

AVALIAÇÃO DO RISCO DE OCORRÊNCIA DE FALHAS DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO/ARMAZENAMENTO DE ÁGUA

Alice Silva de Castilho¹; Marcelo Garcia Miranda Diniz¹; Marlon Borges Avelar¹; Ana Paula Parenti Vianna¹; Cláudia Dias Rosi Nobre²; Rafael Burgarelli³

RESUMO – O presente trabalho tem como objetivo apresentar os resultados da avaliação do funcionamento de estruturas de armazenamento/bombeamento de água de chuva, dimensionadas por métodos tradicionais, com chuva/vazão de projeto associada a um período de retorno. A avaliação foi feita a partir da simulação do funcionamento destas estruturas submetidas a eventos extremos consecutivos através de modelagem matemática computacional, utilizando precipitações registradas na série histórica de dados das estações pluviométricas representativas da região do empreendimento com 70 anos de observação e transformação desta em vazão pelo método racional. Os resultados mostram que, para o tipo de discretização da precipitação utilizado, os sistemas não falharam para a vazão de projeto, mesmo que submetido a eventos extremos consecutivos.

ABSTRACT – This paper presents the evaluation results of the operation of storage structures / pumping rainwater, designed by traditional methods, with rain / design flow associated with a return period. The evaluation was made from the simulation of these structures for extreme consecutive events using computational mathematical modeling, and rainfall recorded in the time series data of rainfall stations representing the region's project with 70 years of observation and transformation into the flow rational method. The results show that for the type of discretization used in precipitation, the systems did not fail for the design flow, even when subjected to extreme consecutive events.

Palavras-chave: Falhas, modelagem, sistemas de armazenamento/bombeamento.

1) Golder Associates Brasil Consultoria e Projetos Ltda. Rua dos Inconfidentes, 1011/7º andar, Funcionários, CEP 30140-120, Belo Horizonte - MG. Email: acastilho@golder.com.br, mdiniz@golder.com.br, mavelar@golder.com.br, apvianna@golder.com.br.

2) Engenheira Civil pela UFES. Rua Piratinha, 33, Praia da Costa, CEP 29101-220, Vila Velha - ES. Email: claudia.rosi@hotmail.com.

3) Engenheiro Ambiental pela FAESA. Rua Laurentino Proença Filho, 736, Jardim da Penha, CEP 29060-440, Vitória - ES. Email: rafaelburgarelli@uol.com.br.

INTRODUÇÃO

As estruturas de sistemas de drenagem, quer sejam de condução, armazenamento ou bombeamento, são tradicionalmente dimensionadas a partir da vazão de projeto associada a um período de retorno, que corresponde neste caso, ao inverso da probabilidade de falha da estrutura num ano qualquer.

Quando se analisa o funcionamento destas estruturas ao longo de um período de tempo analisa-se o risco de falha da estrutura a partir da expressão apresentada a seguir:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \quad (1)$$

na qual:

T é o tempo de retorno (em anos);

N é o número de anos.

Como, em geral, as estruturas têm um funcionamento previsto por mais de um ano, é necessário analisar este risco de falha de acordo com a vida útil do projeto. Assim, após o dimensionamento da estrutura para a vazão de projeto é necessário verificar seu comportamento quando submetida a eventos críticos consecutivos.

Para a definição da vazão de projeto de estruturas utilizam-se séries históricas de monitoramento. Quando não se tem informações de vazões, é usual a utilização de modelo de transformação chuva x vazão, pois o número de estações pluviométricas existentes é bem maior do que o número de estações fluviométricas.

A discretização da chuva como dado de entrada dos modelos chuva x vazão é função do tempo de concentração da bacia. Assim, quanto menor for a área de drenagem a montante das estruturas, maior deverá ser a discretização da chuva. Porém, as séries de dados pluviométricos disponíveis com mais de 30 anos de observações, consideradas séries robustas e representativas, são geralmente compostas por registros de chuvas diárias. Assim, para áreas de drenagem pequenas é necessário discretizar a chuva diária em intervalos menores, da ordem de horas ou até mesmo minutos.

Várias técnicas de discretização de chuva foram desenvolvidas a partir da análise de registros discretizados, que tem como objetivo reproduzir o comportamento médio dos eventos. Ressalta-se que em alguns destes eventos a chuva não se comporta como o previsto pela técnica de discretização.

Assim, este artigo tem como objetivo analisar o funcionamento de estruturas de armazenamento e bombeamento de água de chuva dimensionadas a partir da vazão de projeto

obtida por meio de modelos chuva x vazão com dados de precipitação diária discretizados pelo método de Huff, quando submetidas a eventos críticos consecutivos de chuva diária discretizados pelo método de Huff;

Importante ressaltar que uma das causas de falhas das estruturas dos sistemas de drenagem é a falta de manutenção que, neste trabalho, foi considerada como adequada.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área em estudo trata-se de um porto marítimo de exportação de minério de ferro, que é até ai transportado por meio de ferrovia. O minério pode ser exportado na forma de finos ou de pelotas, de acordo com a necessidade do cliente. Para o beneficiamento desse último tipo de produto, existem no empreendimento usinas de pelotização, que transformam o minério fino em pelotas através de processo térmico.

A água efluente do processo industrial e a parcela resultante da drenagem pluvial da unidade industrial, inclusive dos pátios de estocagem de minério e pelotas, são direcionadas para bacias de decantação. Esses reservatórios alimentam um anel de distribuição responsável pelo fornecimento de água recirculada para a área industrial. Quando da ocorrência de precipitações pluviométricas o excedente das bacias decantação é submetido a um tratamento complementar e lançado ao mar.

Parte da água utilizada no processo de pelotização se perde por evaporação nas torres de resfriamento, sendo necessária a reposição (*make-up*) dessa água, cujos requisitos de qualidade não são atendidos pela água recirculada.

Assim, da demanda de água nova do empreendimento da ordem de 1050 m³/h, cerca de 400 m³/h podem ser provenientes de água de recirculação. Pretende-se reformar o sistema de drenagem pluvial existente, que recebe também água de processo, de forma a maximizar a utilização da água de chuva como água de recirculação para o empreendimento; bem como direcionar o excedente para o sistema de tratamento de efluentes.

A área total do empreendimento é da ordem de 1270 ha, estando grande parte já ocupada pela área industrial, pátios de minério e estruturas de apoio. Portanto, não há grandes áreas disponíveis para a construção de reservatórios de armazenamento de água pluvial. Além disso, por se tratar de uma região próxima ao mar, as estruturas de armazenamento não podem ser muito profundas o que provocaria problemas de grandes variações do nível d'água subterrâneo e até mesmo intrusão salina.

Outro fator limitante para a instalação de reservatórios de armazenamento de água pluvial é o grande número de lagoas naturais preservadas na área do empreendimento.

CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA

A estação climatológica mais próxima do empreendimento é a estação Vitória (Códigos INMET 83648 e ANA 02040035) operada pelo INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, cujas características são apresentadas na Tabela 1.

Também na Tabela 1 podem ser visualizadas as características da estação pluviométrica regional Fazenda Fonte Limpa (Código ANA 02040003) pertencente à rede hidrometeorológica da ANA - Agência Nacional de Águas, selecionada como a mais representativa do regime pluviométrico da área em estudo.

Tabela 1 – Características das estações hidrometeorológicas representativas da área em estudo

Nome	Código ANA	Coordenadas Geográficas		Responsável	Tipo	Município	Período de Dados
		Latitude	Longitude				
Vitória	02040035	20°19'12"S	40°19'12"W	INMET	Climatológica	Vitória	1925 a 1998
Fazenda Fonte Limpa	02040003	20°11'25"S	40°19'08"W	ANA	Pluviométrica	Serra	1965 a 2009

Os registros médios observados na estação Vitória no período de 1961 a 1990, apresentados na publicação Normais Climatológicas (INMET, 1992), são:

- Evaporação Total Anual (E): 931,7 mm;
- Temperatura Média Anual (T): 24,2 °C;
- Umidade Relativa (UR): 76,7%.

A precipitação média anual (P) obtida para as séries históricas das estações Fazenda Fonte Limpa e Vitória é de 1323,3 e 1285,2 mm, respectivamente.

Os valores médios mensais dos parâmetros supramencionados encontram-se apresentados na Tabela 2 e, no caso da precipitação, a variação mensal pode ser visualizada na Figura 1.

Tabela 2 – Média mensal das variáveis climatológicas representativas da área em estudo

Variável	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm) ¹	151,3	93,7	127,1	90,4	67,8	53,3	73,0	62,3	92,1	123,6	205,8	187,4	1323,3
P (mm) ²	132,2	87,7	129,3	107,8	80,8	58,9	66,3	49,5	74,6	128,4	180,8	202,7	1285,2
E (mm)	88,3	83,3	85,4	80,4	74,7	68,8	70,6	78,7	75,4	72,2	74,1	79,8	913,7
T (°C)	26,3	26,9	26,5	25,2	23,7	22,5	21,7	22,2	22,6	23,5	24,4	25,4	24,2
UR (%)	76	75	76	76	76	77	77	76	77	78	78	78	76,7

¹ Dados da estação Fazenda Fonte Limpa.

² Dados da estação Vitória.

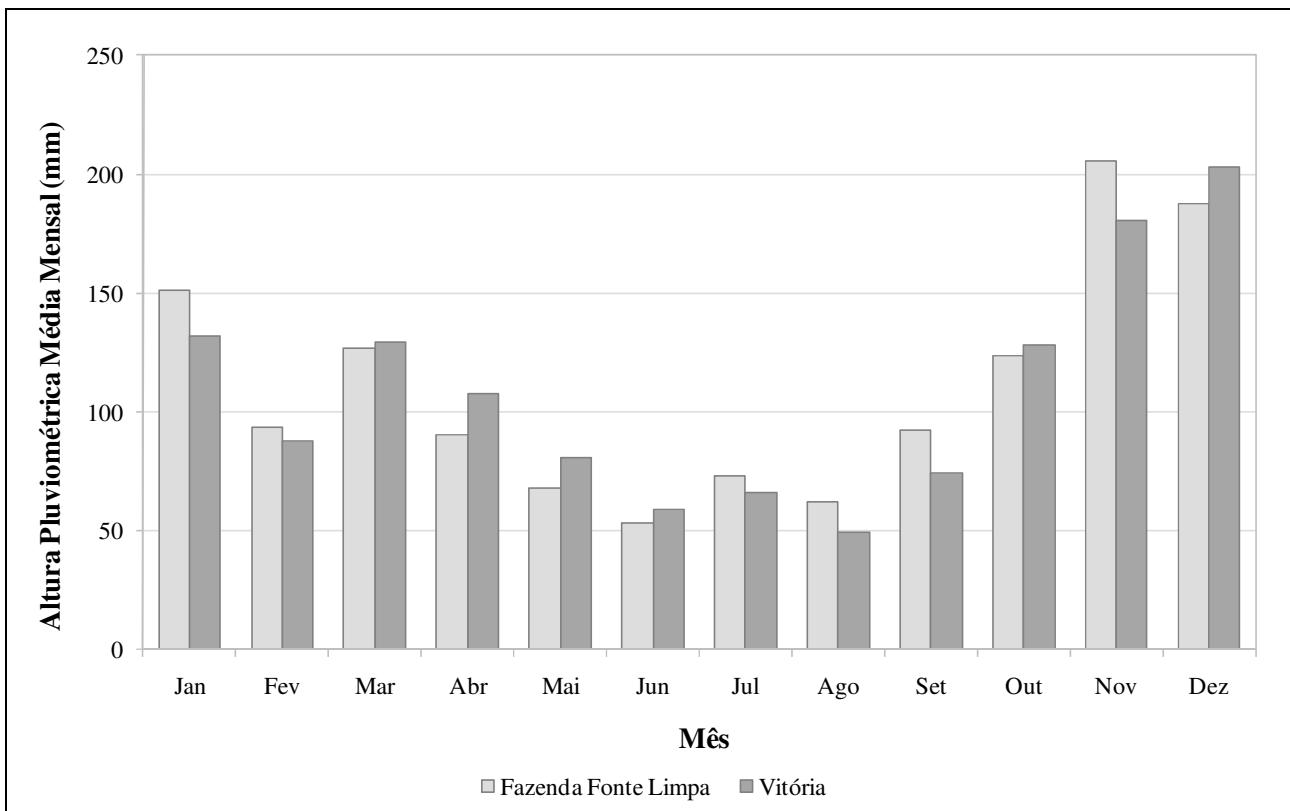


Figura 1 – Variação Mensal da Precipitação (P) – Estações Fazenda Fonte Limpa e Vitória

A partir da análise da Figura 1 dois períodos bem definidos podem ser observados: chuvoso de outubro a janeiro e seco de maio a agosto. Verifica-se que mesmo no período seco são registradas precipitações médias mensais acima de 50 mm, indicando a possibilidade de geração de escoamento superficial a ser coletado pelo sistema de drenagem.

METODOLOGIA

A metodologia empregada consistiu nas seguintes etapas:

- Definição da curva intensidade x duração x freqüência de precipitações (IDF);
- Cálculo das vazões de projeto;
- Modelagem matemática computacional;
- Determinação de estruturas de armazenamento/bombeamento
- Aplicação do modelo considerando as estruturas de armazenamento/bombeamento.

Definição da curva IDF

A definição da curva IDF para o local do empreendimento foi realizada a partir de um estudo de chuvas intensas para as séries de precipitações diárias das estações Vitória e Fazenda Fonte

Limpa, caracterizadas no item Caracterização Climatológica, cujos valores máximos anuais são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Séries de Precipitações Máximas Anuais de 1 Dia de Duração - Estações Vitória (02040035) e Fazenda Fonte Limpa (02040003)

Ano Hidrológico	Precipitação Máxima Anual (mm)		Ano Hidrológico	Precipitação Máxima Anual (mm)	
	Vitória	Fazenda Fonte Limpa		Vitória	Fazenda Fonte Limpa
1925/1926	74,0	-	1968/1969	196,9	-
1926/1927	69,7	-	1969/1970	115,2	-
1927/1928	89,9	-	1970/1971	100,2	118,4
1928/1929	125,7	-	1971/1972	-	89,6
1929/1930	74,3	-	1972/1973	-	45,2
1930/1931	79,6	-	1973/1974	-	56,1
1931/1932	77,6	-	1974/1975	154,0	68,0
1932/1933	85,0	-	1975/1976	78,8	120,2
1933/1934	69,8	-	1976/1977	111,1	85,4
1934/1935	136,2	-	1977/1978	142,4	98,6
1935/1936	82,5	-	1978/1979	68,5	86,4
1936/1937	118,0	-	1979/1980	75,9	80,8
1937/1938	67,7	-	1980/1981	134,7	50,6
1938/1939	47,4	-	1981/1982	94,1	122,0
1939/1940	147,7	-	1982/1983	103,6	150,4
1940/1941	100,6	-	1983/1984	142,9	153,0
1941/1942	70,8	-	1984/1985	103,5	94,2
1942/1943	64,6	-	1985/1986	141,6	102,2
1943/1944	63,9	-	1986/1987	53,2	45,4
1944/1945	72,4	-	1987/1988	87,2	87,6
1945/1946	56,1	-	1988/1989	82,1	25,8
1946/1947	74,5	-	1989/1990	85,2	25,8
1947/1948	71,8	-	1990/1991	119,0	-
1948/1949	129,8	-	1991/1992	167,6	25,8
1949/1950	97,4	-	1992/1993	68,9	25,6
1950/1951	36,5	-	1993/1994	92,1	30,8
1951/1952	85,2	-	1994/1995	84,6	39,2
1952/1953	48,9	-	1995/1996	77,8	-
1953/1954	114,4	-	1996/1997	95,7	86,6
1954/1955	71,2	-	1997/1998	70,9	85,7
1955/1956	73,9	-	1998/1999	-	68,0
1956/1957	103,6	-	1999/2000	-	132,2
1957/1958	105,4	-	2000/2001	-	151,7
1958/1959	138,7	-	2001/2002	-	170,0
1959/1960	129,6	-	2002/2003	-	80,2
1960/1961	96,4	-	2003/2004	-	67,4
1961/1962	58,6	-	2004/2005	-	161,3
1962/1963	48,8	-	2005/2006	-	68,7
1964/1965	63,3	-	2006/2007	-	96,8
1965/1966	-	85,8	2007/2008	-	85,1
1966/1967	135,5	116,6	2008/2009	-	84,5
1967/1968	183,8	67,2			

A análise de freqüência para as séries de máximos anuais com 1 dia de duração foi realizada utilizando os programas SEAF (Sistema Especialista em Análise de Freqüência de Eventos Hidrológicos Máximos Anuais), desenvolvido por Candido e Naghettini, e ALEA (Análise de Freqüência Local de Eventos Anuais), desenvolvido por Lima e Naghettini, ambos de domínio público, disponíveis no endereço eletrônico www.ehr.ufmg.br/downloads.php.

Dentre as distribuições de probabilidade analisadas a distribuição Gumbel foi a escolhida para obtenção dos quantis pluviométricos diários das séries das duas estações, cujos valores associados a diferentes tempos de retorno estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Quantis da Distribuição Gumbel Ajustada às Séries de Máximos Anuais – Alturas Máximas de Precipitação (mm)

Estação	Tempo de Retorno (anos)								
	2	5	10	25	50	100	500	1000	10000
Vitória	89,9	119,8	139,6	164,6	183,2	201,7	244,3	262,6	323,4
Fazenda Fonte Limpa	79,6	117,9	143,3	175,4	199,2	222,9	277,5	300,9	378,9

O ajuste dos quantis de altura de chuva de 1 dia para 24 horas foi realizado por meio do coeficiente multiplicador 1,14, conforme recomendação da CETESB (1986). Para a desagregação da chuva em durações inferiores a 24 h foi utilizada a equação apresentada a seguir, que permite o cálculo dos coeficientes de desagregação para diferentes durações superiores a 5 minutos, a partir da chuva de 24 h (Silveira, 2000).

$$C_{24} = e^{1,509 \ln \left(\frac{\ln d}{7,3165} \right)} \quad (2)$$

na qual:

C_{24} é o coeficiente de desagregação da chuva de 24 h para a chuva de duração d ;
 d é a duração da chuva (em min).

Na Tabela 5 são apresentados os coeficientes obtidos para algumas durações entre 5 minutos e 14 h, que são constantes para quaisquer períodos de retorno.

Tabela 5 - Coeficientes de Desagregação para a Chuva de 24 Horas

Duração	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	1 h	2 h	4 h	6 h	8 h	10 h	12 h	14 h
C ₂₄	0,10	0,17	0,22	0,26	0,29	0,31	0,42	0,53	0,65	0,72	0,77	0,82	0,85	0,88

A partir das relações apresentadas na Tabela 5 e considerando o fator de 1,14 entre a chuva de 24 h e a de 1 dia, foram obtidos para as estações Vitória e Fazenda Fonte Limpa os quantis de altura máxima de precipitação associados a diferentes tempos de retorno e durações iguais ou inferiores a 24 horas, cujos valores podem ser visualizados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 – Alturas Máximas de Precipitação (mm) – Estação Vitória (02040035)

Duração da Chuva	Tempo de Retorno (anos)								
	2	5	10	25	50	100	500	1000	10000
5 min	10,4	13,9	16,2	19,1	21,3	23,4	28,3	30,5	37,5
10 min	17,9	23,9	27,8	32,8	36,5	40,2	48,7	52,3	64,4
15 min	22,9	30,5	35,5	41,9	46,6	51,3	62,1	66,8	82,3
20 min	26,6	35,5	41,4	48,8	54,3	59,7	72,4	77,8	95,8
25 min	29,7	39,6	46,1	54,4	60,5	66,6	80,7	86,7	106,8
30 min	32,2	43,0	50,1	59,1	65,7	72,4	87,7	94,2	116,0
1 h	42,7	56,9	66,3	78,2	87,0	95,7	116,0	124,7	153,5
2 h	54,0	72,0	83,9	99,0	110,1	121,2	146,8	157,8	194,4
4 h	66,2	88,3	102,9	121,4	135,1	148,7	180,1	193,6	238,4
6 h	73,8	98,3	114,6	135,2	150,4	165,6	200,5	215,6	265,5
8 h	79,3	105,7	123,2	145,3	161,6	177,9	215,5	231,7	285,3
10 h	83,6	111,5	129,9	153,3	170,5	187,7	227,4	244,4	301,0
12 h	87,3	116,3	135,6	159,9	177,9	195,8	237,2	255,0	314,1
14 h	90,4	120,5	140,4	165,6	184,3	202,8	245,7	264,1	325,2
24 h	102,4	136,5	159,1	187,7	208,9	229,9	278,5	299,3	368,7

Tabela 7 – Alturas Máximas de Precipitação (mm) – Estação Fazenda Fonte Limpa (02040003)

Duração da Chuva	Tempo de Retorno (anos)								
	2	5	10	25	50	100	500	1000	10000
5 min	9,2	13,7	16,6	20,4	23,1	25,9	32,2	34,9	44,0
10 min	15,9	23,5	28,5	34,9	39,7	44,4	55,3	59,9	75,5
15 min	20,2	30,0	36,5	44,6	50,7	56,7	70,6	76,6	96,4
20 min	23,6	34,9	42,5	52,0	59,0	66,0	82,2	89,2	112,3
25 min	26,3	38,9	47,3	57,9	65,8	73,6	91,6	99,4	125,1
30 min	28,6	42,3	51,4	62,9	71,5	80,0	99,6	108,0	136,0
1 h	37,8	56,0	68,0	83,3	94,6	105,8	131,7	142,9	179,9
2 h	47,8	70,9	86,2	105,4	119,8	134,0	166,8	180,9	227,7
4 h	58,7	86,9	105,7	129,3	146,9	164,3	204,5	221,8	279,3
6 h	65,3	96,8	117,7	144,0	163,6	183,0	227,8	247,1	311,0
8 h	70,2	104,0	126,5	154,8	175,8	196,6	244,8	265,5	334,3
10 h	74,1	109,8	133,4	163,3	185,4	207,4	258,3	280,1	352,7
12 h	77,3	114,5	139,2	170,4	193,5	216,4	269,5	292,2	367,9
14 h	80,0	118,6	144,1	176,4	200,4	224,1	279,0	302,6	381,0
24 h	90,7	134,4	163,4	200,0	227,1	254,0	316,3	343,0	431,9

A definição dos quantis de projeto para o empreendimento em estudo foi realizada a partir dos valores de altura máxima de precipitação obtidos para as estações Fazenda Fonte Limpa (Tabela 6) e Vitória (Tabela 7), adotando-se os maiores valores encontrados para cada TR e duração.

Dessa forma, os quantis de projeto para o empreendimento em estudo, apresentados na Tabela 8, correspondem aos valores da estação Fazenda Fonte Limpa, a exceção dos TRs 2 e 5 anos, para os quais foram adotados as alturas máximas de precipitação da estação Vitória.

Tabela 8 – Alturas Máximas de Precipitação (mm) – Empreendimento em estudo

Duração da Chuva	Tempo de Retorno (anos)								
	2	5	10	25	50	100	500	1000	10000
5 min	10,4	13,9	16,6	20,4	23,1	25,9	32,2	34,9	44,0
10 min	17,9	23,9	28,5	34,9	39,7	44,4	55,3	59,9	75,5
15 min	22,9	30,5	36,5	44,6	50,7	56,7	70,6	76,6	96,4
20 min	26,6	35,5	42,5	52,0	59,0	66,0	82,2	89,2	112,3
25 min	29,7	39,6	47,3	57,9	65,8	73,6	91,6	99,4	125,1
30 min	32,2	43,0	51,4	62,9	71,5	80,0	99,6	108,0	136,0
1 h	42,7	56,9	68,0	83,3	94,6	105,8	131,7	142,9	179,9
2 h	54,0	72,0	86,2	105,4	119,8	134,0	166,8	180,9	227,7
4 h	66,2	88,3	105,7	129,3	146,9	164,3	204,5	221,8	279,3
6 h	73,8	98,3	117,7	144,0	163,6	183,0	227,8	247,1	311,0
8 h	79,3	105,7	126,5	154,8	175,8	196,6	244,8	265,5	334,3
10 h	83,6	111,5	133,4	163,3	185,4	207,4	258,3	280,1	352,7
12 h	87,3	116,3	139,2	170,4	193,5	216,4	269,5	292,2	367,9
14 h	90,4	120,5	144,1	176,4	200,4	224,1	279,0	302,6	381,0
24 h	102,4	136,5	163,4	200,0	227,1	254,0	316,3	343,0	431,9

Cálculo das vazões de projeto

As vazões de projeto são compostas por duas contribuições: drenagem pluvial e água de processo.

Drenagem pluvial

Para as áreas de contribuição expostas a precipitação e onde há drenagem pluvial a vazão foi calculada utilizando o método Racional, indicado para bacias com área de drenagem inferiores a 1,0 km². A equação que descreve a transformação chuva-vazão com a utilização do método Racional é apresentada a seguir:

$$Q = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A \quad (3)$$

na qual,

Q é a vazão de pico (em m³/s);

C é o coeficiente de escoamento superficial (adimensional);

i é a intensidade da precipitação, correspondente ao tempo de duração crítico (em mm/h);

A é a área de drenagem (em km²).

Os valores do coeficiente de escoamento superficial C adotados para os diferentes tipos de uso e ocupação do solo identificados no empreendimento são apresentados na Tabela 9. Esses valores foram ponderados em cada uma das bacias de contribuição a partir da área correspondente a cada tipo de ocupação do terreno.

Tabela 9 – Tipologias de Uso e Ocupação do Solo e Respectivos Coeficientes de Escoamento Superficial (C) Adotados

Uso e Ocupação do solo	C
Pátios de estocagem e entorno	0,90
Planta industrial	0,75
Arruamento	0,85
Vegetação	0,20
Edificação	0,85
Espelho d'água	1,00

Água de processo

Essa parcela da vazão de projeto corresponde aos efluentes industriais gerados nas diversas unidades do circuito de água da planta industrial. Os valores foram obtidos a partir de documentos existentes no arquivo técnico do cliente, planilhas de monitoramento, entrevistas com profissionais responsáveis pelas diferentes unidades do empreendimento e medições de vazão in loco.

O fluxo da água atual e simplificado do empreendimento, considerando o aporte de água pluvial e os efluentes industriais gerados, encontra-se apresentado na Figura 2.

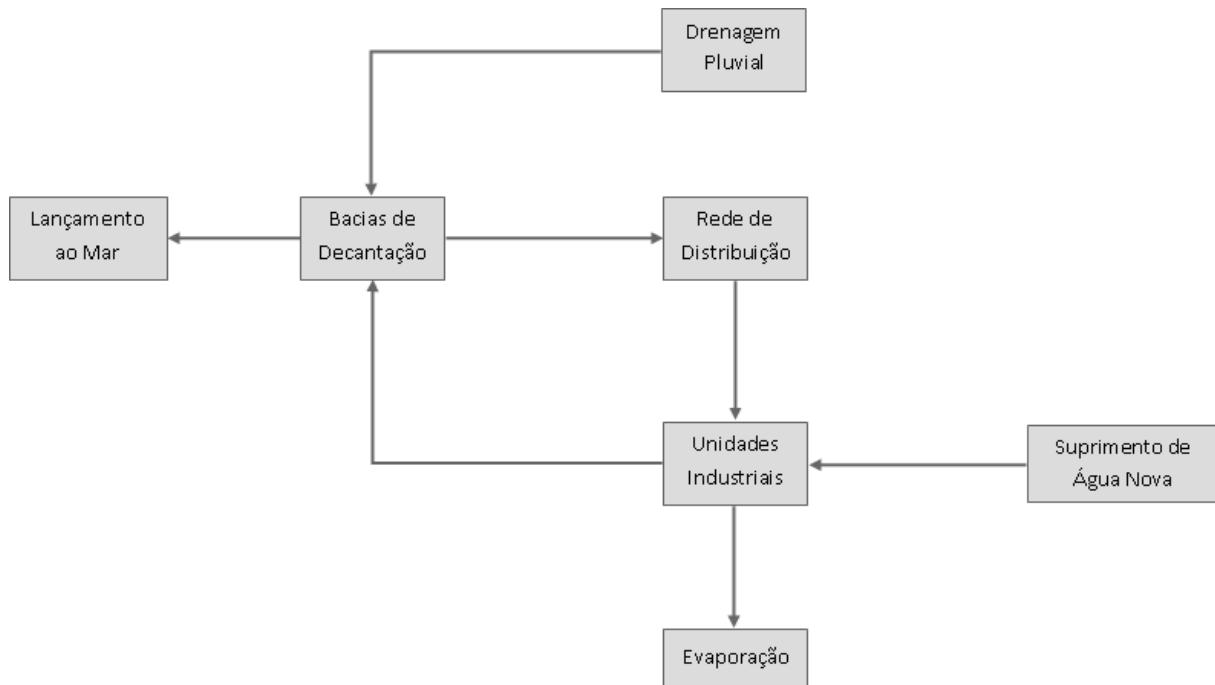


Figura 2 – Representação simplificada do fluxo de água atual do empreendimento

Modelagem matemática computacional

A modelagem matemática foi realizada utilizando o aplicativo GoldSim® (Goldsim, 2007), um *software* gráfico, desenvolvido em plataforma Windows®, que realiza simulações dinâmicas e probabilísticas aplicadas ao gerenciamento e à tomada de decisão nas áreas de engenharia, meio ambiente e finanças. Permite a simulação de sistemas físicos, financeiros ou organizacionais, através da criação e manipulação de dados e equações e a predição de comportamentos e cenários futuros para esses sistemas.

Em relação à gestão de recursos hídricos, o GoldSim® permite a simulação de uma bacia hidrográfica a partir do confronto entre demandas e disponibilidades hídricas, sem e/ou com intervenções estruturais e não-estruturais, incorporando também a abordagem estocástica.

No estudo em questão foi modelado o balanço hídrico entre demandas e disponibilidades utilizando componentes determinísticos ou estocásticos para representar os diversos processos envolvidos no sistema avaliado. Foram realizadas simulações estáticas ou dinâmicas (processos que evoluem ao longo do tempo), incluindo variações sazonais das demandas e simulação de reservatórios, incorporando as regras operativas e as características hidráulicas de cada estrutura.

Como resultados foram obtidas as vazões regularizadas, as vazões vertidas e a evolução dos níveis de armazenamento dos reservatórios, sendo possível determinar a probabilidade de ocorrência de falhas e suas consequências, bem como alterar as premissas adotadas de forma a minimizar as situações de funcionamento não adequadas identificadas.

Determinação de estruturas de armazenamento/bombeamento

Utilizando o modelo do fluxo da água no empreendimento foram simulados três cenários para a chuva de 24 horas de duração com discretização a cada 5 minutos, pelo método de Huff para 10, 50 e 100 anos de período de retorno.

Como resultado da modelagem matemática foram identificados pontos críticos quanto a ocorrência de transbordamentos, para os quais foram previstas estruturas de armazenamento/bombeamento de acordo com os volumes determinados na modelagem. As vazões de bombeamento foram definidas a partir do volume determinado e a premissa de esgotar a estrutura em 24h.

De acordo com a área disponível para implantação das estruturas previstas, foi definido o período de retorno para o dimensionamento da estrutura.

Aplicação do modelo considerando as estruturas de armazenamento/bombeamento

A modelagem matemática foi realizada considerando a implantação das novas estruturas de armazenamento/bombeamento, verificando o funcionamento das mesmas para o cenário de três dias com precipitação intensa com período de retorno associado compatível com o adotado no dimensionamento da estrutura.

Neste caso a precipitação com três dias de duração também foi discretizada a cada 5 minutos, porém para não haver abatimento significativo do pico de precipitação, foi considerada que a chuva com três dias de duração é uma sequência de três eventos de precipitação intensa com duração de 1 dia cada um.

A partir dessa modelagem foi possível identificar as falhas registradas no sistema durante a operação do empreendimento.

RESULTADOS

Utilizando a modelagem matemática foram identificados os pontos críticos onde são verificados atualmente transbordamentos no empreendimento. Foram determinados os volumes destes transbordamentos e as vazões máximas observadas, considerando a chuva com 24h de duração, discretizada a cada 5 minutos, para os períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos.

Os pontos críticos identificados são as estruturas: A, B, C, D, E e F. Nas proximidades destas estruturas foram identificadas áreas onde pudessem ser construídos reservatórios para o armazenamento do volume de transbordamento. A Figura 3 apresenta o posicionamento esquemático dos pontos críticos onde é necessária a inserção de estruturas de armazenamento e bombeamento.

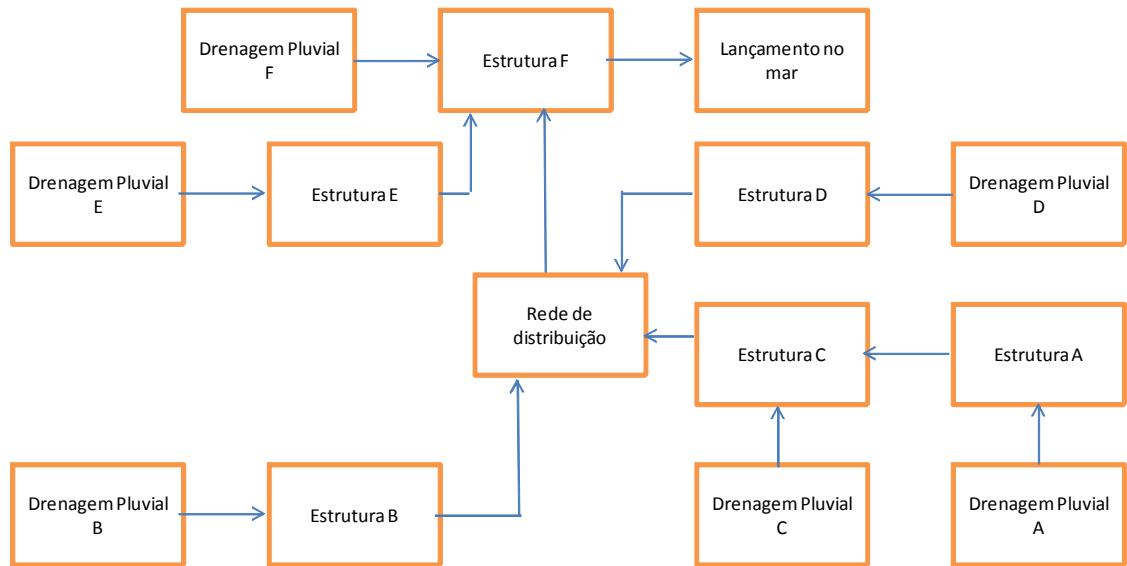


Figura 3 – Posicionamento esquemático dos pontos críticos

No caso do ponto E, como a área disponível para reservação próxima a ele é muito pequena, praticamente toda a vazão efluente será bombeada para a estrutura F sem reservação. Assim o volume requerido para armazenamento em F aumentará significativamente. Além disso, como as estruturas A e C estão localizadas em série, qualquer intervenção em termos de aumento de capacidade de reservação de uma estrutura mais a montante diminuirá o volume requerido para armazenamento em uma estrutura mais a jusante.

Ressalta-se que existe a possibilidade da reutilização da água de chuva como uma das fontes de abastecimento do empreendimento a qual foi incorporada na modelagem, porém esta vazão é muito pequena se comparada com a vazão resultante da drenagem pluvial em eventos extremos.

Assim, levando-se em conta as áreas disponíveis para reservação, o uso da água de chuva como água de recirculação no empreendimento e a localização dos pontos críticos dentro do fluxo da água, foram definidos os volumes requeridos para armazenamento da água pluvial. Como há restrição de áreas disponíveis para a reservação, foi possível prever estruturas somente para o período de retorno de 10 anos, as quais se encontram apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Volumes requeridos para armazenamento de água de chuva nos pontos críticos para o período de retorno de 10 anos

Ponto Crítico	Afluência	Volume do sistema de armazenamento (m ³)	Vazão do sistema de bombeamento (m ³ /h)
A	A	23.000	960
B	B	7.000	292
C	C	3.500	146
D	D	16.000	667
F	E e F	150.000	6.250

As vazões a serem bombeadas a partir dos pontos críticos A, B, C e D serão direcionadas para o anel de recirculação, enquanto a vazão a ser bombeada do ponto F será direcionada para tratamento e disposição final.

Definidos os volumes e vazões procedeu-se a aplicação do modelo para eventos pluviométricos diários em que o total precipitado, em três dias consecutivos, foi superior a 200 mm, que representa a precipitação com período de retorno de 10 anos para essa duração. Estas precipitações foram retiradas das séries das estações da ANA no período de 1925 a 2009. As características dos eventos encontram-se relacionados na Tabela 11.

Tabela 11 – Características dos eventos utilizados para avaliação do dimensionamento das estruturas

Evento	Data		Precipitação (mm)			
	Início	Fim	Total	Dia 1	Dia 2	
1	03/01/35	05/01/35	215,4	136,2	61,4	17,8
2	02/03/60	04/03/60	225,5	79,8	129,6	16,1
3	17/05/67	19/05/67	208,4	22,7	135,5	50,2
4	22/06/69	24/06/69	277,4	72,9	7,6	196,9
5	20/10/69	22/10/69	207,3	53,8	115,2	38,3
6	18/03/75	20/03/75	221,3	18,0	154,0	49,2
7	02/12/80	04/12/80	262,0	134,7	90,8	36,5
8	03/12/83	05/12/83	284,9	141,9	142,9	0,1
9	14/01/85	16/01/85	208,2	26,0	101,1	81,1
10	21/11/99	23/11/99	282,9	150,7	132,2	1,3

Verificou-se que houve transbordamento nas estruturas A, B, C, D e F somente no evento 4. Neste evento a precipitação registrada no terceiro dia foi de 196,9 mm, maior que a altura pluviométrica com 24h de duração e período de retorno de 10 anos utilizada no dimensionamento das estruturas, igual a 163,4 mm. Utilizando o coeficiente de transformação da chuva de um dia em chuva de 24h, a precipitação de 196,9 mm registrada em um dia corresponde a 224,5 mm em 24h, que por sua vez tem período de retorno da ordem de 50 anos.

CONCLUSÕES

As estruturas foram dimensionadas para armazenamento de precipitação com duração de 24 horas discretizada a cada 5 minutos para um período de retorno de 10 anos. Tal discretização foi adotada em função dos curtos tempos de concentração das áreas de contribuição, compatíveis com 5 minutos. Já a duração do evento de 24 horas foi escolhida para que haja o esgotamento da estrutura em 24 horas de forma a permitir a instalação de bombas de menor capacidade. Por fim, o período de retorno escolhido está relacionado às áreas disponíveis no empreendimento para a instalação de estruturas de reservação.

As estruturas dimensionadas com tais características foram submetidas por meio de modelagem matemática a precipitações extremas registradas na série histórica em três dias consecutivos, considerando três eventos de 24 horas cada, discretizadas a cada 5 minutos. Verificou-se que com esta discretização as estruturas irão falhar para precipitações maiores do que a precipitação de projeto.

É importante ressaltar que, nem sempre, os eventos extremos de chuva se comportam como o previsto pelas técnicas de discretização e neste caso, se a distribuição da chuva for

significativamente diferente do previsto, podem ser registradas falhas nas estruturas. O próximo passo deste trabalho é a verificação das estruturas dimensionadas quando submetidas a série de registros horários de uma estação pluviométrica local (estação Carapina), que tem somente dez anos de extensão, discretizados a cada 5 minutos.

Para garantir este bom funcionamento é necessário que se promova regularmente a manutenção e limpeza das estruturas, de forma que o volume útil dimensionado esteja sempre disponível para reservação. Por outro lado, é importante o acompanhamento da precipitação na área do empreendimento e das vazões nas entradas das estruturas para que o sistema de bombeamento seja operado de forma a garantir o esgotamento das mesmas em 24 horas, conforme o dimensionado.

BIBLIOGRAFIA

ANA – Agência Nacional de Águas. *Hidroweb: Sistema de Informações Hidrológicas*. Dados hidroclimatológicos. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>.

CANDIDO, M.O. e NAGHETTINI, M.C. *SEAF - Sistema Especialista em Análise de Freqüência de Eventos Hidrológicos Máximos Anuais*. Disponível em: <<http://www.ehr.ufmg.br/downloads.php>>.

CETESB (1986). *Drenagem Urbana – Manual de Projeto*. Convênio CETESB/ASCETESB.

GOLDSIM TECHNOLOGY GROUP (2007). *GoldSim Probabilistic Simulation Environment*. Washington, USA.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia (1992). *Normais Climatológicas – 1961-1990*. Brasília.

LIMA, A.A e NAGHETTINI, M.C. *ALEA - Análise de Freqüência Local de Eventos Anuais*. Disponível em: <<http://www.ehr.ufmg.br/downloads.php>>.

SILVEIRA, A.L.L. (2000). *Equação para os coeficientes de desagregação de chuva*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 5, n. 4, Out/Dez.