações que consomem de 10 m³ a 30 m³ devem pagar R\$ 30,25 ao mês mais R\$ 4,53 (custo marginal) por metro cúbico adicional a 10 m³, considerando o abastecimento de água e a coleta de esgoto. Quando a edificação consome mais que 30 m³ o proprietário deve pagar R\$ 120,90 ao mês mais R\$ 7,73 (custo marginal) por metro cúbico adicional a 30 m³, considerando o abastecimento de água e a coleta de esgoto.

Desta forma considerando a taxa mínima fixa e que o consumo da residência em questão seja superior a 10 m³/mês o benefício marginal do sistema seria de R\$ 4,53 / m³ se o consumo global for inferior a 30 m³ / mês e seria de R\$ 7,73 / m³ se o consumo exceder 30 m³ / mês, valores que levam em consideração o abastecimento de água e a coleta de esgoto.

Considera-se, segundo (SANEPAR, 2005), para a residência padrão um consumo de 21 m³ mensais, sendo que 9 m³ mensais seriam fornecidos pelo sistema de captação de águas pluviais (1,5mm/dia e área de 200 m²). Neste caso o benefício mensal do sistema, exceto nas falhas, seria de R\$ 4,53 (custo marginal) por metro cúbico adicional a totalizando R\$ 40,77 e o benefício anual R\$ 489,24.

O sistema de cálculo do benefício deve contudo considerar a variação no pagamento à concessionária em função do risco de faltar água no reservatório de captação.

O valor esperado do déficit não atendido pelo volume de regularização V será dado por:

$$D^* = \int_V^{\infty} x \cdot f(x) dx \quad (9)$$

Sendo x a variável aleatória máximo déficit anual e $f(x)$ a sua densidade de probabilidade correspondente. Considerando que, $E(x) = \int_{\xi}^{\infty} x \cdot f(x) dx$, a equação (9) resulta:

$$D^* = E(x) - \int_{\xi}^V x \cdot f(x) dx \quad (10)$$

Sendo $E(x) = \xi + \exp(\mu + \sigma^2 / 2)$ e

$$f(x) = \frac{1}{(x - \xi) \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(x - \xi) - \mu}{\sigma}\right]^2\right\} \quad x \geq \xi$$

Manipulando a integral da expressão (10) resulta:

$$\int_{\xi}^V x \cdot f(x) dx = \xi \cdot \Phi(Z^*) + \exp(\mu + \sigma^2 / 2) \cdot \Phi(Z^* - \sigma) \quad (11)$$

Com: $Z^* = \frac{\ln(V - \xi) - \mu}{\sigma}$ e $\Phi(\cdot)$ a função de distribuição normal padrão (tabelada).

Substituindo (11) em (10) e sendo $E(x) = \xi + \exp(\mu + \sigma^2 / 2)$ resulta para D^* em mm:

$$D^* = \xi \cdot [1 - \Phi(Z^*)] + \exp(\mu + \sigma^2 / 2) \cdot [1 - \Phi(Z^* - \sigma)] \quad (12)$$

Para obter D^* em m^3 /dia basta multiplicar pela área de captação.

A expressão (12) permite calcular o valor esperado do déficit não atendido pelo reservatório e que por tanto precisa ser suprido pela concessionária ao custo da tarifa. Assim o benefício anual do sistema em reais será dado por:

$$B = (C \cdot n - D^*) \cdot T \cdot A / 1000 \text{ (m)} \quad (13)$$

Sendo:

C = consumo suprido pelas águas pluviais (mm/dia)

T = tarifa marginal de fornecimento (R\$/ m^3)

A = área de captação (m^2)

n = número de dias do ano (365 dias)

D^* = valor esperado do déficit não suprido (mm)

Cálculos similares, sempre considerando uma área de captação de 200 m², levam aos resultados da tabela 11.

TABELA: 11 - BENEFÍCIO LÍQUIDO

Volume (m ³)	Consumo (l/m ² .dia)			
	1,0	1,5	2,0	2,5
30	330,69	495,18	652,23	769,49
20	330,61	491,39	633,25	727,14
15	330,27	484,53	615,92	711,61
10	327,99	468,36	598,78	705,74
5	313,20	449,55	593,37	705,23

Fonte: Autor, 2007.

Determinou-se a taxa interna de retorno considerando uma vida útil de 30 anos e reposições e manutenção anual igual a 0,5 % do investimento inicial.

Para tanto resolveu-se por tentativas para “*i*” a equação:

$$\frac{i(1+i)^n}{[(1+i)^n - 1]} = \frac{B}{I} - m \quad (14)$$

Onde:

n = vida útil (30 anos)

m = taxa de manutenção (0,005)

B = benefício líquido

I = investimento inicial

Os resultados são mostrados na tabela 12, para vários consumos e volumes do reservatório.

TABELA: 12 - TAXA INTERNA DE RETORNO

Volume (m ³)	Investimento (R\$)	(1,5 l/m ² .dia)	
		Benefício (R\$)	TIR (a.a.)
30	16375,71	495,18	0,00%
20	11445,56	491,39	0,86%
15	8980,5	484,53	2,68%
10	6515,43	468,36	5,25%
5	4050,36	449,55	9,99%

Fonte: Autor, 2007.

Os valores das taxas internas de retorno – TIR, foram calculadas em relação aos benefícios oriundos das atuais tarifas cobradas pelo abastecimento de água e a coleta de esgoto. Valores estes que seriam maiores levando em consideração que as atuais tarifas cobradas estão em defasagem financeira dada à política de congelamento adotada segundo uma ação social dos governantes. Seria necessário neste caso identificar o valor real da tarifa de abastecimento de água e a coleta de esgoto além do acréscimo projetado em virtude do aumento dos custos de tratamento e transporte pela distância de coleta de água para abastecimento e uma melhor técnica de tratamento de esgoto.

A escolha do volume do reservatório depende da combinação entre consumo e risco anual, sendo a atratividade econômica muito sensível ao risco adotado. A tabela 13 relaciona volumes e risco para vários níveis de consumo considerando sempre uma área de captação de 200 m².

TABELA: 13 - RESUMO DO GRAU DE RISCO, UMA ÁREA DE CAPTAÇÃO DE 200 m²

Reservatórios	Consumo de 1,0 l/m ² .dia	Consumo de 1,5 l/m ² .dia	Consumo de 2,0 l/m ² .dia	Consumo de 2,5 l/m ² .dia
1 m ³	*	*	*	*
2 m ³	*	*	*	*
3 m ³	96,48%	*	*	*
5 m ³	53,98%	96,57%	99,86%	*
10 m ³	4,75%	42,68%	84,13%	96,69%
15 m ³	*	13,07%	51,70%	82,85%
20 m ³	*	4,12%	26,08%	62,09%
25 m ³	*	*	12,56%	42,14%
30 m ³	*	*	6,08%	26,98%
35 m ³	*	*	2,98%	16,67%

Fonte: Autor, 2007.

Considerando-se riscos anuais de falhas não superiores a 25% (i.e. tempo de retorno de 4 anos) as taxas internas de retorno para os volumes de regularização necessários (ver tabela 17) situam-se bastante abaixo do que poderia ser considerada uma taxa financeira atraente.

Por outro lado se for aceitável aumentar o risco de falha para valores próximos a 50% (tempo de retorno igual a 2 anos) as taxas de retorno atingem valores próximos a 6% a.a. principalmente para consumos até 1,5 mm/dia.

4. CONCLUSÕES

Para as tarifas de água residenciais e custos atuais a viabilidade econômica de um sistema de captação e regularização de águas pluviais implica na aceitação de riscos de falha bastante elevados (da ordem de 40% a 50%). Contudo dado o caráter complementar do sistema (a residência continua

ligada à rede pública de abastecimento) esse fato não causaria problemas de abastecimento.

A atratividade econômica aumenta com a área de captação (mantido o nível de risco) sendo necessário no caso residências com seis habitantes um mínimo de 200 m² de área de captação para taxas internas de retorno da ordem de 6%. Ficou evidenciada a aplicabilidade do método do máximo déficit acumulado para análise de confiabilidade de sistemas de captação de águas pluviais.

As tarifas públicas de água poderão sofrer, no futuro, aumentos decorrentes da implementação da política do usuário-pagador para as captações destinadas ao abastecimento, o que aumentaria a atratividade de um sistema de captação de águas pluviais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Coordenação do Curso de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade de realizar este curso de mestrado contribuindo para minha formação profissional e científica.

Aos professores do Curso de Pós-graduação sou grato pelos conhecimentos que pude adquirir, pela sua dedicação ao ensino e disponibilidade de esclarecer dúvidas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente; **Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL**. Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Brasília, 2000.

CASELLA, G, BERGER, R.L.; **Statistical Inference**, 650 p., Wadsworth & Brooks, 1990.

CURITIBA, Secretaria do Meio Ambiente; **Decreto nº 791** de 12 de agosto de 2003. Curitiba, 2003.

DINGMAN, S. L. **Physical hydrology**: upper saddle river. New Jersey: Prentice-Hall, 1993. 575 p.

GOMIDE, F. L. S.; **Teoria Estocástica dos Reservatórios Aplicada ao Planejamento de Sistemas Hidrelétricos**. Tese apresentada na inscrição para o Concurso de Professor Titular do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1986

GROUP RAINDROPS; **Aproveitamento da Água de Chuva**. Brasil: Ed. Trading, 2002.

LOUCKS, D. P., STEDINGER, J. R. , HAITH, D. A.; **Water Resources Systems Planning and Analysis**, 559 p.. Prentice Hall, 1981.

SANEPAR, Companhia de Saneamento do Paraná; Decreto Estadual 4266 de 31 de janeiro, Paraná, 2005.

STEDINGER, J. R.; **Fitting Log Normal Distributions to Hydrologic Data**. Water Resources Research, vol.16, nº 3, p.481-490, (1980).

VIGGIANO, M. H.; **Sistemas Sustentáveis da Casa Autônoma**. Disponível em <http://www.casaautonoma.com.br>. Acesso em 19 de junho de 2005.