UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Caetano Coelho Silva Fraga

RESERVATÓRIO PARA CONTROLE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA DA CHUVA

Porto Alegre
julho 2013

CAETANO COELHO SILVA FRAGA

RESERVATÓRIO PARA CONTROLE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA DA CHUVA

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Juan Martín Bravo

Porto Alegre

julho 2013

CAETANO COELHO SILVA FRAGA

RESERVATÓRIO PARA CONTROLE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA DA CHUVA

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2013

Prof. Juan Martín Bravo
Dr. em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela UFRGS
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva (UFRGS)
Dr. em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela UFRGS

Prof. Fernando Mainardi Fan (UFRGS)
Me. em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela UFRGS

Prof.ª Rosane Barbosa Lopes Cavalcante (UFRGS)
Me. em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, Volney Fraga e Maria Lucia Bernardes Coelho Silva, que sempre me apoiaram, especialmente durante o período do meu Curso de Graduação, estando sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Juan Martín Bravo, orientador deste trabalho, por todos os conhecimentos transmitidos e pelo tempo dedicado a este trabalho.

Agradeço a Profa. Carin Maria Schmitt pelas críticas construtivas que serviram para a elaboração de um trabalho consistente.

Agradeço à minha família, pais, irmão e namorada pelo apoio e carinho.

Agradeço aos meus colegas e amigos pela amizade e companheirismo.

No momento em que se pensa ter compreendido tudo, se
adquire no rosto uma expressão assassina de alguma coisa.
Não há como compreender tudo.
No edifício do pensamento, não encontrei nenhuma
categoria em que pudesse pousar a cabeça.
Em compensação, que belo travesseiro é o caos.

Emil Cioran

RESUMO

Este trabalho versa sobre o desenvolvimento de métodos de auxílio na tomada de decisão para o dimensionamento de reservatórios de usos múltiplos, os quais permitam o aproveitamento de águas da chuva e o amortecimento de escoamento superficial. A partir da revisão bibliográfica aborda-se primeiramente, a escassez e o excesso de água e como isso afeta a sociedade e, posteriormente, métodos para o dimensionamento de reservatório para captação de água da chuva, a importância da conservação da água e como a água de chuva pode suprir a demanda de água não potável. Encerrando a pesquisa bibliográfica, são descritos problemas na drenagem urbana, e como medida de controle, são abordados métodos para o armazenamento temporário de escoamento superficial, bem como, o conceito de precipitação máxima e modelos para transformação de chuva em vazão. Com base na série diária de chuva de Porto Alegre e na simulação do balanço hídrico de um reservatório, foram estimadas curvas de permanências de volume para cada cenário simulado. Por sua vez, a partir da curva IDF do IPH, foi calculado o hidrograma gerado por uma precipitação com tempo de retorno de 10 anos. Os resultados das curvas de permanência, em conjunto com o volume do hidrograma, permitiram o desenvolvimento de gráficos que apresentam a probabilidade para amortecer a totalidade ou uma parcela do hidrograma, bem como, o tempo que os reservatórios suportam até o inicio do extravasamento. Foram elaborados dois conjuntos de simulações, nos quais foram utilizados diferentes volumes de reservatórios e valores de demandas diárias. Para maior riqueza e aplicabilidade da metodologia, foi elaborada nos gráficos das simulações uma curva que representa a probabilidade de falha no atendimento da demanda. Portanto, a metodologia propicia avaliar, em um mesmo gráfico, o reservatório ou demanda apropriada para o amortecimento do escoamento superficial e o aproveitamento da água da chuva. Durante o desenvolvimento das simulações, resultados esperados foram verificados, como quanto maior é o volume do reservatório maior é a probabilidade de amortecimento do escoamento superficial, assim como menor é a falha de atendimento da demanda, analisando apenas o volume do reservatório como variável. E, quanto maior for a demanda diária, maior é a probabilidade de amortecimento do escoamento superficial, bem como maior é o índice de falha no atendimento do reservatório para demanda.

Palavras-chave: Aproveitamento de Água da Chuva. Amortecimento do Escoamento Superficial. Métodos para Dimensionamento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Área de abrangência do trabalho..... 15
Figura 2 – Etapas da pesquisa 17
Figura 3 – Analogia para o volume de água no Planeta..... 20
Figura 4 – Impactos da urbanização no hidrograma..... 23
Figura 5 – Componentes de um sistema de aproveitamento de água da chuva..... 29
Figura 6 – Exemplo de hidrograma resultante..... 42
Figura 7 – Curva de permanência de armazenamento: reservatório de 15.000 L e demanda de 1.000 L/dia..... 51
Figura 8 – Curva de permanência de amortecimento: reservatório de 15.000 L e demanda de 1.000 L/dia..... 53
Figura 9 – Hietograma de projeto..... 55
Figura 10 – Hidrograma de projeto..... 56
Figura 11 – Tempo máximo suportado do hidrograma para volumes de amortecimento disponíveis no reservatório..... 59
Figura 12 – Aplicação do gráfico de probabilidade de amortecimento para demanda de 852,8 litros/dia..... 62
Figura 13 – Aplicação do gráfico de probabilidade de amortecimento para demanda de 852,8 litros/dia com falha de atendimento..... 63
Figura 14 – Aplicação do gráfico de probabilidade do tempo suportado para demanda de 852,8 litros/dia..... 64
Figura 15 – Aplicação do gráfico de probabilidade de amortecimento para reservatório de 10.000 litros..... 67
Figura 16 – Aplicação do gráfico de probabilidade de amortecimento para reservatório de 10.000 litros com falha de atendimento..... 68
Figura 17 – Aplicação do gráfico de probabilidade de amortecimento para reservatório de 10.000 litros com falha de atendimento..... 70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estimativas econômicas associadas a problemas de gestão de recursos hídricos no Brasil..... 24

Quadro 2 – Tipos de solos..... 41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo médio por habitante para determinado uso..... 28
Tabela 2 – Valor do coeficiente de escoamento para o tipo de ocupação..... 36
Tabela 3 – Tempo de retorno para projetos de drenagem urbana..... 38
Tabela 4 – Valores de CN para bacias urbanas..... 40
Tabela 5 – Valores médio, mínimos e máximos dos totais mensais de chuva (em mm).. 44
Tabela 6 – Consumo de água não potável médio por habitante para determinado uso.. 45
Tabela 7 – Modelo para aproveitamento de água da chuva..... 48
Tabela 8 – Elaboração da curva de permanência para armazenamento..... 50
Tabela 9 – Elaboração da curva de permanência para amortecimento..... 52
Tabela 10 – Probabilidade para amortecimento do hidrograma em um reservatório de 15.000 L com demanda de 1.000 L/dia..... 58
Tabela 11 – Probabilidade para amortecimento de parcelas do volume do hidrograma para cada reservatório..... 61
Tabela 12 – Probabilidade para amortecimento do volume correspondente ao tempo de duração da chuva para cada reservatório..... 66
Tabela 13 – Probabilidade para amortecimento de percentuais do volume do hidrograma para cada demanda..... 66
Tabela 14 – Probabilidade para amortecimento do volume correspondente ao tempo de duração da chuva para cada demanda..... 69

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
2 DIRETRIZES DA PESQUISA 14
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA 14
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA 14
2.2.1 Objetivo Principal 14
2.2.2 Objetivo Secundário 14
2.3 PRESSUPOSTO 15
2.4 DELIMITAÇÕES 15
2.5 LIMITAÇÕES 16
2.6 DELINEAMENTO 16
3 ÁGUA NO MEIO URBANO 19
3.1 DISPONIBILIDADE 19
3.2 POLUIÇÃO DAS ÁGUAS 21
3.3 INUNDAÇÕES URBANAS 22
3.4 CUSTOS ASSOCIADOS AOS PROBLEMAS NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS 24
4 APROVEITAMENTO DE ÁGUA DA CHUVA 26
4.1 CONSERVAÇÃO DE ÁGUA 26
4.2 COMPONENTES DO SISTEMA 28
4.3 TRATAMENTO DA ÁGUA 29
4.4 DISPOSITIVOS PARA MEDIR A PRECIPITAÇÃO..... 30
4.5 DIMENSIONAMENTO DO RESERVATÓRIO..... 31
5 DRENAGEM URBANA 34
5.1 CICLO HIDROLÓGICO E BACIA HIDROGRÁFICA 35
5.2 PRECIPITAÇÃO MÁXIMA 37
5.3 HIETOGRAMA 38
5.4 HIDROGRAMA 39
6 CARATERIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS 43
6.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS E VARIÁVEIS 43
6.1.1 Série Diária de Chuva 43
6.1.2 Área do Lote, Área de Captação e Perdas 44
6.1.3 Demanda para Consumo Não Potável 44
6.1.4 Volume de Reservatório 46

6.2 APROVEITAMENTO DE ÁGUA DA CHUVA 46
6.3 CURVA DE PERMANÊNCIA 49
6.4 CÁLCULO DO HIDROGRAMA DE PROJETO 53
6.4.1 Hietograma de Projeto 53
6.4.2 Hidrograma de Projeto 55
6.5 VOLUMES PARA AMORTECIMENTO E TEMPO SUPORTADO 56
6.5.1 Volumes para Amortecimento 57
6.5.2 Tempo Máximo Suportado 58
7 ANÁLISE DOS RESULTADOS 60
7.1 SIMULAÇÃO 1 – RESERVATÓRIO VARIÁVEL 60
7.2 SIMULAÇÃO 2 – DEMANDA VARIÁVEL 65
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS 71
REFERÊNCIAS 73
APÊNDICE A 76
APÊNDICE B 78
APÊNDICE C 80
APÊNDICE D 82
APÊNDICE E 84
APÊNDICE F 86
APÊNDICE G 88
APÊNDICE H 90
APÊNDICE I 92

1 INTRODUÇÃO

A água é um elemento essencial para a vida. Assim sua disponibilidade se torna um fator decisivo para o desenvolvimento de atividades agrícolas, urbanas e industriais. O crescimento econômico, somado ao aumento populacional, demanda um aumento gradativo no consumo de água potável. Por outro lado, a continua poluição dos mananciais diminui a oferta de água disponível, tornando esse bem cada vez mais escasso.

Esse cenário implica na utilização racional desse insumo, de forma a garantir sua preservação e a manutenção para futuras gerações. No entanto, emprega-se água potável para fins menos nobres, como descarga de sanitários e irrigação de jardins. Uma alternativa para o uso sustentável é o aproveitamento da água da chuva para essas aplicações. Dessa forma, "[...] o sistema de captação de água da chuva pode atuar complementarmente ao sistema de abastecimento convencional da rede, ou cobrir o total da demanda, para qualquer abrangência de uso da água." (MANO, 2004, p. 55).

Em contrapartida à baixa disponibilidade de água, há o excesso gerado pelo acúmulo de escoamento superficial em centros urbanos quando ocorrem precipitações. Esse fenômeno se dá devido à baixa eficiência dos sistemas de drenagem das cidades, que não conseguem acompanhar o ritmo desenfreado da ocupação do solo. Essa ocupação acarreta no aumento da impermeabilização da bacia, que em consequência, gera a ampliação das vazões de pico e o aumento dos focos de alagamento urbano.

As medidas de controle na fonte, como o armazenamento do escoamento superficial no lote, minimizam os efeitos da impermeabilização dos terrenos. De acordo com Tucci e Genz (1995, p. 302), "[...] o armazenamento no lote pode ser utilizado para amortecer o escoamento, em conjunto com outros usos, com o abastecimento de água, irrigação de grama e lavagem de superfícies ou automóveis.".

Baseando-se nessa perspectiva, este trabalho tem como objetivo a avaliação de um reservatório com múltiplas funções: aproveitamento de água de chuva e o controle de escoamento superficial. Tendo em vista que o atendimento a ambos os usos é conflitante, o estudo propõem gráficos que auxiliem a tomada de decisão para a implementação do

reservatório, sendo avaliado o amortecimento que o reservatório terá para um evento crítico de chuva e o índice de falha de atendimento que o mesmo terá para uma demanda de consumo. São propostas curvas que representam percentuais do hidrograma de projeto, no qual é apresentada a probabilidade em que o reservatório dispõe do volume para o amortecimento. Os gráficos ainda propõem a indicação de qual é a falha no atendimento da demanda, para o aproveitamento de água da chuva, em cada cenário analisado. Ficará a critério do projetista a escolha do reservatório e demanda de consumo que melhor desempenhe as funções desejadas.

Feita a apresentação dessa introdução e do método de pesquisa no capítulo 2, o capítulo 3 deste trabalho faz uma abordagem sobre a disponibilidade de água e fatores que afetam sua escassez. No mesmo capítulo ainda são apresentados os custos associados aos problemas de gestão de recursos hídricos. O capítulo 4 introduz sobre a importância do uso racional da água e apresenta o sistema de aproveitamento de água da chuva como uma alternativa para o consumo não potável.

No quinto capítulo são discorridos sobre os problemas da drenagem urbana nas cidades, assim como alternativas para mitigar o excesso de escoamento superficial gerado. O capítulo ainda aborda conceitos teóricos que serviram de base para o desenvolvimento do hidrograma calculado. O capítulo 6 apresenta a caracterização das variáveis e como são desenvolvidos o modelo de aproveitamento de água da chuva, hidrograma de escoamento superficial e curva de permanência. E por último é explicado como são obtidos os resultados nas diferentes análises executadas.

No sétimo capítulo são feitas as análises dos resultados gerados com os gráficos obtidos no capítulo anterior. A partir desse produto foram desenvolvidas gráficos para tomada de decisão, nas quais foram elaboradas duas simulações propostas pelo trabalho. A primeira com uma demanda diária de consumo fixa no qual é variado o volume de reservatório, e na segunda, o oposto.

Por fim, no último capítulo são feitas as considerações finais à respeito do trabalho. São relatadas as conclusões acerca do uso da metodologia desenvolvida.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: como pode ser aplicada uma metodologia que auxilie a tomada de decisão para o desenvolvimento de um reservatório que possibilita o uso simultâneo de aproveitamento de água da chuva e amortecimento de escoamento superficial?

2.2 OBJETIVO DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo do trabalho é o desenvolvimento e avaliação de uso de uma metodologia que auxilie a tomada de decisão para a implementação de um reservatório de uso múltiplo, que propicie o amortecimento de escoamento superficial e o atendimento de aproveitamento da água da chuva simultaneamente.

2.2.2 Objetivo Secundário

O objetivo secundário do trabalho é a verificação do tempo máximo que um reservatório utilizado para captação de chuva consegue suportar até o início do extravasamento.

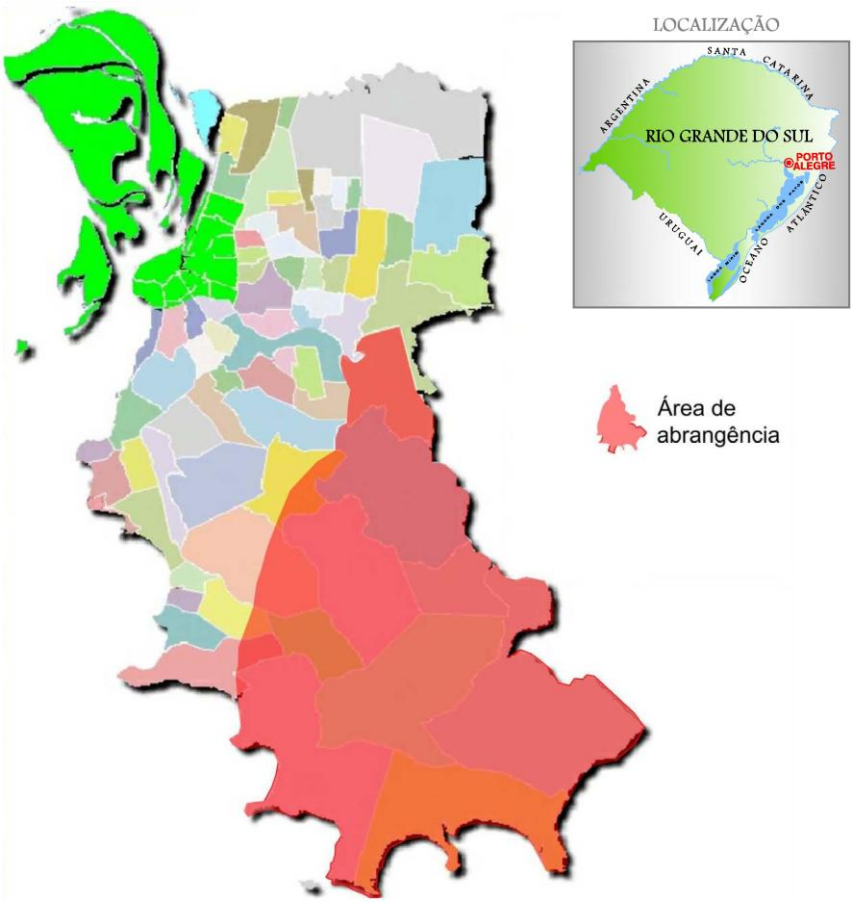
2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que o Método da Simulação presente no anexo A da NBR 15527/2007 – Água da Chuva – Aproveitamento de Coberturas em Áreas Urbanas para Fins Não Potáveis – Requisitos – é considerado válido e foi utilizado na etapa de dimensionamento do volume para o armazenamento de aproveitamento pluvial.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a área de abrangência recomendada do posto IPH, segundo sua curva IDF, apresentada no Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre. Conforme ilustra a figura 1.

Figura 1 – Área de abrangência do trabalho



(fonte: adaptado de PORTO ALEGRE, 1999, p. 41)

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

a) o uso de uma séria diária de chuva de 52 anos (janeiro de 1961 a dezembro de 2012) de Porto Alegre;

b) aplicação do método dos blocos alternados;

c) o uso do coeficiente de 15% para perdas na captação;

d) o uso do valor 1 para o coeficiente de escoamento superficial;

e) o uso de valores superiores a 0,2 milímetros de precipitação pluviométrica para a entrada de dados no modelo;

f) o uso de área de captação de 200 m²;

g) o uso de área de lote de 500 m²;

h) o uso dos volumes de reservatório entre 250 e 20.000 litros com base nas dimensões comerciais;

i) aplicação do método do CN e SCS na estimativa da precipitação efetiva e o método do hidrograma unitário sintético no processo de transformação da precipitação efetiva em vazão.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 2, e são descritas nos próximos parágrafos:

a) pesquisa bibliográfica;

b) definição dos parâmetros e variáveis;

c) modelo de aproveitamento de água da chuva

d) curva de permanência;

e) cálculo do hidrograma de escoamento superficial;

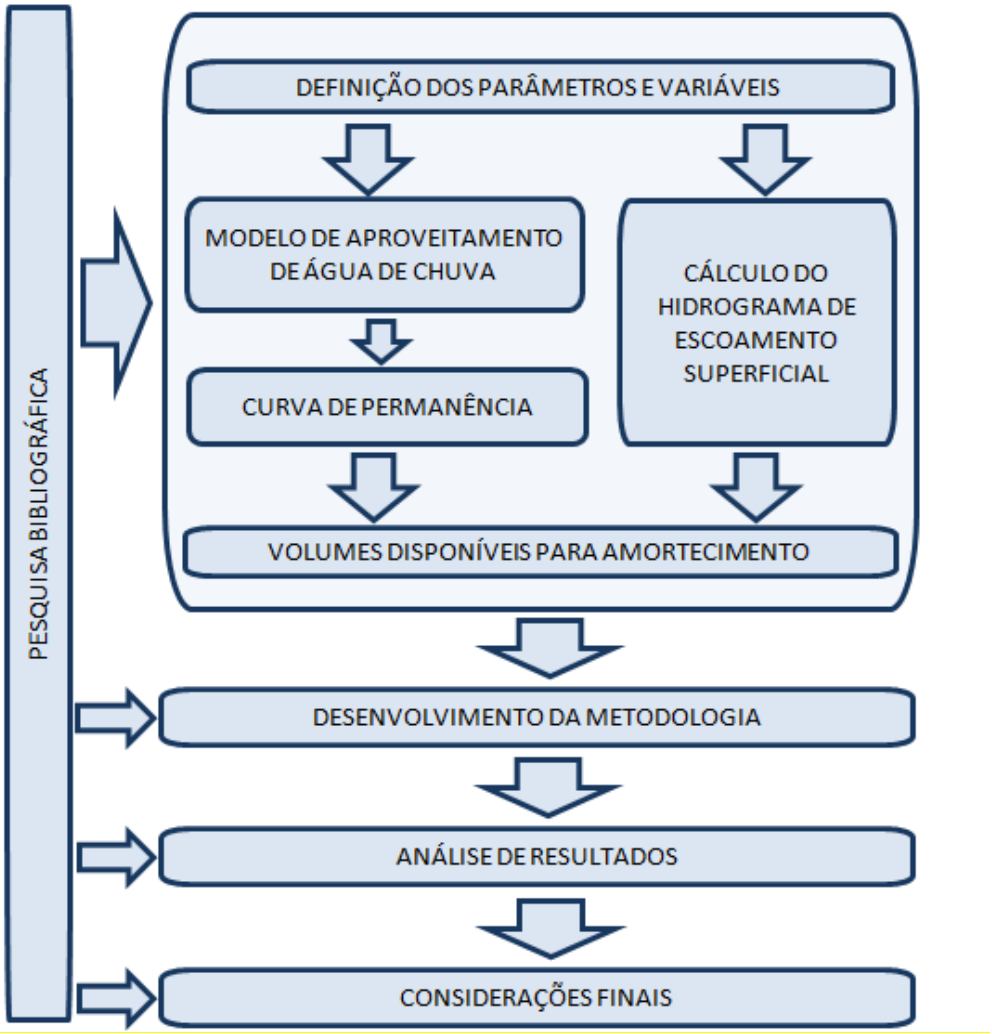
f) volumes disponíveis para amortecimento;

g) desenvolvimento da metodologia;

h) análise dos resultados;

i) considerações finais.

Figura 2 – Etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

Inicialmente, foi realizada a **pesquisa bibliográfica** para servir de embasamento teórico para a elaboração do trabalho. Nesta etapa são abordadas as seguintes informações:

a) ciclo hidrológico;

b) uso racional da água;

c) sistema de aproveitamento de água da chuva;

d) drenagem urbana;

e) dispositivo para controle de escoamento superficial na fonte;

f) modelos para dimensionamento de reservatórios de aproveitamento de águas da chuva;

g) modelos para dimensionamento de reservatório de controle de escoamento superficial.

A próxima etapa consiste na **definição de parâmetros e variáveis**, tais como volume de reservatório, demanda de consumo e série diária de chuva. A etapa subsequente, é a

formulação do **modelo para aproveitamento de água da chuva**, com base na série pluviométrica do posto do IPH, no qual são definidos os dados de entrada para o dimensionamento do volume de água da chuva. Dessa forma, foi possível desenvolver o balanço hídrico e a **curva de permanência de volume** do reservatório, no *software Microsoft Excel*, para avaliar as variáveis como volume e demanda solicitada.

Posteriormente, elaborou-se o **cálculo do hidrograma do escoamento superficial**, com auxílio do *software* IPHS1 é possível transformar a chuva de projeto, obtida por meio da curva IDF do IPH, em hidrograma. Com base na curva de permanência de cada cenário estudado, foi possível determinar os **volumes disponíveis para amortecimento** no reservatório, assim como o volume necessário para amortecer o volume do hidrograma do escoamento superficial.

Na etapa seguinte, foi feito o **desenvolvimento da metodologia** aplicando os modelos das etapas anteriores. Foram desenvolvidas duas simulações, na primeira, o volume do reservatório variou para uma demanda solicitada fixa. Enquanto que, na segunda simulação, a demanda solicitada variou para um volume de reservatório fixo. As simulações propiciaram uma rica fonte de dados para a criação de gráficos e tabelas propostas pelo estudo.

A próxima etapa baseia-se na **análise dos resultados** elaborados nas etapas precedentes, a partir dos gráficos que relacionaram diferentes volumes de reservatório para o amortecimento do escoamento superficial e o atendimento para o aproveitamento de água de chuva. Os gráficos são o produto final do trabalho, uma metodologia que tem a finalidade de servir de subsídio para a tomada de decisão do projetista. E, por último, foram feitas as **considerações finais** sobre os resultados apresentados com a realização deste trabalho.

3 ÁGUA NO MEIO URBANO

Na segunda metade do século XX, o desenvolvimento urbano se sucedeu de forma desordenada. Esse processo acarretou no aumento da concentração da população em pequenos espaços e falta de controle do ambiente traz como consequências (TUCCI, 2005, p. 17):

a) impactos no meio ambiente;
b) diminuição na disponibilidade hídrica;
c) perdas devido a inundações;
d) doenças relacionadas à água;
e) queda na qualidade de vida.

Neste capítulo, são abordados os aspectos que afetam a disponibilidade de água e prejudicam a qualidade desse bem. São tratados fatores que causam inundações urbanas, assim como os custos associados aos problemas de recursos hídricos no País.

3.1 DISPONIBILIDADE

A água é um recurso extremamente importante para o desenvolvimento humano, sendo um fator influente em diversas atividades econômicas. Segundo Daltro Filho (2004, p. 33), a água é um recurso finito, e sua escassez é agravada pelo crescente consumo, má utilização e poluição. Levando em consideração a proporção de água doce disponível no Planeta o cenário torna-se mais problemático. De acordo com Fernandez e Garrido (2002, p. 22), a água doce representa menos de 3% do total de água no mundo, sendo que deste percentual cerca de 2% estão congeladas nos polos. E, o 1% restante é distribuindo entre águas subterrâneas, que representam 97% desse valor, e, superficial. Logo, as águas doces superficiais configuram menos de 0,03% do total de recursos hídricos. A figura 3 faz uma analogia com a proporção de água distribuída no Planeta para escalas do cotidiano, partindo da relação que toda água presente na Terra está contida em um reservatório de 1.000 litros.

Figura 3 – Analogia para o volume de água no Planeta

(fonte: MANO, 2004, p. 25)

O homem utiliza a água para as mais diversas atividades, o que pode gerar conflitos entre usuários devido à concorrência do uso. Para Fernandez e Garrido (2002, p. 25-36), pode-se classificar a demanda por água para as seguintes atividades:

a) abastecimento humano;

b) dessedentação de animais;

c) abastecimento industrial;

d) agricultura irrigada;

e) geração de energia elétrica;

f) pesca;

g) piscicultura e aquicultura;

h) navegação;

i) lançamento, diluição e transporte de efluentes;

j) esporte lazer e turismo;

k) demandas ecológicas.

As múltiplas atividades que usufruem dos recursos hídricos tendem a aumentar com o crescimento populacional, em consequência, aumenta o consumo e diminui a oferta por água.

Segundo projeções das Nações Unidas, a população mundial chegará até o final desse século com mais de 10 bilhões de pessoas, porém estudos mais pessimistas estimam que a população será de 15 bilhões até 2100 (UNITED NATIONS POPULATION FUND, 2011, p. 5).

A disponibilidade de água vem caindo ao longo dos anos, as reservas mundiais que nos anos 50 representavam 16,8 mil m³/pessoa, atualmente apresentam uma redução de mais de 50% do valor anterior, ficando com aproximadamente 7,3 mil m³/pessoa. Estimativas sugerem que a reserva venha a encolher ainda mais, reduzindo-se para 4,8 mil m³/pessoa nos próximos 25 anos (TUCCI, 2005, p. 22). Esse cenário implica em mudanças na utilização dos recursos hídricos de modo a preservá-los para as futuras gerações.

Considerando a relevância desse bem, é necessário buscar a harmonia entre a demanda e a oferta hídrica, de modo a atender da melhor maneira possível os múltiplos usos da água. Devido à complexidade na gestão para seus diversos usos, no Brasil há legislação especifica para a regulamentação desse recurso. Instituída pela Política Nacional de Recursos Hídricos, a Lei 9.433 (BRASIL, 1997, p. [1]), tem como um dos objetivos "[...] assegurar à atual e as futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos.".

Segundo Dorneles (2012, p. 16), o aproveitamento de água da chuva pode proporcionar a redução dos custos com o abastecimento de água, sendo uma alternativa para reduzir o consumo de água e os alagamentos urbanos. O autor ainda afirma que "a tarifa da água é um forte aspecto que influencia na decisão de investir, ou não, na construção de um sistema de aproveitamento de água da chuva [...]".

3.2 POLUIÇÃO DAS ÁGUAS

A poluição afeta a qualidade da água, aumentado os custos para o tratamento e abastecimento. Daltro Filho (2004, p. 281) define que a poluição nas águas "[...] é a alteração das condições naturais de um recurso hídrico pela adição de substâncias ou de formas de energia que, direta ou indiretamente, prejudicam os seus legítimos usos.". O autor ainda afirma que "[...] uma água é dita contaminada, quando a poluição resulta em algum prejuízo a saúde do homem.". A contaminação das águas restringe o uso desse recurso para determinadas atividades, tornando muitas vezes inviáveis para consumo sem o devido tratamento prévio.

Segundo Tucci (2005, p. 24), o processo de contaminação dos mananciais ocorre em virtude das seguintes causas:

> a) despejo sem tratamento dos esgotos cloacais nos rios, contaminando os rios que possuem capacidade limitada de diluição. Isso ocorre por conta da falta de investimentos nos sistemas de esgotamento sanitário e de estações de tratamento que, quando existem, apresentam baixa eficiência;
>
> b) despejo dos esgotos pluviais, que transportam grande quantidade de poluição orgânica e de metais, que atinge os rios nos períodos chuvosos. Essa é uma das mais importantes fontes de poluição difusa;
>
> c) contaminação das águas subterrâneas por despejos industriais e domésticos, através das fossas sépticas, do vazamento dos sistemas de esgoto sanitário e pluvial;
>
> d) depósitos de resíduos sólidos urbanos, que contaminam as águas superficiais e as subterrâneas, funcionando como fonte permanente de contaminação;
>
> e) ocupação do solo urbano sem controle do seu impacto sobre o sistema hídrico.

Como forma de preservação dos recursos hídricos, Daltro Filho (2004, p. 284) propõe uma série de ações com o propósito de controle da poluição, as etapas sugeridas são:

> a) levantamento das condições atuais – diagnóstico;
>
> b) enquadramento do recurso hídrico;
>
> c) aplicação de medidas de controle;
>
> d) aparato legal.

3.3 INUNDAÇÕES URBANAS

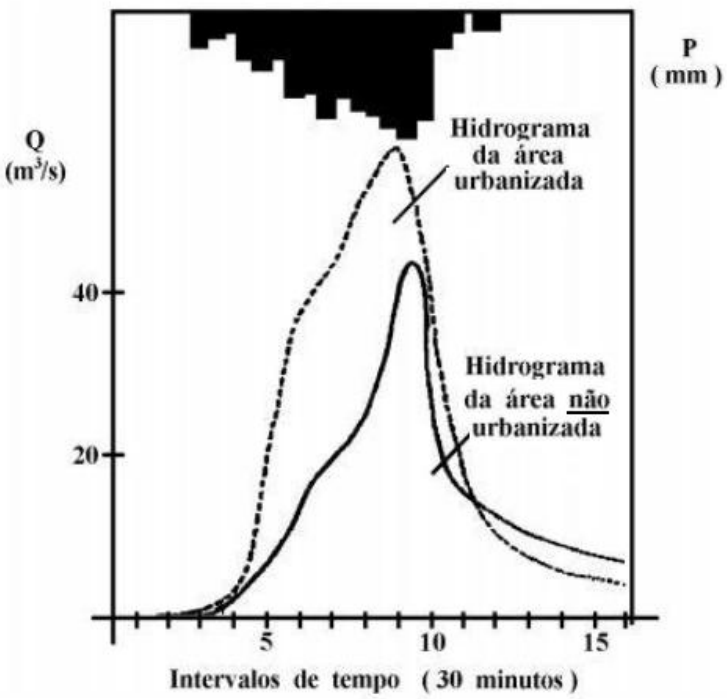
Outro problema enfrentado nos centros urbanos são as inundações, que assim como a escassez de água, são também acarretados pela má gestão dos recursos hídricos e a falta de planejamento urbano. De acordo com Tucci (1995, p. 16), são consequências de dois processos que podem ocorrem separados ou de forma composta:

a) ocupação de áreas ribeirinhas;
b) urbanização.

A ocupação de áreas ribeirinhas, localizada no leito maior do rio, sofre enchentes geradas pelo processo natural do rio, tendo tempo de retorno de aproximadamente dois anos para esse evento (MANO, 2004, p. 33). São tratadas nesse trabalho as causas e medidas para conter as

inundações devido à urbanização. Segundo Tucci (1995, p. 17), a responsável por esses alagamentos é a impermeabilização do solo, o qual é sucedido pelo desenvolvimento urbano, que através de edificações e pavimentação de ruas diminui a parcela de água que antes infiltrava e aumenta a parcela do escoamento superficial. Ou seja, o hidrograma da bacia se torna maior após a urbanização, como pode ser observado o hidrograma hipotético apresentado na figura 4, tendo com principal efeito o aumento da vazão de pico.

Figura 4 – Impactos da urbanização no hidrograma



(fonte: adaptado de TUCCI, 1995, p. 18)

As inundações além de trazerem prejuízos econômicos para as cidades, elas também estão associadas à transmissão de doenças hídricas como a leptospirose, a malária e a dengue. Sendo que a população de baixa renda é a mais afetada por essas mazelas (TUCCI, 2005, p. 34).

3.4 CUSTOS ASSOCIADOS AOS PROBLEMAS NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Os aspectos que afetam a qualidade e a quantidade dos recursos hídricos, tais como escassez, poluição e inundações, tem um valor econômico que pode ser mensurável. Esse exercício é feito por Costa (2003). No quadro 1, pode ser observado um resumo do estudo, no qual o autor analisa o prejuízo gerado por essas calamidades.

Quadro 1 – Estimativas econômicas associadas a problemas de gestão de recursos hídricos no Brasil

Setores	Vetores de Custo	Direcionadores de Custo	Abrangência	Custo Anual
Desenvolvimento Urbano	Doenças associadas a problemas de saneamento básico.	Frequência e valor das despesas com internações hospitalares (AIH) associadas a essas doenças	Nacional	Doenças: R$ 109,6 milhões
		Mortalidade associada a essas doenças; Esperança de Vida ao nascer; PIB's *per capita* regionais.	Nacional	Mortalidade: R$ 39,5 milhões (sem efeito cumulativo)
	Diferencial de custo de tratamento devido à degradação das águas.	Custo de tratamento (despesas de exploração com produtos químicos) de águas degradadas; custo de tratamento de águas límpidas; volume de águas degradadas tratadas e de águas límpidas.	Nacional	R$ 42,5 milhões
	Perdas físicas de água tratada pelas companhias de saneamento.	Quantidade de perdas (m^3); estimativa de preço do m^3.	Nacional	R$ 1,958 milhões
Energia	Custo do não atendimento da demanda em razão de escassez de recursos hídricos.	Impacto sobre o crescimento do PIB de 2002.	Nacional	R$ 14,6 bilhões
Enchentes	Custos associados às enchentes devido ao processo inadequado de urbanização.	Estimativa das perdas patrimoniais; custos de paralisação de atividades econômicas.	Região Metropolitana de São Paulo	R$ 11,2 milhões (estimativa para tempo de recorrência de 2 anos)

continua

continuação

Setores	Vetores de Custo	Direcionadores de Custo	Abrangência	Custo Anual
Secas	Custos associados à ocorrência de secas frequentes no Nordeste.	Estimativa de valor das perdas de produção.	Regional	R$ 7,2 bilhões (perdas de PIB)
		Custo dos programas compensatórios ou de emergência.	Regional	R$ 206,8 milhões

(fonte: adaptado de COSTA, 2003, p. 118-119)

Na primeira coluna do quadro, o autor classifica os principais temas da gestão de recursos hídricos em **setores**. Nas colunas subsequentes, foram definidos os **vetores de custo** e os **direcionadores de custos**, que são, respectivamente, as caracterizações dos principais problemas de cada setor e a forma no qual esses problemas foram mensurados em custo. A quarta coluna apresenta a **abrangência** da estimativa, segundo o autor, devido à falta de dados disponíveis não foi possível fazer uma abrangência nacional para todos os direcionadores. E, na última coluna, é demonstrado o **custo anual**, no qual são estimados os custos evitáveis, de oportunidade ou produtividade marginal.

A partir desse estudo é possível avaliar o alto custo para a sociedade dos problemas relacionados à gestão de recursos hídricos. O dinheiro gasto para cobrir esses prejuízos, poderia ser investido em medidas e controles preventivos que atuem para mitigar as causas e não as consequências dessas adversidades. Pois, além de aumentar a qualidade de vida da população, esses recursos poderiam ser investidos em áreas de maior prioridade para população.

4 APROVEITAMENTO DE ÁGUA DA CHUVA

O aproveitamento de água da chuva funciona em muitos casos como um complemento ao abastecimento convencional, sendo utilizado de modo geral para demandas não potáveis. Em regiões semiáridas ou de precário abastecimento, sua utilização é a única fonte de água (MANO, 2004, p. 55). O autor ainda afirma que esse sistema é uma alternativa barata e sustentável para amenizar a escassez. Contudo, Pio et al. (2005, p. 61) advertem que a utilização de águas pluviais para abastecimento requer controle de qualidade e tratamento específico, dependendo do tipo de uso, para não comprometer a saúde dos usuários.

Em Porto Alegre, a legislação vigente exige o uso de sistemas para aproveitamento de águas das chuvas para determinados tipos de edificações. Conforme registra o Decreto n. 16305 (PORTO ALEGRE, 2009, p. 4), "O reaproveitamento das águas das chuvas, para fins de uso não potável, será exigido nas edificações industriais e comerciais que apresentarem individualmente área de cobertura ou telhado igual ou superior a 500 m² (quinhentos metros quadrados).". A NBR 15527 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), normatiza os requisitos para o aproveitamento de água da chuva de coberturas em áreas urbanas para usos não potáveis.

Nos itens seguintes deste capítulo, são abordadas questões relativas ao sistema de aproveitamento de águas pluviais sendo apresentado o seu papel na conservação desse bem, assim como os componentes básicos que o compõem e os critérios que são necessários para o seu dimensionamento.

4.1 CONSEVAÇÃO DE ÁGUA

O cenário de escassez de água implica na necessidade do estudo de medidas e dispositivos para conservação desse bem. Assim, deve-se buscar evitar o desperdício e lançar mão de novas fontes de água que diferem da disponibilizada pelo sistema de abastecimento das cidades. Conforme Pio et al. (2005, p. 19), a conservação da água pode ser definida como qualquer ação que:

a) reduza a quantidade de água extraída em fontes de suprimento;

> b) reduza o consumo de água;
>
> c) reduza o desperdício de água;
>
> d) aumenta a eficiência do uso de água;
>
> e) aumente a reciclagem e o reúso de água.

Segundo Pio et al. (2005, p. 19), o uso racional de água é caracterizado por medidas que atuem na redução da demanda, tendo sistemas que minimizem o desperdício, porém sempre mantendo a qualidade necessária. Enquanto a conservação de água é a evolução do conceito de racionalização, porque vai ao encontro à gestão da água, tendo em vista não somente a demanda, mas também a oferta de água. Ou seja, de forma que para usos menos nobres possam ser ofertados águas de qualidade inferiores.

A importância da conservação da água é tratada por Alves et al. (2009, p. 221) no qual os autores afirmam que:

> O consumo de água não potável implica na diminuição do volume de água bruta que seria segregada ou reservada visando à potabilização, [...] permite disponibilizar o volume poupado de água potável para atender demandas que não estariam sendo atendias sem a ação conservacionista. [...] independentemente da água ser potável ou não, importa empregar a água de maneira mais eficiente possível.

A implementação de um programa de conservação de água envolve na gestão da demanda, que são medidas que propõem otimizar o consumo de água, tendo assim, uma redução dos efluentes gerados. E, também, na gestão da oferta, que são dispositivos que propiciem a utilização de água com diferentes níveis de qualidade para atendimento das necessidades existentes. Sendo importante a conscientização de que o programa de conservação é uma política de economia de água, que visa redução dos custos e maior disponibilidade desse bem (PIO et al., 2005, p. 19-20). Portanto, um sistema de aproveitamento de água da chuva é uma medida para conservação de água, sendo destinada para fins menos nobres, nos quais não há necessidade da água ser potável.

A demanda por água varia conforme o tipo de atividade e o uso a que ela se destina. Segundo Netto et al. (1998, p. 466), “O consumo de água é função de uma série de fatores inerentes à própria localidade a ser abastecida e varia de cidade para cidade, assim como pode variar de um setor de distribuição para outro [...]”. A tabela 1 apresenta uma estimativa do consumo de água para diferentes usos, por habitante no País.

Tabela 1 – Consumo médio por habitante para determinado uso

Tipo de Consumo	Consumo Médio (litro/ hab*dia)	Percentual
Bebida, abluções, lavagem de rosto	18,5	9%
Banhos	48,5	23%
Preparação de comida, lavagem de louça	37	18%
Lavagem de roupas	52,6	25%
Limpeza de piso	7,9	4%
Descargas de sanitários	39,7	19%
Lavagem de carros	2,9	1%
Outros uso, inclusive em jardins	3,5	2%
Total	210,6	100%

(fonte: adaptado de NETTO et al., 1998, p. 468)

De acordo com o Código de Instalações Prediais de Água e Esgoto de Porto Alegre (PORTO ALEGRE, 1988, p. 13), que estabelece valores mínimos para o cálculo da população estimada em projetos hidrossanitários, o número de pessoas considerado para diferentes cômodos ou edificações é:

a) em residências com dormitórios de até 12m² são consideradas 02 pessoas;
b) em residências com dormitórios maiores que 12m² são consideradas 03 pessoas;
c) em restaurantes, a cada 1,5m³ é considerada 01 pessoa;
d) em cinemas, a cada 0,7m² é considerada 01 pessoa.

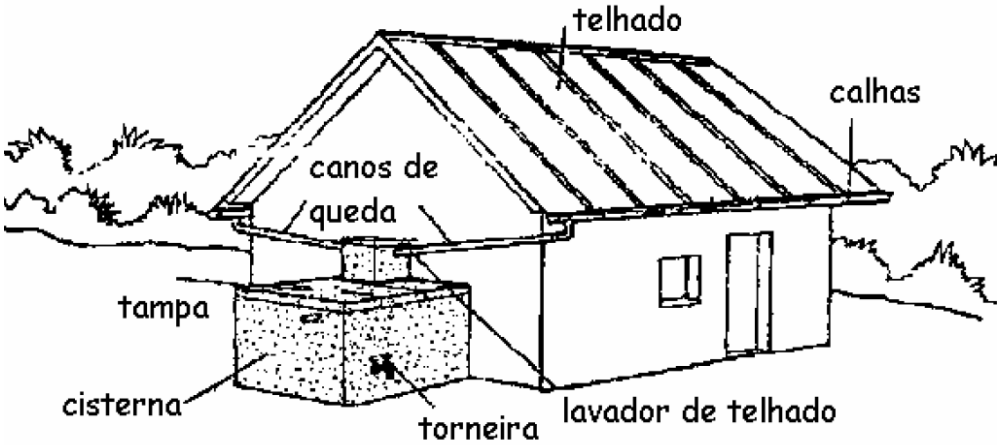
4.2 COMPONENTES DO SISTEMA

O sistema de aproveitamento de água da chuva consiste, basicamente, na coleta da precipitação que cai no telhado, que através de condutos é armazenada em reservatórios ou cisternas. A filtragem ou o tratamento da água são recomendados dependendo do tipo de uso, assim como o descarte da primeira chuva, para então, destinar a água para o local de uso desejado. Os componentes do sistema são ilustrados na figura 5, no qual são apresentados elementos básicos para o aproveitamento de precipitação.

Alves et al. (2009, p. 255) apontam um crescimento na utilização de sistema para aproveitamento de água da chuva no Brasil, devido principalmente a possibilidade de redução de custos que a técnica proporciona. Os autores ainda relatam que a expansão dessa prática levou a proliferação de diversos componentes de sistemas prediais específicos, sendo uma

tendência no mercado o emprego de equipamentos industrializados para o aproveitamento da precipitação.

Figura 5 – Componentes de um sistema de aproveitamento de água da chuva



(fonte: ORGANIZATION OF AMERICAN STATES[1], 1997 apud MANO, 2004, p. 54)

4.3 TRATAMENTO DA ÁGUA

A finalidade do uso e o local de coleta determinam o nível de qualidade exigido para a água, inclusive se a água é coletada em locais sem acesso de pessoas e animais, e houver uma constante manutenção, removendo lixo e poeira existente, é possível se obter uma água de qualidade relativamente alta (GROUP RAINDROPS, 2002, p. 98). O exemplo mais comumente utilizado para o tratamento da água bruta da chuva é o sistema de filtragem.

O filtro, segundo Mano (2004, p. 72), o filtro gera uma perda na captação de 5 a 10%, porque necessita de lavagem para sujeira retida pelo filtro, na qual é escoada para a rede pluvial. O filtro consiste de um freio d'água que impede que a água atinja a camada de sedimentação. Simultaneamente, a água filtrada recebe uma injeção de oxigênio, para prevenir de um processo anaeróbico, característico de água parada.

Alves et al. (2009, p. 256), Mano (2004, p. 58), Tucci (2005, p. 100), entre outros, descrevem a importância do descarte da primeira chuva, o chamado *first flush*, por ser considerada a parcela da precipitação mais poluída. O *Group Raindrops* (2002, p. 100) explica que esse

[1] ORGANIZATION OF AMERICAN STATES. **Alternative Technologies for Freshwater Augmentation in Latin America and the Caribbean.** Washington, 1997.

processo ocorre devido à poluição presente na atmosfera, que contém substancias prejudicas a saúde como dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio emitidos por automóveis e pela indústria. Portanto, a precipitação no início carrega consigo essas partículas em suspensão afetando a qualidade da água, o fenômeno ainda é agravado pela fuligem e sujeira acumuladas nas calhas e áreas de captação do sistema de aproveitamento. O autor ainda recomenda que o primeiro milímetro da chuva não deva ser aproveitado para nenhum tipo de uso.

4.4 DISPOSITIVOS PARA MEDIR A PRECIPITAÇÃO

A precipitação é formada pelo vapor de água contido na atmosfera, que devido ao crescimento das gotículas nas nuvens em saturação, condensam aumentando o volume de tal forma que seu peso se torna superior às forças que as mantêm em suspensão (BERTONI; TUCCI, 1993, p. 177-178). Conforme Porto Alegre (2005, p. 22), “A precipitação é a principal fonte de informação hidrológica de entrada utilizada no cálculo das vazões de projeto [...]”.

Basicamente há dois dispositivos que medem a chuva, são os pluviômetros e os pluviógrafos. Ambos medem o volume de água precipitado em uma área unitária, sendo que esse volume é representado por uma unidade de comprimento. Bertoni e Tucci (1993, p. 182) afirmam que o “[...] objetivo de um posto de medição de chuvas é de obter uma série ininterrupta de precipitações ao longo dos anos (ou o estudo da variação das intensidades de chuva ao longo das tormentas).”.

O pluviômetro é um recipiente de volumes suficiente para conter toda precipitação presente dentro de um intervalo regular, normalmente 24 horas (CHEVALLIER, 1993, p. 486). Sendo assim o pluviômetro mensura a precipitação acumulada em um período determinado, tendo em vista uma série histórica de dados observados. A série de dados pluviômetros pode ser utilizada para o dimensionamento de reservatórios para aproveitamento de água da chuva, sendo necessário o conhecimento da frequência e duração da estiagem.

De acordo com Zahed Filho e Marcellini (1995, p. 39), os postos pluviográficos “[...] registram o volume precipitado continuamente no tempo, de onde pode se caracterizar a intensidade da chuva, representada pela relação entre a altura precipitada em um intervalo de tempo e o próprio intervalo.”. Portanto, são mais indicados para projetos de drenagem e controle de enchentes, nos quais se deseja saber a precipitação máxima que um evento pode

ter para determinada frequência e duração. Segundo Zahed Filho e Marcellini (1995, p. 39), o custo para a instalação e operação de um posto é irrisório comparado à economia e segurança gerada por seus dados.

4.5 DIMENSIONAMENTO DO RESERVATÓRIO

Reservatórios de água da chuva podem ser utilizados para funções distintas, como o armazenamento para posterior consumo, e para prevenção de inundações urbanas. O *Group Raindrops* (2002, p. 69) relata o caso da Cidade de Sumida, no Japão, onde a Prefeitura implementou um reservatório de 1.000 m³, que armazena no máximo metade de sua capacidade. Deixando 500 m³ restantes para amortecimento de escoamento superficial.

De acordo com *Group Raindrops* (2002, p. 110), qualquer recipiente pode ser utilizado para armazenamento da água da chuva, desde desempenhe as seguintes condições:

a) não apresente vazamento;
b) seu material não contamine a água armazenada;
c) não permita a passagem de luz, para prevenir a proliferação de algas;
d) possuir tampa para minimizar a evaporação e entrada de sujeira.

Há diferentes métodos para o dimensionamento dos reservatórios. O Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre (PDDrU) (PORTO ALEGRE, 2005, p. 28), por exemplo, prevê, para bacias com até 100 hectares, um volume necessário para o amortecimento de escoamento superficial que leva em consideração a seguinte fórmula:

$$V_{am} = 4{,}25 \times A_d \times A_{imp} \qquad \text{(fórmula 1)}$$

Onde:
V_{am} = volume necessário para amortecimento, em m³;
A_d = área drenada para jusante do empreendimento, em ha;
A_{imp} = percentual de área impermeável, me relação à área total da bacia.

Paro o dimensionamento para o armazenamento de água da chuva, a NBR 15527 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007) apresenta seis diferentes

métodos. Neste trabalho é adotado o Método de Simulação contido no anexo A desta Norma, que adaptado com a fórmula 1, também indicada nessa Norma, é possível determinar o volume de armazenamento para água da chuva. O volume de água de chuva aproveitável corresponde a:

$$V_{ap} = P \times A_{cap} \times C \times \eta \qquad \text{(fórmula 2)}$$

Onde:
V_{ap} = volume anual, mensal, ou diário de água da chuva aproveitável;
P = precipitação média anual, mensal ou diária;
A_{cap} = área de captação de água;
C = coeficiente de escoamento superficial da cobertura;
η = fator de capacitação.

O fator de capacitação, presente na fórmula 2, avalia a eficiência do sistema de captação, pois nem toda a água que cai na cobertura é destinada ao reservatório, uma parcela é perdida. Segundo Silva (2012, p. 50-51)**,** as perdas na captação são decorrentes do processo de filtragem, da evaporação e da superfície adotada para captação. O autor afirma que os valores mais comuns utilizados para a perda na captação são de 10 a 20%, ou seja, representa no fator de capacitação um valor de 80 a 90%. Além do mais, o fator capacitação leva em consideração dispositivos de descarte de sólidos e o desvio de escoamento inicial, caso este for utilizado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 3).

O **Método da Simulação** não leva em consideração a evaporação da água, para determinado período. Aplica-se a fórmula 3, tendo como limite o volume máximo do reservatórios, sendo que $0 \leq S_{(t)} \leq V_{max}$:

$$S_{(t)} = V_{ap\,(t)} + S_{(t-1)} - D_{(t)} \qquad \text{(fórmula 3)}$$

Onde:
$S_{(t)}$ = volume de água no reservatório no período t;
$S_{(t-1)}$ = volume de água no reservatório no período t - 1;

$V_{ap\,(t)}$ = volume de água da chuva aproveitável no período t;

$D_{(t)}$ = demanda por água durante o período t;

V_{max} = volume máximo do reservatório;

A **curva de permanência** relaciona uma dada vazão, nível ou volume a uma probabilidade de que esse valor seja superado ou igualado. Ela pode tomar como base dados diários, semanais ou mensais (TUCCI, 1993b, p. 603). Suas aplicações são empregadas em diversas atividades como:

a) para determinar a energia assegurada de uma usina hidrelétrica;

b) na regularização de vazões para atender demandas de abastecimentos ou irrigação;

c) para estimar o calado que um rio terá durante determinado período na navegação;

d) simular o volume que um reservatório de captação de chuva terá para determinada demanda, entre outros.

No trabalho, a curva de permanência apresenta a probabilidade de um dado volume de água no reservatório ser superado ou igualado. Tucci (1993b, p. 603-604) sugere para a elaboração da curva de permanência a metodologia empírica, que consiste nas seguintes etapas:

a) determinar o maior e menor valor da série;

b) estabelecer n intervalos de classes, podendo ser colocados em escala logarítmica;

c) a frequência de cada intervalo é obtida contabilizando o número de valores da série que se estabelecem em cada intervalo;

d) acumular os valores da frequência no sentido do maior para o menor.

5 DRENAGEM URBANA

O crescimento desordenado das cidades tem como consequência a impermeabilização do solo, que por sua vez, gera "[...] um aumento caótico na frequência das inundações, produção de sedimentos e na deterioração da qualidade da água." (TUCCI, 2000, p. 16). A solução mais comumente adotada para a drenagem nas cidades é a de canalização. Sobre isso, Tucci (2000, p. 16-17) afirma que "[...] esse tipo de obra somente transfere a enchente para jusante (o custo de um canal revestido varia de U$1,7 a 50,0 milhões/km). O prejuízo público é dobrado, já que, além de não resolver o problema, ainda gasta de forma equivocada.". O autor ainda reitera que essas medidas provocam o aumento da produção de sedimentos, e por consequência, reduz a capacidade de escoamento dos condutos.

As mediadas de controle de inundações urbanas podem ser classificadas, segundo Tucci e Genz (1995, p. 289), de acordo com suas ações na bacia hidrográfica, são elas:

a) distribuída ou na fonte, em que o controle é focado em lote, praças e passeios;
b) na microdrenagem, que atua em mais de um loteamento;
c) na macrodrenagem, em que o controle é feito nos principais riachos urbanos.

O armazenamento temporário de escoamento superficial na fonte, através de reservatório, é adotado como medida de controle por este trabalho. Segundo Tucci e Genz (1995, p. 290), medidas de armazenamento de água podem ser adotadas tanto em residências, quanto na macrodrenagem urbana. Os autores definem que "O efeito do reservatório urbano é o de reter parte do volume do escoamento superficial, reduzindo o seu pico e distribuindo a vazão no tempo.".

A simulação do amortecimento do reservatório para escoamento superficial é realizada a partir de um hidrograma de projeto, que é propagado com base no hietograma de chuva efetiva. Nas seções seguintes deste capítulo, são abordados métodos e critérios possibilitem o cálculo do mesmo.

5.1 CICLO HIDROLÓGICO E BACIA HIDROGRÁFICA

De acordo com Silveira (1993, p. 35), o ciclo hidrológico é um fenômeno de circulação de água na natureza que ocorre entre a superfície terrestre e a atmosfera. Quando ocorre no sentido superfície-atmosfera, o fluxo ascendente de água acontece basicamente devido aos fenômenos de evaporação e transpiração. Por outro lado, quando ocorre no sentido atmosfera-superfície, o fluxo descendente de água se dá devido ao fenômeno da precipitação.

O ciclo hidrológico tem como unidade de estudo a bacia hidrográfica e Silveira (1993, p. 40) define que:

> A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exultório. A bacia hidrográfica compõe-se basicamente de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar um leito único no exultório.

A bacia hidrográfica contém, dentre outros parâmetros, são importantes para este trabalho para sua caracterização:

a) a área de drenagem;
b) o tempo de concentração;
c) o coeficiente de escoamento;

A **área de drenagem**, que é basicamente a área plana da bacia, é delimitada pelos contornos do divisor de águas. É considerado um dado fundamental para definir o potencial hídrico da bacia, porque seu valor multiplicado pela lâmina de chuva define o volume de água recebido (SILVEIRA, 1993, p. 46). Outro elemento importante é o **tempo de concentração**, que é definido por Tucci (1993a, p. 394), como “O tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante da bacia deslocar-se até a seção principal. Esse tempo é definido também entre fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma.”. A fórmula de Kirpich é recomendada por Porto (1995, p. 132) para determinar tempo de concentração em pequenas bacias, ela é dada por:

$$t_c = 3{,}989 \times L^{0{,}77} / S_d^{0{,}385} \qquad \text{(fórmula 4)}$$

Onde:

t_c = tempo de concentração, em minutos;

L = comprimento do talvegue principal, em km;

S_d = declive média da bacia, dado por m/m;

O **coeficiente de escoamento** é um fator que avalia o grau de escoamento superficial, que uma bacia possui, levando em consideração seu potencial de infiltração e interceptação. Sendo assim o coeficiente depende basicamente do tipo de solo e sua ocupação (BIDONE; TUCCI, 1995, p. 87). Na tabela 2, é possível observar os diferentes valores do coeficiente para determinadas ocupações.

Tabela 2 – Valor do coeficiente de escoamento para o tipo de ocupação

Descrição da área	C
Área Comercial / Edificação muito densa	
Partes centrais, densamente construídas, em cidades com ruas e calçadas pavimentadas	0,70 - 0,95
Área Comercial / Edificação não muito densa	
Partes adjacentes ao centro, de menor densidade de habitações, mas com ruas e calçadas pavimentadas	0,60 - 0,70
Área Residencial	
Residências isoladas; com muita superfície livre	0,35 - 0,50
Unidades múltiplas (separadas); partes residenciais com ruas macadamizadas ou pavimentadas	0,50 - 0,60
Unidades múltiplas (conjugadas)	0,60 - 0,75
Lotes com área maior que 2.000m³	0,30 - 0,45
Áreas com apartamentos	0,50 - 0,70
Área Industrial	
Industriais leves	0,50 - 0,80
Industriais pesadas	0,60 - 0,90
Outros	
Matas, parques e campos de esporte, partes rurais, áreas verdes, superfícies arborizadas e parques ajardinados	0,05 - 0,20
Parques, cemitérios e subúrbios com pequena densidade de construção	0,10 - 0,25
Playgrounds	0,20 - 0,35
Pátios ferroviários	0,20 - 0,40
Áreas sem melhoramentos	0,10 - 0,30

(fonte: adaptado de PORTO ALEGRE, 2005, p. 86)

5.2 PRECIPITAÇÃO MÁXIMA

Bertoni e Tucci (1993, p. 182) definem precipitação máxima como "[...] a ocorrência extrema, com duração, distribuição temporal e espacial crítica para uma área ou bacia hidrográfica.". Os autores ainda afirmam que "[...] o estudo das precipitações máximas é um dos caminhos para conhecer-se a vazão de enchente de uma bacia.". A precipitação máxima pode ser caracterizada por relações de intensidade, duração e frequência, as **curvas IDF.** Elas apresentam a intensidade da chuva em milímetros por hora, relacionado com a duração em minutos e o tempo de retorno em anos, que depende da importância e porte do projeto a ser dimensionado. Porto Alegre possui quatro curvas IDF que foram desenvolvidas com base nos dados dos postos pluviográficos, suas relações e área de abrangência estão disponíveis no PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005, p. 24), assim como as justificativas de escolha e metodologia para seu desenvolvimento são tratas no anexo B do mesmo.

Relacionando as intensidades e as durações de chuva, observa-se que quando mais intensa for a precipitação menor será sua duração. A definição das três variáveis da curva IDF é obtida a partir de "[...] observações de chuvas intensas durante um período de tempo suficientemente longo e representativo dos eventos extremos do local." (BERTONI; TUCCI, 1993, p. 201).

Um parâmetro importante para elaboração das curvas IDF é o **tempo de retorno**, que o PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005, p. 16) define como o tempo em que, em média, um evento pode ser igualado ou superado, e também representa no inverso da probabilidade de um evento ser superado ou igualado em um ano qualquer. O PPDrU ainda exemplifica o conceito fazendo um analogia de um dado de seis faces, no qual para cada jogada, a probabilidade de cair um número é 1/6, ou seja, uma chance em seis possibilidades. Portanto, em média esse número se repete a cada seis jogadas, sendo assim seu tempo de retorno é de seis jogadas.

O tempo de retorno subsidia a determinação dos eventos de projeto, que são "[...] padrões de precipitações máximas adotados na obtenção de hidrogramas de projeto [...]" (ZAHED FILHO; MARCELLINI, 1995, p. 69). Considerando o grau de risco que o empreendimento tem para a população e os prejuízos financeiros caso falhe, é importante definir um tempo de retorno adequado. Segundo Porto (1995, p. 110), "Esse critério deve ser definido em esferas políticas, uma vez que são a comunidade e seus representantes que deverão decidir o grau de proteção desejável e o quanto estarão dispostos a pagar por ele.". Na tabela 3 são propostos tempos de retorno para projetos de drenagem e conforme o porte do empreendimento.

Tabela 3 – Tempo de retorno para projetos de drenagem urbana.

Sistema	Característica	Intervalo Tr (anos)	Valor frequente (anos)
Microdrenagem	Residencial	2 - 5	2
	Comercial	2 - 5	2
	Áreas de prédios públicos	2 - 5	5
	Aeroporto	5 - 10	5
	Áreas comerciais e Avenidas	5 - 10	10
Macrodrenagem		10 - 25	10
Zoneamento de áreas ribeirinhas		5 -100	100

(fonte: adaptado de PORTO ALEGRE, 2005, p. 18)

O PPDrU (PORTO ALEGRE, 2005, p. 26) adota de forma geral que a duração total da precipitação deve ser igual ou maior que o tempo de concentração da bacia, de forma que toda a bacia seja atingida pela precipitação. Entretanto, segundo Zahed Filho e Marcellini (1995, p. 73), essa hipótese só é aceita quando "[...] se admite que a contribuição do escoamento superficial à seção de saída da bacia atinja um regime permanente, após a duração da chuva ter superado o tempo concentração da bacia.".

5.3 HIETOGRAMA

O hietograma é a relação entre a intensidade da chuva com a sua respectiva duração. A forma de representação é feita por gráficos, nos quais podem ser expostos de forma contínua no tempo, ou discriminando a duração da chuva em intervalos constantes de tempo, de modo que em cada intervalo são mostradas as intensidades médias (ZAHED FILHO; MARCELLINI, 1995, p. 44). Para a elaboração do hietograma pode-se aplicar métodos que consideram a chuva de projeto com intensidade constante durante a sua duração, ou utilizar métodos baseados em hidrogramas unitários que utilizam a precipitação variável no tempo (PORTO ALEGRE, 2005, p. 26).

O **método dos blocos alternados** considera a precipitação variável no tempo, distribuindo os totais de chuva em intervalos de tempo contidos na duração, de modo a buscar um cenário crítico. O método permite que, no hietograma resultante, possa ser escolhido o posicionamento do pico de chuva, procurando assim, a situação que é mais desfavorável. A

metodologia do método segue os seguintes passos (ZAHED FILHO; MARCELLINI, 1995, p. 47-48):

a) determina-se o tempo de retorno, o total e o intervalo de duração da precipitação, com base em uma relação IDF, obtém-se a intensidade da chuva para cada duração;

b) as intensidades são transformadas em alturas de chuva e acumuladas até o último intervalo de tempo;

c) são calculados os incrementos dos totais acumulados, ou seja, a é determinado a diferença entre dois intervalos consecutivos de tempo;

d) os incrementos ou blocos obtidos são reposicionados em uma sequência, sendo que o maior valor entre os blocos é locado no centro da duração da chuva, enquanto os demais blocos são posicionados em ordem decrescente, uma à direita e outra a esquerda, alternadamente.

5.4 HIDROGRAMA

Para a simulação de chuva em vazão o PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005, p. 112) recomenda a utilização do modelo precipitação-vazão SCS, ele foi desenvolvido com base na análise de enumeras bacias nos Estados Unidos (PORTO, 1995, p. 150). A primeira etapa do modelo é a de separação do escoamento representando na fórmula 5:

$$P_{ef} = (P - 0{,}2 \times S)^2 / (P + 0{,}8 \times S) \qquad \text{(fórmula 5)}$$

Onde:

P_{ef} = precipitação efetiva, em mm;

P = precipitação total, em mm;

S = capacidade de armazenamento de água no solo, em mm.

Para determinar o valor da capacidade de armazenamento de água no solo, que leva em consideração o estado inicial de umidade do solo, deve se utilizar a fórmula 6. A expressão depende de um coeficiente CN (Curva Número) que retrata as condições de cobertura e solo da bacia, variando de 1 a 100, sendo o valor máximo é considerada uma superfície impermeável enquanto o mínimo é uma superfície permeável (TUCCI, 1993a, p. 403-404):

$$S = (25400 / CN) - 254 \qquad \text{(fórmula 6)}$$

Onde:
S = capacidade de armazenamento de água no solo, em mm;
CN = coeficiente de permeabilidade da bacia.

O coeficiente CN pode ser classificado de acordo as características do solo e os aspectos de urbanização da região. Na tabela 4 são apresentados valores de CN para bacias urbanas, sendo estes diferenciados por quatro diferentes solos.

Tabela 4 – Valores de CN para bacias urbanas.

Utilização ou cobertura do solo		A	B	C	D
Prado em boas condições		30	58	71	78
Zonas cultivadas:	sem conservação do solo	72	81	88	91
	com conservação do solo	62	71	78	81
Zonas comerciais e de escritórios		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93
Zonas residenciais					
lotes de (m²)	% média impermeável				
<500	65	77	85	90	92
1000	38	61	75	83	87
2000	25	54	70	80	85
Parques de estacionamento, telhados, etc.		98	98	98	98
Arruamentos e estradas:					
asfaltadas e com drenagem de água pluvial		98	98	98	98
gravilha		76	85	89	91
terra		72	82	87	89

(fonte: adaptado de TUCCI, 1993a, p. 406)

Os solos são classificados, conforme quadro 2, em cinco categorias, no qual solos do grupo A representam um valor menor do CN, ou seja, uma maior permeabilidade. O valor do coeficiente CN aumenta conforme se avança para os grupos subsequentes. Portanto, o grupo D apresenta um solo mais impermeável, e por consequência, um maior valor de CN.

Quadro 2 – Tipos de Solos

Grupo	Característica
A	Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração.
B	Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundos do que o do grupo A e com permeabilidade superior à média.
C	Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo.
D	Solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com baixa capacidade de infiltração gerando a maior proporção do escoamento.

(fonte: adaptado de TUCCI, 1993a, p. 404-405)

Após estimada a parcela de chuva efetiva, a próxima etapa do modelo consiste em elaborar um hidrograma unitário, que, de acordo com Porto (1995, p. 135), o hidrograma tem como definição um gráfico, ao longo do tempo, que simula as vazões geradas pelo hietograma. O autor ainda descreve que a área do gráfico representa o volume de escoamento superficial direto, causado pela chuva efetiva sobre a área da bacia.

Para a composição do hidrograma unitário representativo de uma bacia é necessário se ter dados hidrológicos da bacia estudada, em muitos casos não é possível obter-se esses dados, então o hidrograma de projeto é calculado utilizando métodos indiretos, sendo um deles, que é utilizado no trabalho, o Hidrograma Unitário Sintético do modelo SCS. O hidrograma unitário é o hidrograma resultante de um escoamento superficial de volume unitário, sendo que o volume unitário é decorrente da chuva unitária, que representa à altura pluviométrica e a duração unitária.

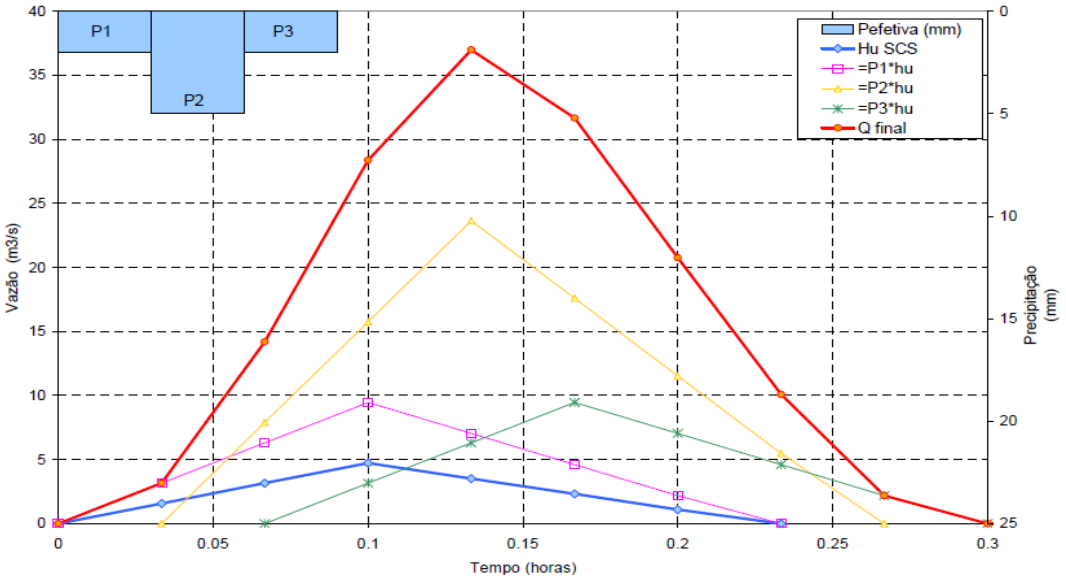
Os parâmetros que compõem e formam o hidrograma são quatro variáveis de tempo. O tempo decorrente entre o inicio da chuva efetiva e o pico do gráfico, é denominado tempo de ascensão (t_a). O tempo de retardamento (t_r) é o tempo entre o centro do hietograma de chuva efetiva e o pico do hidrograma. A duração total do escoamento superficial é representado pelo tempo base (t_b) e, o quarto parâmetro, é o tempo de concentração (t_c) já abordado neste trabalho.

Caracterizado o hidrograma unitário, na etapa seguinte, para obter a propagação do escoamento deve-se fazer a convolução dos valores. A convolução é a sobreposição dos hidrogramas que são gerados pelo produto do hidrograma unitário com os valores de precipitação efetiva, como mostra o hidrograma na figura 6. Os hidrogramas unitários podem

ser determinados para quaisquer durações através da superposição de hidrogramas de menor duração, de sistemas de equações lineares ou do método da curva S.

A simulação de chuva em vazão pode ser desenvolvida com o auxilio do *software* IPHS1. O programa calcula o hidrograma de escoamento superficial, a partir de um evento de chuva, e parâmetros da bacia hidrográfica.

Figura 6 – Exemplo de hidrograma resultante



(fonte: PORTO ALEGRE, 2005, p. 115)

6 CARATERIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS

Neste capítulo é discorrido sobre a metodologia desenvolvida no trabalho. Primeiramente, são definidos os parâmetros e variáveis utilizados. Em seguida, a metodologia consiste em duas linhas de desenvolvimento, uma na qual é determinada a série temporal de volumes em um reservatório de reaproveitamento de água da chuva e sua respectiva curva de permanência, e a outra, decorrendo em paralelo a anterior, é desenvolvido o hidrograma de projeto, gerado com base no evento de chuva estudado. Na última etapa da metodologia, é estimado o volume disponível no reservatório, segundo sua curva de permanência, para amortecer o hidrograma de projeto, bem como, o tempo máximo suportado pelo reservatório da precipitação, até extravasar.

6.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS E VARIÁVEIS

Nesta seção são definidos os parâmetros que determinam as condições de contorno do trabalho, sendo estas, apresentadas e caracterizadas para aplicação no modelo proposto. Os parâmetros definidos são:

a) série de chuva;
b) área do lote;
c) área de captação;
d) perdas na captação;
e) demanda para consumo de água não potável;
f) volume de reservatório.

6.1.1 Série Diária de Chuva

A elaboração do modelo de aproveitamento de água da chuva tem como principal base de dados a série diária de chuva. A séria de chuva foi obtida através do posto pluviométrico Porto Alegre, código Hidroweb ANA 03051011, localizada no município de Porto Alegre, e se refere a um período de 52 anos (jan/1961 à jul/2012), totalizando 18.991 dias. Procurando

uma maior precisão e confiabilidade nos resultados do trabalho, foram descartados 1.876 dias, visto que esses dias existiu falha na leitura.

Com a finalidade de ilustrar a série de chuva utilizada no trabalho, a tabela 5 apresenta os valores mínimos, médios e máximos dos totais mensais de chuva medidos em milímetros. A partir da análise dos dados foi observada a quantidade de dias consecutivos sem chuvas, e notou-se que em média 2 dias consecutivos não apresentam chuva, e que o maior período seguido sem precipitação foi de 23 dias.

Tabela 5 – Valores médios, mínimos e máximos dos totais mensais de chuva (em mm)

Mês	jan.	fev.	mar.	abr.	maio	jun.	jul.	ago.	set.	out.	nov.	dez.
Média	114,3	99,0	104,6	94,1	104,3	117,6	116,2	118,0	116,3	126,2	95,5	106,1
Mínimo	32,5	22,1	12,0	9,1	13,5	7,9	28,7	14,0	13,4	11,4	18,6	15,1
Máximo	229,2	226,3	252,7	279,8	278,4	346,5	329,9	329,3	231,1	310,5	249,5	306,8

(fonte: elaborado pelo autor)

6.1.2 Área do Lote, Área de Captação e Perdas

O trabalho possui área de abrangência delimitada pela influência da Curva IDF do posto IPH, no qual, o Plano Diretor de Drenagem de Porto Alegre recomenda seu uso para os bairros ilustrados na figura 1. Portanto, a área do lote foi definida com base nos terrenos da região em estudo. Sendo definido para o trabalho, um lote com área de 500 m², no qual é usado como parâmetro para o cálculo do hidrograma de projeto.

Para aplicação da metodologia, foi adotado que a área de captação é valor fixo de 200 m², no qual é usado para o cálculo do volume no aproveitamento de água da chuva. O coeficiente de perdas engloba falhas no processo de captação da água levando em consideração a filtragem, a superfície adotada e a evaporação. Conforme Silva (2012, p. 56), o valor usualmente adotado é de 15% para as perdas na captação, sendo este então assumido para o trabalho.

6.1.3 Demanda para Consumo Não Potável

A primeira simulação do trabalho considerada uma demanda de consumo para diferentes reservatórios. Ela é definida determinando o consumo médio de água não potável que uma pessoa pode demandar. De acordo com a tabela 1, que estima o consumo de água para diferentes atividades, é possível determinar o consumo para o uso não potável. Dependendo do tipo de consumo não potável é necessário um tratamento para água mais elaborado, como é caso da lavagem de roupas, porém esse aspecto não será tratado no trabalho. Conforme tabela 6, o uso diário de água não potável pode chegar a 106,6 litros por pessoa, isso representa pouco mais de 50% do consumo total da água.

Tabela 6 – Consumo de água não potável médio por habitante para determinado uso

Tipo de Consumo	Consumo Médio (litro/ hab*dia)
Lavagem de roupas	52,6
Limpeza de piso	7,9
Descargas de sanitários	39,7
Lavagem de carros	2,9
Outros uso, inclusive em jardins	3,5
Total	106,6

(fonte: adaptado de NETTO et al., 1998, p. 468)

Definido o consumo por pessoa, resta determinar o número de habitantes que residem no lote estudado. Foi considerado que o lote possui uma edificação do tipo residencial, que contem dois dormitórios com áreas maiores que 12m² e um dormitório com área menor que 12m². Conforme o Código de Instalações Prediais de Água e Esgoto de Porto Alegre (PORTO ALEGRE, 1988, p. 13), o número total de habitantes a ser considerado é de 8 pessoas. Multiplicando o número de pessoas da residência pelo o consumo de água não potável, se obtém a demanda para este lote. Portanto, para a primeira simulação a demanda fixada é de 852,8 litros por dia.

Para a segunda simulação, é definido um volume de reservatório e são variadas diferentes demandas. Os valores adotados variam de 250 litros a 1.500 litros. Procurou-se que os valores fossem da ordem da demanda obtida na primeira simulação, para que os resultados fossem condizentes com a realidade. A variação adotada é de 250 litros, afim de que o resultado final da curva fosse satisfatório. Sendo assim, para a segunda simulação, foram utilizados os seguintes valores de demanda, em litros por dia:

a) 250;
b) 500;
c) 750;
d) 1.000;
e) 1.250;
f) 1.500.

6.1.4 Volume de Reservatório

Os volumes de reservatórios utilizados na primeira simulação foram obtidos através de pesquisa com fabricantes de reservatórios, de modo que os volumes adotados representassem a realidade do mercado. O reservatório escolhido para a segundo simulação, é um que possuía volume mínimo para amortecer o volume do hidrograma calculado no trabalho. Os volumes de reservatório utilizados no trabalho são, em litros:

a) 2.500;
b) 5.000;
c) 7.500;
d) 10.000;
e) 15.000;
f) 20.000.

6.2 APROVEITAMENTO DE ÁGUA DA CHUVA

Após serem definidas variáveis e parâmetros relevantes ao trabalho, iniciou-se a etapa de elaboração do modelo de aproveitamento de água da chuva. Nesta seção são abordadas as etapas para o desenvolvimento do modelo do qual serviu para realizar as simulações propostas. Os resultados, em conjunto com a curva de permanência e o hidrograma de projeto, possibilitaram a criação de gráficos finais deste trabalho, que são oriundos da metodologia desenvolvida, que tem como objetivo auxiliar o projetista para sua tomada de decisão.

A primeira parte do modelo é baseada no Método da Simulação, sendo desenvolvido o balanço hídrico com um intervalo de tempo diário. A tabela 7 apresenta de forma resumida a planilha *Excel* que representa a elaboração da tabulação de dados. A planilha foi esquematizada com a finalidade de serem inseridos valores para as variáveis volume de

reservatório (Célula 2) e demanda (Célula 3), que são as variáveis das simulações, onde é destacado em vermelho o percentual de falha no atendimento da demanda e em azul a garantia de atendimento da demanda. Para a melhor compreensão do modelo, na tabela 7 é apresentado um exemplo meramente ilustrativo da planilha.

As unidades utilizadas para as variáveis e os parâmetros considerados são:

a) volume de reservatório em litros, o modelo faz a conversão para m³;
b) demanda em litros/dia, o modelo converte para m³/dia;
c) falha e garantia no atendimento da demanda em %;
d) área de capitação de 200m²;
e) coeficiente de escoamento superficial considerado é igual a 1;
f) perda de 15% na captação, ou seja, um fator de captação de 85%.

Cada coluna da planilha fornece um dado relevante para o modelo. Na **Coluna 1.1** foi inserida a data completa da leitura da precipitação, enquanto a **Coluna 1.2** é responsável por indicar o valor precipitado, do dia correspondente, segundo os dados da série histórica de chuva utilizada. Foi considerado no trabalho que precipitações inferiores ou iguais a 0,2 mm seriam descartadas, por terem pequena representatividade para acumulo de água no reservatório. Portanto, a **Coluna 1.3** verifica quais valores da coluna 1.2 são superiores a 0,2 mm, se forem menores ou iguais é registrado o valor nulo, caso contrário é mantido o valor.

Já a **Coluna 1.4**, calcula o volume gerado pela precipitação coletada no dia, dessa forma, é utilizada a fórmula 2 para determinar o volume. A unidade de volume adotada foi em m³, portanto, a planilha foi programada para fazer a conversão do valor obtido na coluna 1.3, que estava em milímetros para metros. A área de captação considerada foi de 200m², o valor do coeficiente de escoamento superficial adotado é igual a 1 e um percentual do volume captado é descontado pelas perdas, por meio do fator de captação que é igual a 85%.

A **Coluna 1.5** representa o volume resultante do uso diário, ou seja, é aplicada a fórmula 3. No qual é somado o volume do reservatório no dia anterior, obtido na coluna 1.7, com o volume coletado da coluna 1.4, e é subtraída a demanda. É importante salientar que para o primeiro valor da série o volume do reservatório no dia anterior é considerado cheio. E a demanda, apresentada na célula 3, é a mesma para todos os dias da série histórica de chuva.

Tabela 7 – Modelo para aproveitamento de água da chuva

Coluna 1.1	Coluna 1.2	Coluna 1.3	Coluna 1.4	Coluna 1.5	Coluna 1.6	Coluna 1.7	Coluna 1.8
Data	Precipitação (mm)	Precipitação Considerada (mm)	Volume Coletado no Dia (m³)	Volume Resultante (m³)	Volume Verificação (m³)	Volume Resultante Total (m³)	Falha
02/01/1961	**0**	**0**	**0**	**14,00**	**14,00**	**14,00**	**0**
03/01/1961	0	0	0	13,00	13,00	13,00	0
04/01/1961	**0**	**0**	**0**	**12,00**	**12,00**	**12,00**	**0**
05/01/1961	0	0	0	11,00	11,00	11,00	0
06/01/1961	**0**	**0**	**0**	**10,00**	**10,00**	**10,00**	**0**
07/01/1961	0,2	0	0	9,00	9,00	9,00	0
08/01/1961	**0**	**0**	**0**	**8,00**	**8,00**	**8,00**	**0**
09/01/1961	0	0	0	7,00	7,00	7,00	0
10/01/1961	**0**	**0**	**0**	**6,00**	**6,00**	**6,00**	**0**
11/01/1961	12,1	12,1	2,057	7,06	7,06	7,06	0
12/01/1961	**15,3**	**15,3**	**2,601**	**8,66**	**8,66**	**8,66**	**0**
13/01/1961	0	0	0	7,66	7,66	7,66	0
14/01/1961	**0**	**0**	**0**	**6,66**	**6,66**	**6,66**	**0**
15/01/1961	0	0	0	5,66	5,66	5,66	0
16/01/1961	**0**	**0**	**0**	**4,66**	**4,66**	**4,66**	**0**
17/01/1961	0	0	0	3,66	3,66	3,66	0
18/01/1961	**14,3**	**14,3**	**2,431**	**5,09**	**5,09**	**5,09**	**0**
19/01/1961	0	0	0	4,09	4,09	4,09	0
20/01/1961	**0**	**0**	**0**	**3,09**	**3,09**	**3,09**	**0**
21/01/1961	13,9	13,9	2,363	4,45	4,45	4,45	0
22/01/1961	**0**	**0**	**0**	**3,45**	**3,45**	**3,45**	**0**
- - -							
01/12/2012	0,2	0	0	0,159	0,159	0,159	0
02/12/2012	**0**	**0**	**0**	**-0,841**	**0**	**0**	**1**
03/12/2012	0	0	0	-1	0	0	1
04/12/2012	**0**	**0**	**0**	**-1**	**0**	**0**	**1**
05/12/2012	20,4	20,4	3,468	2,468	2,468	2,468	0
06/12/2012	**0**	**0**	**0**	**1,468**	**1,468**	**1,468**	**0**
07/12/2012	0	0	0	0,468	0,468	0,468	0
					Total de Falhas		7797

Célula 2
Volume Reservatório
15.000 (L)

Célula 3
Demanda
1.000 (L/dia)

Célula 4
Falha (%)
45,56%

Célula 5
Garantia (%)
54,44%

(fonte: elaborado pelo autor)

Enquanto a **Coluna 1.6**, verifica se os valores da coluna 1.5 são negativos, isso indica que a demanda de consumo foi superior ao volume disponível de água no reservatório, porém o volume negativo é uma condição fisicamente impossível. Então, a coluna foi condicionada para que caso os valores fossem negativos registrá-los como zeros, representando que não houve acumulo de água no dia. Contudo, se os valores da coluna 1.5 forem positivos, ele é mantido na coluna 1.6.

Pode acontecer que os valores da coluna 1.6 sejam superiores ao limite físico do reservatório. Ou seja, o volume calculado pode ser maior que a capacidade do reservatório analisado. Sendo assim, com a finalidade de representar a realidade fornecendo o volume resultante total, é feito uma verificação na **Coluna 1.7**. Caso o valor da coluna 1.6 for superior volume do reservatório, que indicaria o extravasamento para a rede de drenagem pluvial, é mantido o

valor da célula 2. Entretanto, se o valor for inferior ao da célula 2 é utilizado o valor da coluna 1.6.

A **Coluna 1.8** indica se no dia em análise houve falha de atendimento á demanda. É considerado que se o valor na coluna 1.7 for diferente de zero, é registrado na coluna 1.8 o valor zero, indicando que não houve falha na demanda. Por outro lado, caso o valor na coluna 1.7 for igual a zero, o valor na coluna 1.8 seria considerado igual a 1, o que indica que houve falha no atendimento na demanda no dia em análise. Ao final da coluna 1.8 é apresentado o somatório dos dias em que houve falhas na demanda.

A **Célula 2** e **Célula 3** devem ser informadas com valores para volume do reservatório e demanda diária, respectivamente. O percentual de falha no atendimento para a demanda é indicado na **Célula 4**. No qual é obtido pela divisão do total de dias em que houve falha ao atendimento da demanda, o somatório dos valores da coluna 1.8, pelo número de dias da série histórica. Ao subtrairmos 1 da falha obtida na célula 3, tem-se a garantia de atendimento da demanda que é indicada na **Célula 5**. O total de dias utilizados no modelo foi de 17.115 dias.

6.3 CURVA DE PERMANÊNCIA

A próxima etapa da metodologia é a elaboração da curva de permanência, que no trabalho, apresenta a probabilidade de um dado volume de água no reservatório ser superado ou igualado. Esse gráfico é essencial para as simulações, porque a partir dele é possível determinar qual é o volume disponível no reservatório, e assim estimar o quanto este consegue amortecer de escoamento superficial. A curva de permanência é sensível a alterações das variáveis, como por exemplo: demanda e volume de reservatório. Logo, cada reservatório da simulação 1 e cada variação de demanda da simulação 2 têm sua própria curva de permanência.

Tomando como exemplo a planilha ilustrada na tabela 7, foi gerada a curva de permanência para o melhor entendimento do modelo desenvolvido no trabalho. Na tabela 8 são mostrados de forma resumida os resultados obtidos para o cenário montado no exemplo supracitado.

Para elaboração da curva de permanência, foi necessário colocar em ordem decrescente os valores extraídos da Coluna 1.7, da planilha representada na tabela 7, que configura o volume resultante total no dia. Os principais valores podem ser observados na **Coluna A** da tabela 8,

sendo que o volume é convertido, pela planilha do *Excel*, de m³ para litros. Logo após, na **Coluna B**, é contado o número de vezes em que o valor da Coluna A é igualado ou superado na série, note que a série é mostrada de forma resumida na coluna A. Portanto, a coluna B representa o número absoluto de dias da série em que há um volume correspondente mínimo de água armazenada no reservatório.

Tabela 8 – Elaboração da curva de permanência para armazenamento

Coluna A		Coluna B	Coluna C
Volume		Valores iguais ou superiores	Probabilidade (%)
(m³)	(L)		
15,000	15000	**167**	0,98%
15,000	15000	**167**	0,98%
15,000	15000	**167**	0,98%

8,629	8629	**1950**	11,39%
8,628	8628	**1951**	11,40%
8,624	8624	**1952**	11,41%
8,619	8619	**1953**	11,41%

2,267	2267	**6361**	37,17%
2,266	2266	**6362**	37,17%
2,265	2265	**6364**	37,18%

0,030	30	**9268**	54,15%
0,010	10	**9301**	54,34%
0,005	5	**9307**	54,38%
0,003	3	**9318**	54,44%
0,000	0	**17115**	100,00%

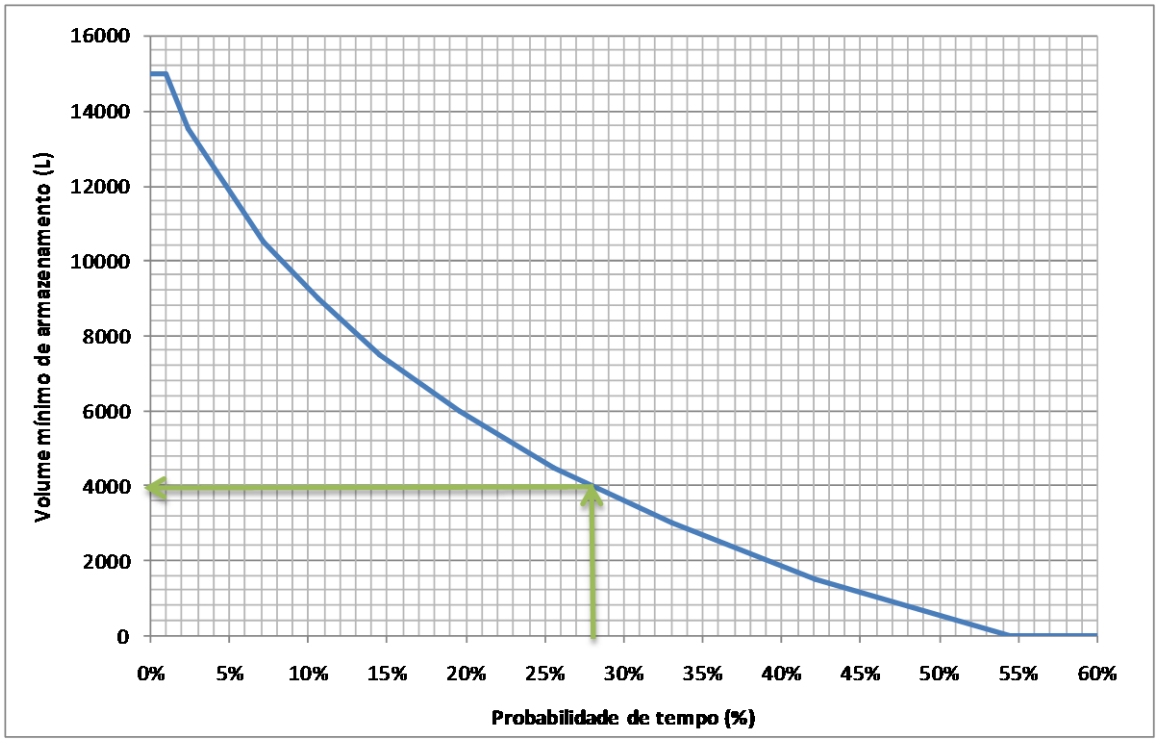
(fonte: elaborado pelo autor)

Posteriormente, é calculada a probabilidade do valor na coluna B se repetir, ou seja, o valor da coluna B dividido pelo total de dias do modelo (17.115 dias). A probabilidade pode ser ilustrada na **Coluna C**. Pode se observar que as probabilidades estão convergindo para o garantia de atendimento da demanda (54,44%), calculada na célula 5 da tabela 7, configurando que o volume armazenado no reservatório supri a demanda diária em 54,44% das vezes.

É importante destacar que os dados apresentados na tabela 8 são resumidos e apenas para fins ilustrativos. Na figura 7 é traçado gráfico da curva de permanência do armazenamento, gerado a partir da coluna A e coluna C da tabela 8. Para a simplificação do traçado do gráfico, foi

considerado que na probabilidade zero o reservatório está no volume máximo da capacidade, que no caso é 15.000 litros.

Figura 7 – Curva de permanência de armazenamento:
reservatório de 15.000 L e demanda de 1.000 L/dia



(fonte: elaborado pelo autor)

As setas verdes da figura 7 indicam que em 28% das vezes, ou com uma probabilidade de 28%, a demanda diária foi suprida e ainda resta um volume de água no reservatório de no mínimo 4.000 litros. Por analogia, pode-se concluir que com uma probabilidade de 72% o volume máximo disponível para o amortecimento no reservatório será de pelo menos 11.000 litros. Com base nessa premissa, é possível estimar o quanto de volume estará disponível no reservatório ao longo de toda a série de volumes de armazenamento. Na tabela 9 e figura 8 são apresentados a tabela resumida e o gráfico da probabilidade, respectivamente, dos volumes máximos disponíveis para amortecimento no reservatório.

Para a composição da **Coluna D** da tabela 9, foi feita a diferença do volume total do reservatório, que no caso é 15.000 litros, pelos valores da coluna A da tabela 8, que são os volumes de água que o reservatório armazenou. Bem como, para formação da **Coluna E**, seguiu o mesmo raciocínio. Obtém-se a probabilidade contrária a alcançada na coluna C da tabela 8, ou seja, subtraí 100% de probabilidade pelos valores da coluna C. Pode se observar

que as probabilidades dos volumes disponíveis para amortecimento convergem para a falha de atendimento da demanda (45,56%), calculada na célula 4 da tabela 7, configurando que o reservatório terá volume máximo de 15.000 litros para amortecimento em 45,56 % das vezes. É importante destacar que os dados da tabela 9 são resumidos e apenas para fins ilustrativos.

Tabela 9 – Elaboração da curva de permanência para amortecimento

Coluna D	Coluna E
Volume disponível (l)	Probabilidade (%)
0	99,02%
0	99,02%
0	99,02%

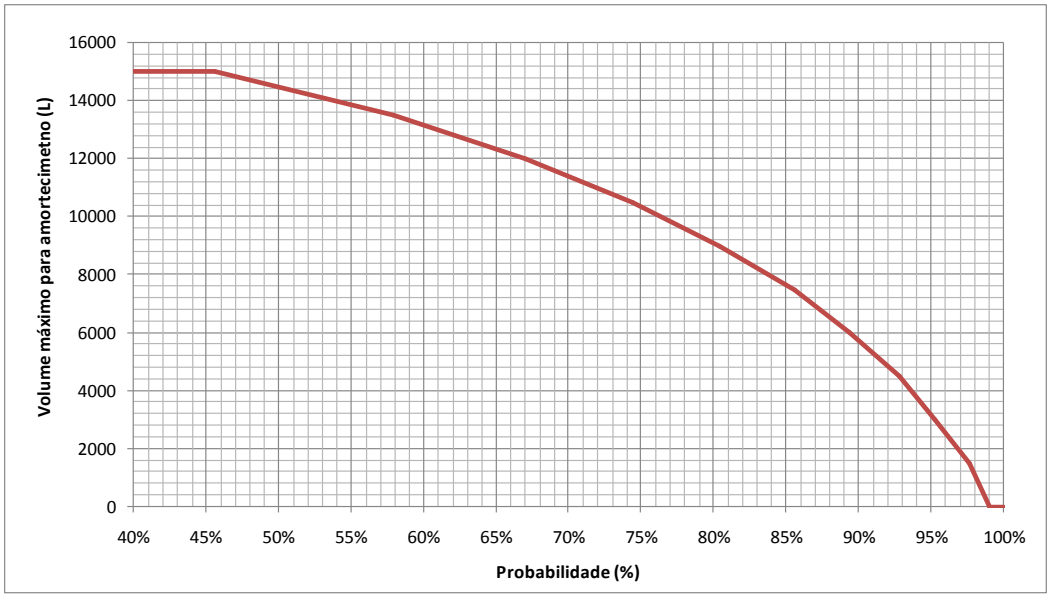
6371	88,61%
6372	88,60%
6376	88,59%
6381	88,59%

12733	62,83%
12734	62,83%
12735	62,82%

14970	45,85%
14990	45,66%
14995	45,62%
14997	45,56%
15000	0,00%

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 8 – Curva de permanência de amortecimento:
reservatório de 15.000 L e demanda de 1.000 L/dia



(fonte: elaborado pelo autor)

6.4 CÁLCULO DO HIDROGRAMA DE PROJETO

Nesta seção é desenvolvida a quarta etapa da metodologia, que é geração do hidrograma de projeto usado no trabalho. São abordados a definição do hietograma de projeto, com base na curva IDF e o método dos blocos alternados, a separação do escoamento superficial e a elaboração do hidrograma de projeto com o auxílio do *software* IPHS1.

6.4.1 Hietograma de Projeto

O hietograma de projeto representa a sequência temporal crítica de totais precipitados, especificando a entrada de água em uma bacia contribuinte. Por meio deste, são determinados os volumes e vazões escoados superficialmente.

A precipitação foi calculada através da curva IDF do posto pluviográfico do IPH, a equação da curva está presente no PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005, p. 24). Poderiam ter sido trabalhadas todas as seis curvas IDF de Porto Alegre, abrangendo assim todo o município. Porém para simplificação dos resultados elegeu-se um posto, para então efetuar as simulações aplicadas na metodologia. A equação da curva IDF do posto IPH é dado por:

$$i = \frac{509{,}859 \times Tr^{0{,}196}}{(t+10)^{0{,}72}} \qquad \text{(fórmula 7)}$$

Onde:

i = intensidade da chuva, em mm/h;

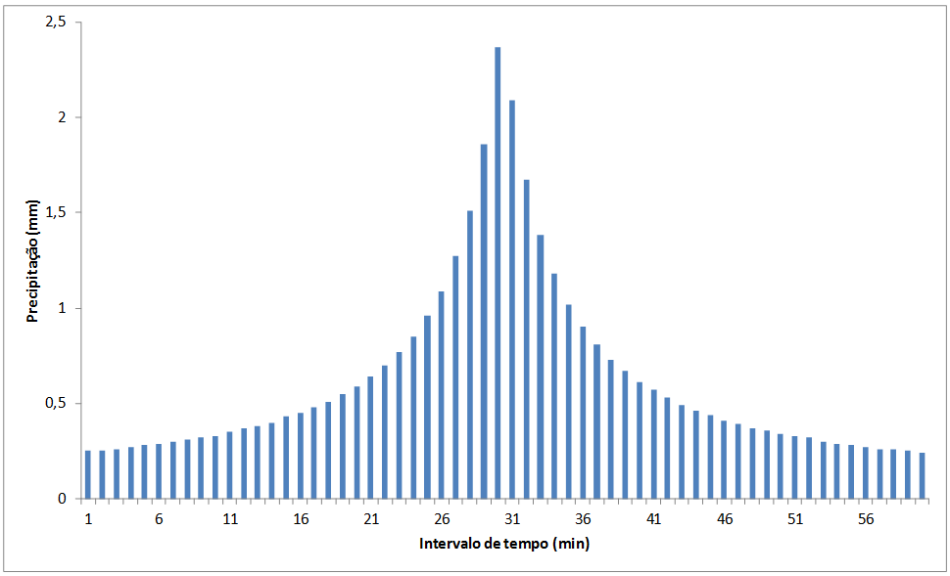
Tr = tempo de retorno, em anos;

t = duração da chuva, dado por min;

A partir da fórmula 6, apresentada na seção 5.4, são definindo o tempo de retorno e o número de intervalos da duração da chuva. O tempo de retorno para áreas residências, segundo a tabela 3, é de 5 anos, porém optou-se por uma valor mais conservador a fim de tornar o modelo mais robusto e seguro. Portanto, o tempo de retorno adotado foi de 10 anos, que é o valor máximo utilizado para microdrenagens, de acordo com a tabela 3. A duração de chuva de projeto para aplicação da metodologia foi escolhida de 60 min, com intervalos de tempo de 1 min cada, totalizando 60 intervalos.

Definidos tempo de retorno e duração do evento, é aplicada a fórmula 7, no qual tem como resultado a intensidade da precipitação. O hietograma foi gerado a partir da precipitação desagregada, que é a conversação da intensidade em altura de lâmina d'água, e posteriormente, sua respectiva desacumulação. O hietograma foi reorganizado com base no método dos blocos alternados. O método baseia-se em simular um cenário critico para precipitação, posicionando o pico da chuva em um uma situação mais desfavorável. Para este trabalho, o valor de pico foi posicionado na metade do tempo de duração da chuva, como pode ser observado na figura 9.

Figura 9 – Hietograma de projeto



(fonte: elaborado pelo autor)

6.4.2 Hidrograma de Projeto

O hidrograma de projeto é a peça fundamental para o sistema de amortecimento de escoamento superficial, a partir da definição dos parâmetros e da chuva efetiva é possível gerá-lo. Nesta seção é descrito o procedimento utilizado no processo de transformação da precipitação em vazão para posterior desenvolvimento dos gráficos e tabelas.

A transformação da chuva efetiva em vazão foi executada com o auxílio do *software* IPHS1. Para realizar este processo, os dados de entrada utilizados foram as informações e características do lote e do evento de chuva. O cálculo da precipitação efetiva foi feito através do método do coeficiente CN. Por sua vez, na transformação da precipitação efetiva em vazão foi utilizado o método do hidrograma unitário sintético do SCS. Os dados de entrada utilizados para alimentar o *software* e que serviram para gerar o hidrograma foram:

a) a duração de chuva de projeto foi de 60 min, com intervalos de tempo de 1 min cada, totalizando 60 intervalos;

b) a simulação foi considerada com 120 min;

c) área da bacia foi considerada a área do lote, que é de 500 m²;

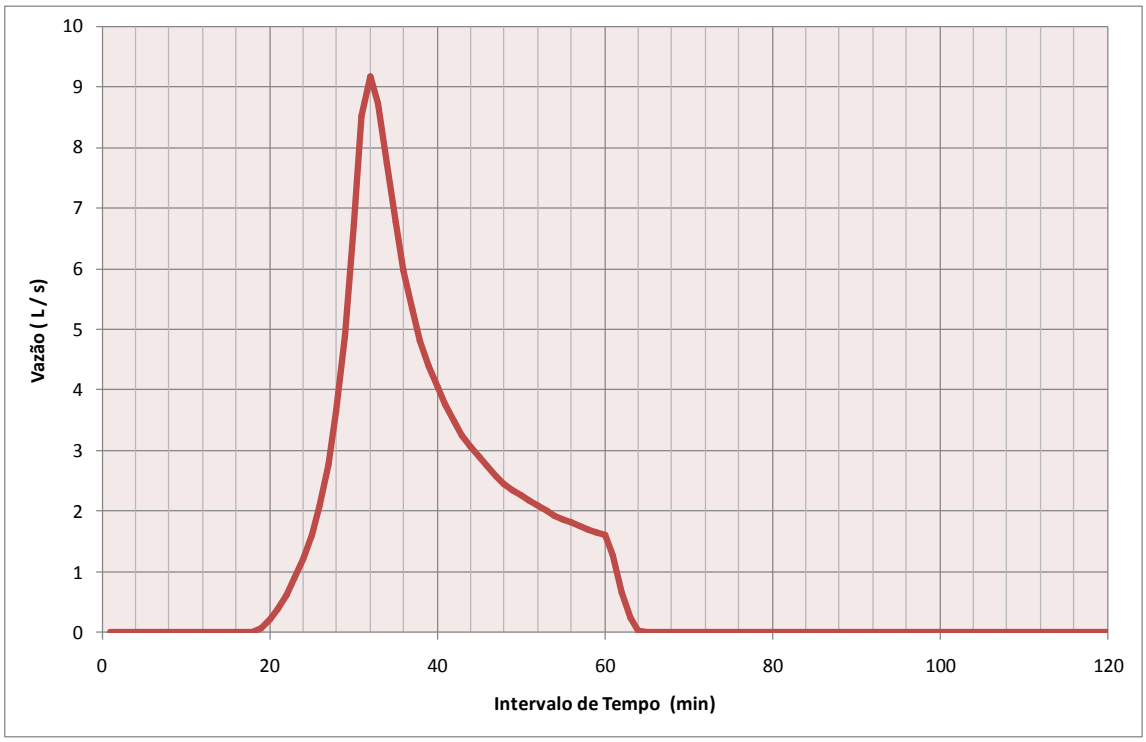
d) o tempo de concentração foi determinado pela fórmula de Kirpich, fórmula 4, no qual a declividade foi considerada de 0,005 m/m e o comprimento do talvegue principal foi considerado o maior comprimento do terreno, ou seja, o maior caminho percorrido por uma água precipitada. Então, o comprimento

estimando foi o da diagonal do terreno que foi de 36,6 m. Portanto o tempo de concentração adotado foi de 2,4 min;

e) considerado o valor CN igual a 90 para separação do escoamento superficial no hietograma.

Depois de executado o programa, o resultado são os valores da vazão superficial, em cada intervalo de tempo, gerada pela precipitação efetiva ao longo da simulação de 120 min, como ilustra a figura 10 e que constitui o hidrograma de projeto.

Figura 10 – Hidrograma de projeto



(fonte: elaborado pelo autor)

6.5 VOLUMES PARA AMORTECIMENTO E TEMPO SUPORTADO

Nesta seção é calculado o volume gerado pelo hidrograma de projeto, assim como, a forma que ele trabalha com a curva de permanência de cada reservatório, no qual são usadas nas simulações propostas. Também é tratado nesta seção, o tempo máximo que o reservatório suporta do evento critico de chuva até extravasar.

6.5.1 Volumes para Amortecimento

Primeiramente, é convertida a vazão, obtida na seção anterior, em volume. Para calcular a área do gráfico foi considerada a área de cada intervalo de tempo como a área de um trapézio. Sendo que as ordenadas de vazão representam as bases do trapézio, enquanto a altura do polígono é dada pelo intervalo de tempo, que é constante e igual a 1 min. Fazendo o somatório das áreas tem-se o volume gerado pelo hidrograma, como pode ser observado no apêndice A.

O volume total do hidrograma obtido foi de **8.420 litros**. Portanto para amortecer 100% de um evento de chuva com tempo de recorrência de 10 anos e com as condições de contorno estabelecidas, é necessário que haja volume disponível no reservatório de pelo menos 8.420 litros. A fim de conhecer qual é a probabilidade de tempo que o reservatório terá condições para amortecer a totalidade dessa tormenta ou uma parcela dela, e como o principal objetivo do trabalho é o desenvolvimento da metodologia que propicie o uso simultâneo do reservatório, foi verificado para cada curva de permanência, propostas nas duas simulações, a probabilidade em que o reservatório amorteceria teria disponível volumes para o amortecimento de parcelas do hidrograma de projeto.

Na tabela 10 o volume total do hidrograma de projeto foi dividido em percentuais, no qual, a partir da curva de amortecimento do reservatório, é determinada qual a probabilidade correspondente para haver esse volume disponível. No caso da tabela 10, para exemplificação do desenvolvimento, foi utilizada a curva de permanência de amortecimento presente na figura 8, que é de um reservatório de 15.000 litros com demanda diária de 1.000 litros. Caso a capacidade do reservatório for inferior ao volume total do hidrograma (8.420 litros), a tabela registra o volume máximo que o reservatório pode amortecer e sua correspondente probabilidade, indicando que o reservatório extravasa o excesso de água para a rede de drenagem.

Tabela 10 – Probabilidade para amortecimento do hidrograma
em um reservatório de 15.000 L com demanda de 1.000 L/dia

Parcela do hidrograma (%)	Volume do hidrograma (L)	Volume máximo para amortecimento (L)	Probabilidade (%)
10	842	842	98,6
20	1684	1684	97,5
30	2526	2526	96,2
40	3368	3368	94,8
50	4210	4210	93,3
60	5052	5052	91,5
70	5894	5894	89,8
80	6736	6736	87,8
90	7578	7578	85,3
10	8420	8420	82,5

(fonte: elaborado pelo autor)

6.5.2 Tempo Máximo Suportado

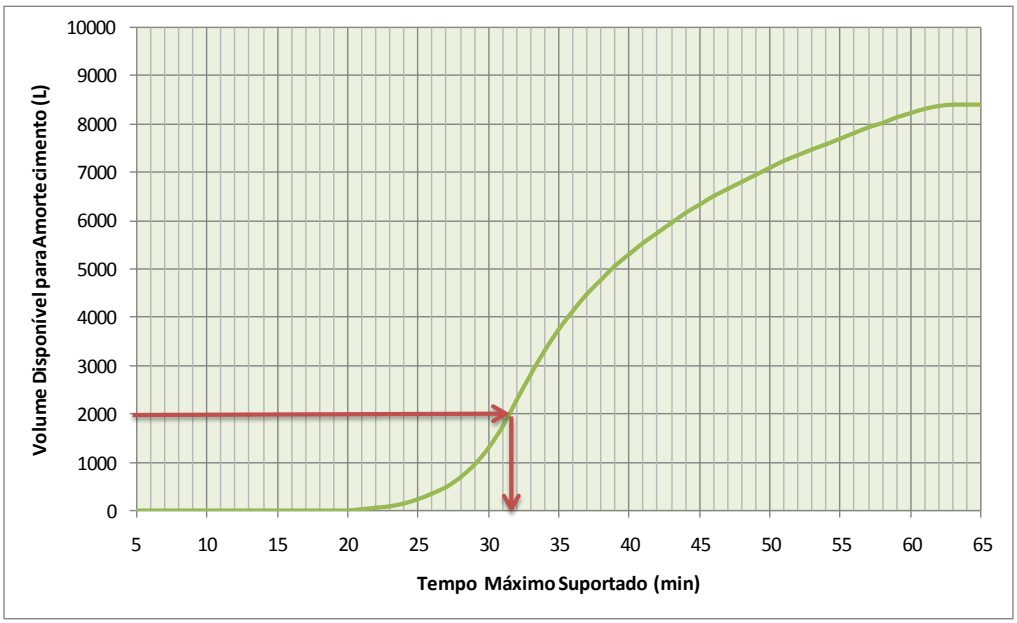
Em certas situações o volume disponível para amortecimento no reservatório é inferior ao volume total do hidrograma estudado. Nesses casos, o reservatório suporta um determinado tempo do evento de chuva, absorvendo uma parcela do volume da precipitação, e o restante é extravasado pelo reservatório. Nesta seção é estimado o tempo máximo que um reservatório pode suportar tendo determinado volume disponível para amortecimento. Esse método tem o objetivo analisar o reservatório por outra ótica, usando como critério de análise e escolha de variáveis a duração do evento de chuva ao invés do volume do hidrograma de projeto.

Para fazer essa análise, foram considerados os volumes do hidrograma por intervalos de tempo, vide apêndice A, e acumulados esses volumes, que representam o volume necessário que o reservatório deve ter para fazer o amortecimento. Sem considerar, neste momento, qual a capacidade do reservatório ou a probabilidade do volume para amortecimento estar disponível. Foi considerado nesse modelo que o volume do hidrograma destina-se diretamente para o reservatório, desconsiderando assim as perdas. Como o objetivo do modelo é estimar o tempo máximo que um volume para amortecimento pode suportar, essa simplificação é válida.

Lançando mão da coluna tempo suportado e a coluna volume acumulado, foi gerado um gráfico, apresentado na figura 11, que demonstra o tempo máximo suportado do evento de chuva estudado para determinados volumes disponíveis para amortecimento. Para fins ilustrativos, as setas do gráfico indicam que quando o reservatório possuir 2.000 litros

disponíveis para amortecimento, o tempo máximo suportado pelo mesmo, do evento de chuva estudado, será 31,5 min.

Figura 11 – Tempo máximo suportado do hidrograma para volumes de amortecimento disponíveis no reservatório



(fonte: elaborado pelo autor)

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foi elaborada a curva de permanência de armazenamento e amortecimento para cada reservatório e cada demanda propostos nas simulações. Para a primeira simulação, fixou-se o valor da demanda em 852,8 litros por dia, e variou os volumes de reservatório, conforme descrito anteriormente. Enquanto na segunda simulação foi fixado um reservatório e variado a demanda, como apresentado anteriormente. Os gráficos foram gerados com base na metodologia proposta, e é uma fonte rica de informação que auxiliaram na escolha do reservatório e demanda de consumo. Os métodos desenvolveram gráficos que:

a) apresentam as probabilidades de tempo em que as parcelas do volume do hidrograma estudado são amortecidas nos reservatórios, para a primeira simulação. Na segunda simulação, são apresentadas as probabilidades de tempo em que essas parcelas de volume são amortecidas para diferentes demandas em um reservatório escolhido.

b) apresentam as probabilidades e tempos suportados dos reservatórios até extravasar, na primeira simulação, com uma demanda fixada. Já na segunda simulação, são apresentados as probabilidades e tempos suportados do reservatório, para cada demanda.

c) representam os índices de falha na demanda estipulada, na primeira simulação, para cada reservatório. Enquanto para a segunda simulação, são representadas os índices de falha nas demandas para um reservatório estipulado.

7.1 SIMULAÇÃO 1 – RESERVATÓRIO VARIÁVEL

Por meio da curva de permanência de amortecimento de cada reservatório, foi analisada a probabilidade do tempo que parcelas do volume do hidrograma estariam disponíveis no reservatório. O resultado é ilustrado na tabela 11, note que quando a parcela do volume do hidrograma é maior que a capacidade do reservatório, não é registrada nenhum valor na tabela, representando que o volume não é compatível com a capacidade do reservatório em análise.

Tabela 11 – Probabilidade para amortecimento de parcelas do volume do hidrograma para cada reservatório

Parcela (%)	Volume hidrograma (L)	Probabilidade em cada reservatório (%)					
		2.500 L	5.000 L	7.500 L	10.000 L	15.000 L	20.000 L
10	842	86,5	91,5	94,2	96,0	97,5	98,4
20	1684	74,8	84,2	89,3	92,7	95,4	97,2
30	2526	62,4	76,7	84,2	89,2	93,4	96,1
40	3368		68,7	78,7	85,3	91,4	94,8
50	4210		59,8	72,9	81,1	89,1	93,6
60	5052		50,5	66,6	76,5	86,7	92,1
70	5894			59,6	71,4	84,0	90,4
80	6736			51,8	66,1	81,2	88,4
90	7578			43,9	60,3	78,1	86,4
100	8420				54,0	74,8	84,4

(fonte: elaborado pelo autor)

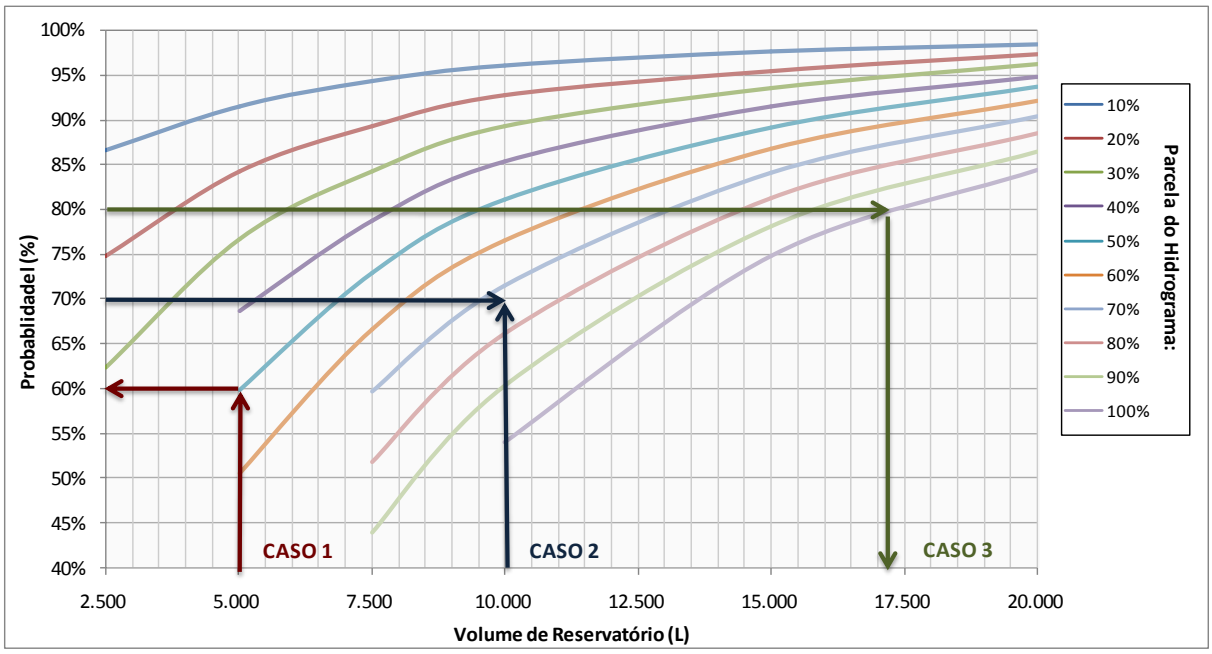
Com base na tabela 11, foi gerado um gráfico que representa a probabilidade para amortecimento dos percentuais do volume do hidrograma, conforme apêndice B. Cada curva do gráfico representa um percentual do volume total do hidrograma, e um ponto de uma dessas curvas, indica um reservatório e a sua respectiva probabilidade de ter disponível, no máximo para amortecimento, o volume representado pela curva.

A aplicação do gráfico é feita escolhendo duas variáveis para então determinar uma terceira variável. Para elucidar o emprego do gráfico, na figura 12 são simulados três casos no qual é buscada cada uma das variáveis. No **caso 1** deseja-se conhecer a probabilidade que o volume estará disponível a partir de um reservatório e volume de amortecimento determinados. Para essa situação, adotou o uso de um reservatório de 5.000 litros, e foi fixado na curva que representa metade do hidrograma, resultando que o reservatório amortece no máximo esse volume em 59,8% do tempo.

Enquanto **caso 2**, fixou uma probabilidade de tempo e um reservatório para se conhecer qual a percentagem do hidrograma é amortecida. Nesse cenário, observa-se que para um reservatório de 10.000 litros e com uma probabilidade de 70%, o volume máximo amortecido será de pouco mais de 70% da tormenta, ou seja, um volume de 5894 litros. Já no **caso 3**, fixou uma probabilidade de 80%, no qual pretende saber qual reservatório consegue amortecer a totalidade do hidrograma. Portanto, com uma probabilidade de 80% e para amortecer 100% do hidrograma estudado, o reservatório terá que ter pelo menos 17.200 litros, como não existe

esse volume comercialmente é adotado um reservatório de 20.000 litros, aumentado a probabilidade para 84,4% do tempo o amortecimento.

Figura 12 – Aplicação do gráfico de probabilidade de amortecimento para demanda de 852,8 litros/dia

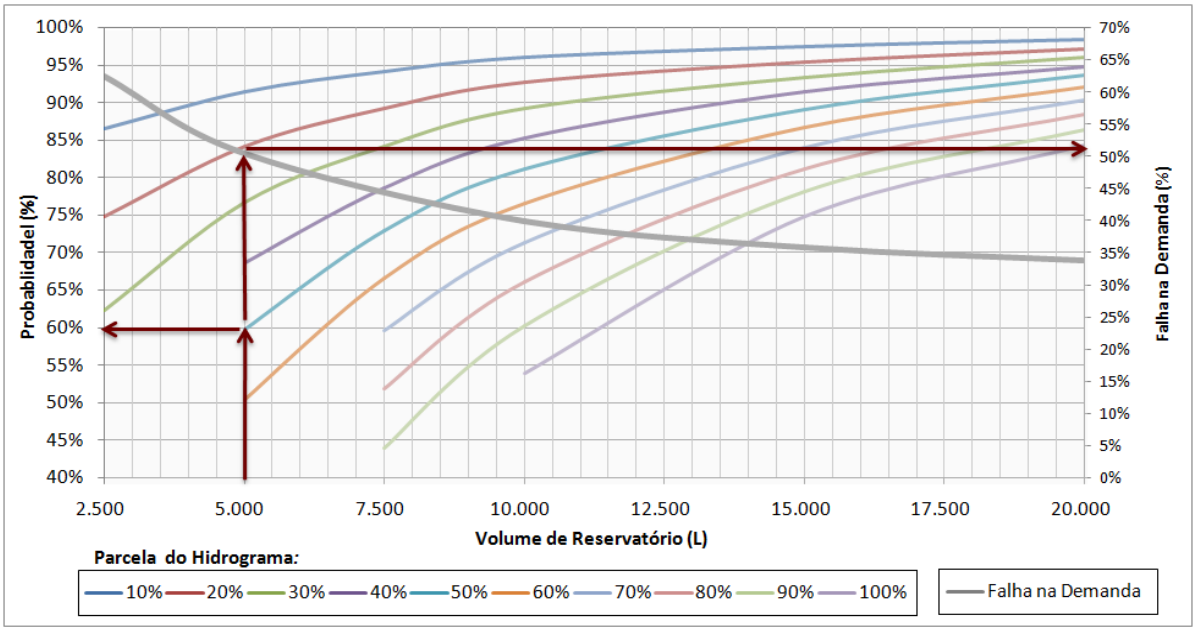


(fonte: elaborado pelo autor)

Para auxiliar na escolha do reservatório, foi elaborada a curva que estipula a falha de atendimento na demanda de consumo. A curva de falha foi elaborada a partir de cada valor calculado na célula 4 da tabela 7 e sobreposta no gráfico anterior, o resultado é demonstrado no apêndice C. A aplicação desse gráfico é feita da mesma forma que o anterior, porém foi acrescido mais um eixo, no qual representa a falha da demanda, que fica a direita do gráfico. Para exemplificação foi demarcado o caso 1 na figura 13, não foram representados os outros casos para não poluir a figura, porém a aplicação e seu desenvolvimento são feitos da mesma forma.

A falha da demanda independe das curvas de percentagens do hidrograma, portanto é necessário apenas conhecer o volume do reservatório para determinar sua falha, que é representada no gráfico pela curva cinza. No caso 1, o reservatório de 5.000 litros amortece no máximo metade do hidrograma estudado em 59,8% das vezes. E possui uma falha no atendimento de 50,5% da demanda diária de 852,8 litros. Nos casos 2 e 3 as falhas no atendimento da demanda são respectivamente 40% e 34%.

Figura 13 – Aplicação do gráfico de probabilidade de amortecimento para demanda de 852,8 litro/dia com falha de atendimento



(fonte: elaborado pelo autor)

O segundo método desenvolvido para esta simulação aborta o tempo máximo suportado pelo reservatório, a partir de uma demanda fixada. Com base no gráfico da figura 11, foram adotados valores de duração da precipitação, e foi buscado no gráfico o volume gerado pelo hidrograma na faixa de tempo correspondente. A partir desses dados, se obteve em cada curva de permanência para amortecimento a probabilidade de que esse volume estaria disponível no reservatório. O resultado desse desenvolvimento é ilustrado na tabela 12.

Tabela 12 – Probabilidade para amortecimento do volume correspondente ao tempo de duração da chuva para cada reservatório

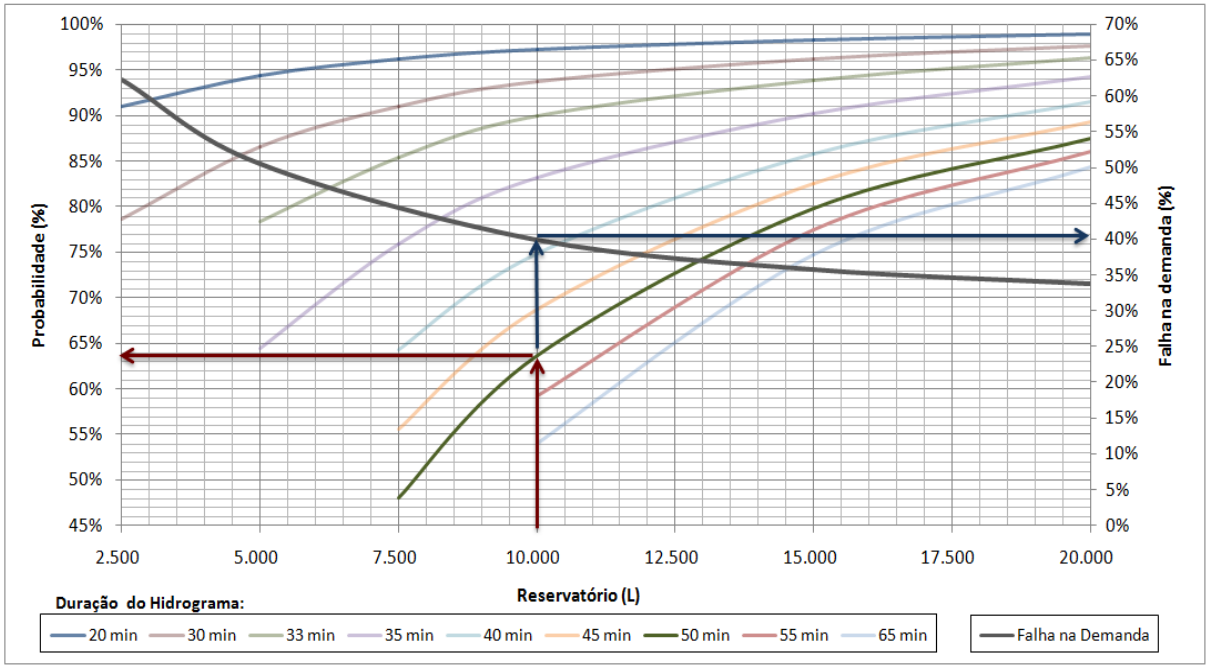
Duração da chuva (min)	Volume do hidrograma (L)	Probabilidade em cada reservatório (%)					
		2.500 L	5.000 L	7.500 L	10.000 L	15.000 L	20.000 L
20	12	91,0	94,4	96,2	97,3	98,3	98,9
30	1309	78,6	86,6	91,0	93,7	96,2	97,6
33	2834		78,4	85,4	90,0	93,9	96,3
35	3764		64,5	75,9	83,2	90,2	94,3
40	5319			64,3	74,9	85,8	91,5
45	6340			55,6	68,7	82,5	89,3
50	7102			48,1	63,7	79,8	87,5
55	7720				59,2	77,5	86,1
65	8420				54,0	74,8	84,4

(fonte: elaborado pelo autor)

A duração do total chuva foi de 65 min, ou seja, o hidrograma se desenvolve por completo nesse período. Para durações inferiores a 20min, o volume gerado é praticamente nulo, porém não significa que a precipitação não se iniciou, e sim, que até esse período não foi gerado escoamento superficial significativo no lote. Para reservatórios de 2.500, 5.000 e 7.500 litros, o volume gerado pelo hidrograma supera a capacidade dos reservatórios, indicando que ele extravasou o excesso de água para o sistema de drenagem. Portanto para valores superiores da capacidade do reservatório, não foi registrada nenhuma probabilidade.

Com base nos dados da tabela 12, foi gerado um gráfico que apresenta a probabilidade em que cada reservatório tem de suportar um tempo de duração determinado. Conforme apêndice D, cada duração de chuva é uma curva no qual é variado a probabilidade e o volume do reservatório. Da mesma forma que no método anterior, para aumentar a riqueza de informação e diversidade para aplicação, foi acrescido a esse gráfico uma curva na qual representa a falha da demanda fixada, como pode ser observado no apêndice E. Na figura 14 é apresentada uma aplicação desse método.

Figura 14 – Aplicação do gráfico de probabilidade do tempo suportado para demanda de 852,8 litros/dia



(fonte: elaborado pelo autor)

O método é empregado da mesma maneira que a anterior, sendo escolhidas duas variáveis para se obter uma do gráfico, levando em consideração que a falha de demanda, nesse caso, só

varia para o volume do reservatório. Na figura 14 foi adotado um valor de 10.000 litros de volume de reservatório, e observou-se que em 64% das vezes o reservatório suporta no máximo 50 min da chuva. Analisando o lado direito do gráfico, determinou-se que em 40% das vezes o reservatório falhará na demanda diária de consumo.

7.2 SIMULAÇÃO 2 – DEMANDA VARIÁVEL

A segunda simulação realizada no trabalho, a demanda diária foi variada para valores entre 250 a 1.500 litros por dia, conforme especificado anteriormente. E para essa simulação, foi adotado um volume de reservatório que tivesse capacidade mínima para amortecer a totalidade do volume do hidrograma. Portanto, o reservatório adotado para cada uma das demandas da simulação 2 foi de 10.000 litros.

Por meio da curva de permanência de amortecimento de cada demanda, foi analisada a probabilidade do tempo que parcelas do volume do hidrograma estariam disponíveis no reservatório. O resultado é ilustrado na tabela 13, note que conforme aumenta a demanda diária, aumenta a falha de atendimento, e isso leva o reservatório a ter um volume disponível para amortecimento maior e mais frequente. Logo, a probabilidade para que o reservatório possua volume disponível para amortecer o hidrograma é maior para demandas maiores.

Com base nos resultados da tabela 13, foi gerada um gráfico que representa a probabilidade para amortecimento dos percentuais do volume do hidrograma, conforme apêndice F. Cada curva do gráfico representa um percentual do volume do hidrograma, e um ponto de uma dessas curvas, indica uma demanda e a sua respectiva probabilidade de ter disponível no máximo o volume da curva para amortecimento.

Tabela 13– Probabilidade para amortecimento de percentuais do volume do hidrograma para cada demanda

Parcela (%)	Volume do hidrograma	Probabilidade para cada demanda (%)					
		250 L/dia	500 L/dia	750 L/dia	1.000 L/dia	1.250 L/dia	1.500 L/dia

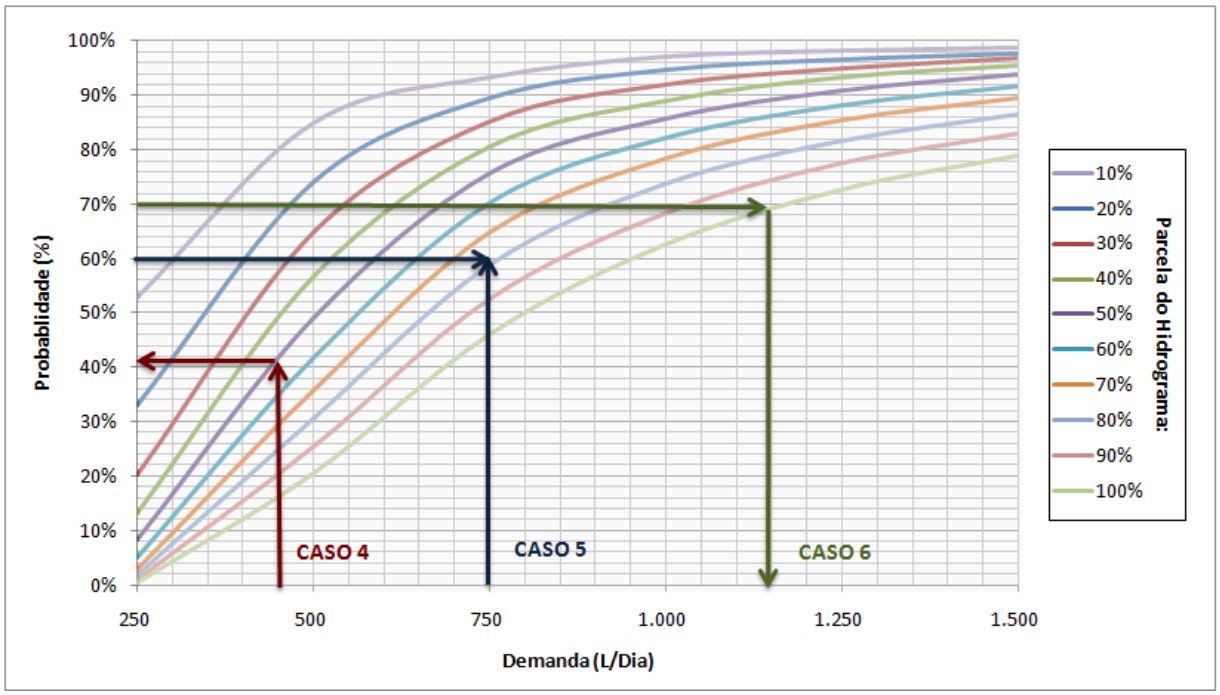
	(L)						
10	842	53,0	84,9	93,2	97,0	98,1	98,7
20	1684	33,2	74,0	89,4	94,7	96,6	97,6
30	2526	20,4	64,7	85,2	92,0	94,9	96,9
40	3368	13,2	56,7	80,5	89,0	93,3	95,4
50	4210	8,3	49,0	75,7	85,8	90,9	93,9
60	5052	5,0	41,8	70,2	82,1	88,2	91,7
70	5894	2,9	35,9	64,8	78,4	85,4	89,5
80	6736	1,8	30,7	58,8	73,7	81,6	86,5
90	7578	1,1	25,4	52,7	68,4	77,5	83,0
100	8420	0,5	20,6	46,2	62,6	72,8	78,9

(fonte: elaborado pelo autor)

A aplicação do método é feita da mesma forma que as anteriores da simulação 1. Para elucidar o emprego do gráfico, na figura 15 são simulados três casos. No **caso 4** deseja-se conhecer a probabilidade que o volume no reservatório estará disponível a partir de uma demanda e volume de amortecimento determinados. Para essa situação, adotou o uso de uma demanda de 450 litros por dia, se fixar na curva que representa metade do hidrograma, é observado que o reservatório amortece no máximo esse volume em 42,5% do tempo.

Enquanto **caso 5**, fixou-se uma probabilidade de tempo e um reservatório para conhecer qual a percentagem do hidrograma é amortecida. Nesse cenário, observa-se que para uma demanda diária de 750 litros e com uma probabilidade de 60%, o volume máximo amortecido será de cerca de 60% do hidrograma, ou seja, um volume de 5.502 litros. Já no **caso 6**, pretende saber qual demanda diária possibilita amortecer a totalidade do hidrograma com uma probabilidade de 70%. Portanto, para essa probabilidade e amortecendo 100% do hidrograma estudado, a demanda deverá ser de pelo menos 1.150 litros por dia, considerando um reservatório de 10.000 litros.

Figura 15 – Aplicação do gráfico de probabilidade de amortecimento para reservatório de 10.000 litros

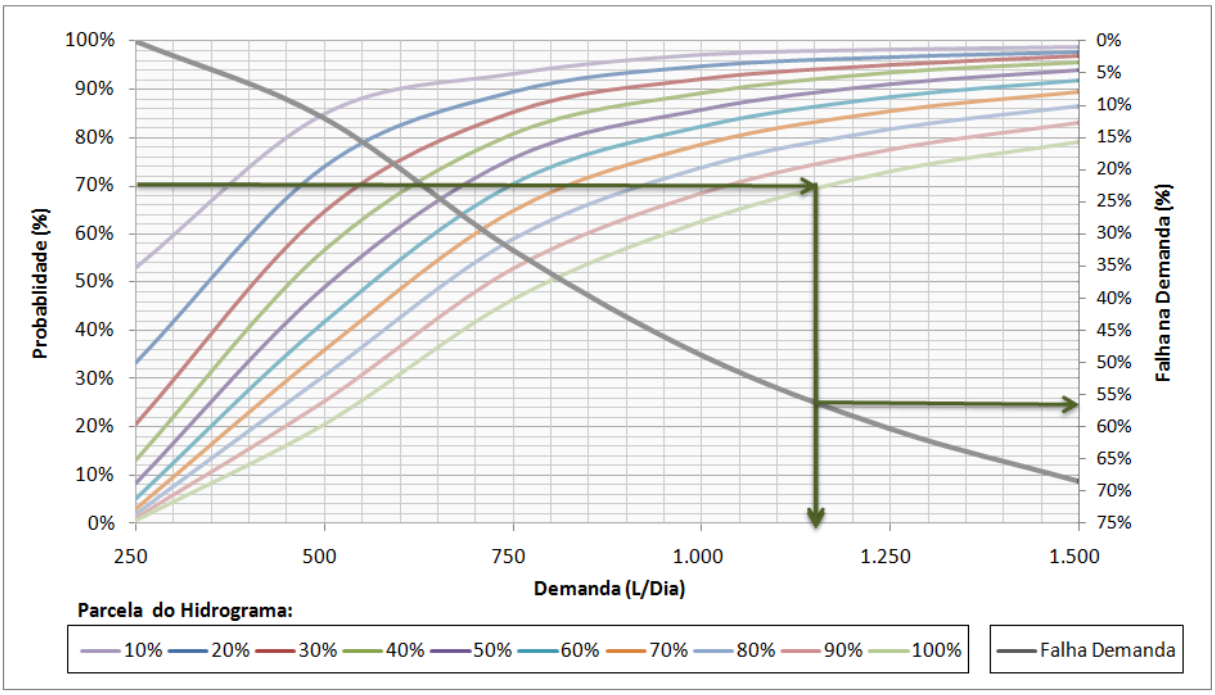


(fonte: elaborado pelo autor)

Para auxiliar a escolha do reservatório, da mesma forma que nos gráficos da simulação anterior, foi desenvolvida uma curva que estipula a falha de atendimento na demanda de consumo. Sendo assim, para cada demanda diária da simulação dois, foi obtido o índice de falha calculado na célula 4 da tabela 7. O gráfico elaborado é demonstrada no apêndice G. A aplicação é feita da mesma forma que a anterior, foi acrescido um eixo na direita do gráfico, no qual representa a falha da demanda. Para exemplificação, foi demarcado o caso 6 na figura 16, não foram traçados os outros casos para não poluir a imagem, porém a aplicação e desenvolvimento são os mesmos.

A falha da demanda independe das curvas de percentagens do hidrograma, portanto é necessário apenas conhecer a demanda diária para determinar sua falha, que é representada no gráfico pela curva cinza. No caso 6, o reservatório de 10.000 litros, com demanda de 1.150 litros, em 70% das vezes amortece no máximo 100% da hidrograma. E possui uma falha no atendimento de 56 % da demanda diária de 1.150 litros. Nos casos 4 e 5 as falhas no atendimento da demanda são respectivamente 33% e 8%.

Figura 16 – Aplicação do gráfico de probabilidade de amortecimento
para reservatório de 10.000 litros com falha de atendimento



(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando o gráfico, observa-se que quanto menor é a demanda diária, menor é a falha de atendimento para demanda. Porém, isso propicia que o reservatório terá maior conservação de água para o aproveitamento, deixando assim, menos volumes disponíveis para amortecimento do hidrograma. Portanto, quanto menor é a demanda de consumo diário, menor será a probabilidade de o reservatório amortecer o volume do hidrograma de projeto.

O segundo método desenvolvido, para esta simulação, aborta o tempo máximo suportado para cada demanda, a partir do reservatório de 10.000 litros. Com base no gráfico da figura 11, foram adotados valores de duração da precipitação, e foi buscado no gráfico o volume gerado pelo hidrograma na faixa de tempo correspondente. A partir desses dados, se obteve em cada curva de permanência de amortecimento, para as diferentes demandas, a probabilidade de que esse volume estaria disponível no reservatório. O resultado desse desenvolvimento é ilustrado na tabela 14.

Tabela 14 – Probabilidade para amortecimento do volume correspondente ao tempo de duração da chuva para cada demanda

Duração	Volume do	Probabilidade para cada demanda (%)

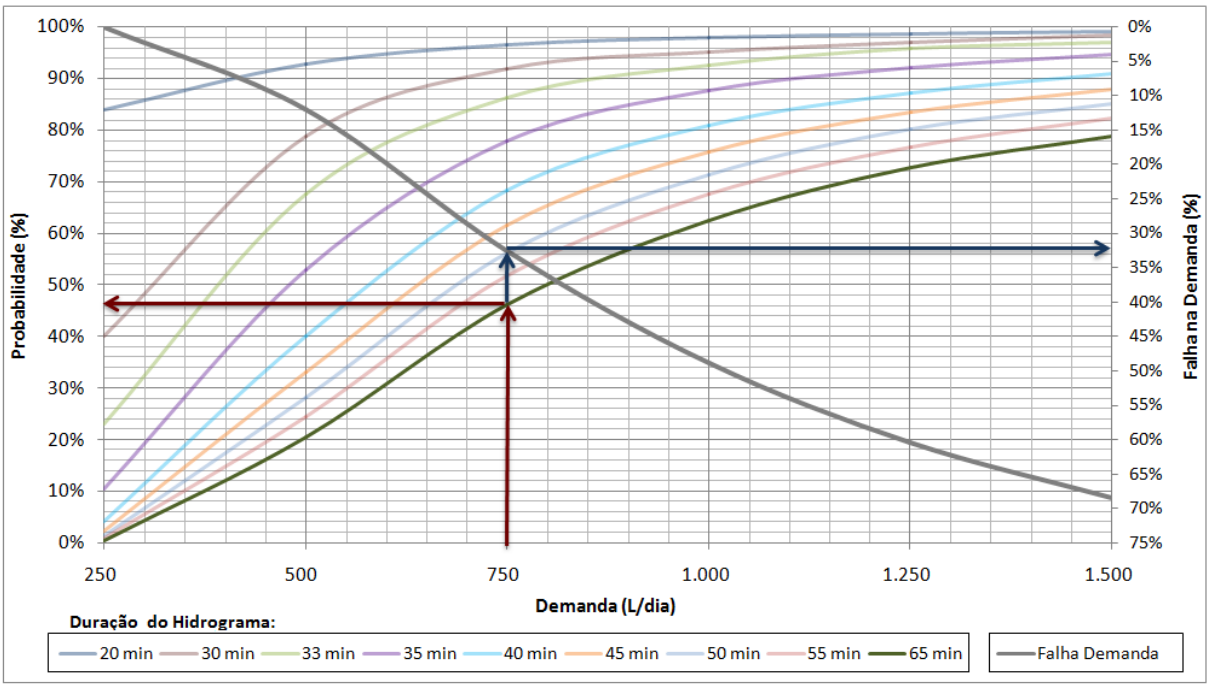
chuva (min)	hidrograma (L)	250 L/dia	500 L/dia	750 L/dia	1.000 L/dia	1.250 L/dia	1.500 L/dia
20	12	84,0	92,9	96,6	97,9	98,7	99,0
30	1309	40,2	78,8	91,9	95,2	97,0	98,4
33	2834	23,0	67,7	86,2	92,5	95,8	97,1
35	3764	10,6	53,0	77,9	87,7	92,0	94,7
40	5319	4,2	40,2	68,4	81,0	87,2	91,0
45	6340	2,3	33,1	61,5	75,7	83,4	87,9
50	7102	1,5	28,3	56,1	71,3	80,1	85,1
55	7720	0,9	24,5	51,7	67,5	76,7	82,4
65	8420	0,5	20,6	46,2	62,6	72,8	78,9

(fonte: elaborado pelo autor)

Com base nos dados da tabela 14, foi gerado um gráfico com a probabilidade em que o reservatório tem para suportar o tempo de duração correspondente a cada demanda. Conforme apêndice H, cada duração de chuva é uma curva em que variam a probabilidade e a demanda diária. Da mesma forma que no método anterior, para aumentar a riqueza de informação e diversidade para aplicação, foi acrescido a esse gráfico uma curva na qual representa a falha da demanda, conforme apêndice I. Na figura 18 é apresentada uma aplicação desse gráfico.

O método é empregado da mesma maneira que a anterior, sendo escolhidas duas variáveis para se obter uma do gráfico, levando em consideração que a falha de atendimento, nesse caso, só varia para a demanda diária. Na figura 17 foi adotado um valor de 750 litros por dia para a demanda de consumo, e observou-se que em 46,2% das vezes o reservatório suporta no máximo 65 min da chuva, que é a duração total da precipitação. Analisando o lado direito do gráfico, determinou-se que em 32,5% das vezes o reservatório falhará na demanda diária de 750 litros.

Figura 17 – Aplicação do gráfico de probabilidade de amortecimento para reservatório de 10.000 litros com falha de atendimento



(fonte: elaborado pelo autor)

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A finalidade do trabalho foi gerar desenvolver métodos que auxiliassem o projetista a tomar decisão, na escolha do reservatório ou demanda, de maneira rápida e eficiente para elaboração de projetos com o uso simultâneo do reservatório para controle de cheias e reaproveitamento de águas da chuva. Para isso, foram adotadas simplificações e determinados parâmetros que limitam o uso dos gráficos. Porém, ainda assim, elas podem ser aplicadas como referências no dimensionamento dos reservatórios.

O uso simultâneo do reservatório para os dois sistemas estudados é conflitante, pois para se ter a melhor eficiência do aproveitamento de água da chuva a conservação de água deve ser permanente, em contrapartida, para se ter um máximo amortecimento de escoamento superficial a conservação de água deve ser temporária. Porém um reservatório para captação de água da chuva tem volumes de armazenamento que variam ao longo do tempo. Portanto, permite volumes disponíveis que podem ser usados para o amortecimento do escoamento superficial.

Através de simulações que variaram volumes de reservatório e demandas diárias de consumo, foram elaboradas curvas de permanências com as quais puderam ser determinadas probabilidades em que teriam volumes disponíveis no reservatório. A partir disso, foi possível determinar o quanto do hidrograma de projeto é amortecido, bem como, o tempo em que o reservatório consegue suportar do evento critico de chuva até extravasar.

Foi verificado que para um mesmo reservatório, quanto maior for a demanda diária de consumo, maior será a falha no atendimento a demanda, e por consequência, maior será a probabilidade de o reservatório amortecer o volume gerado pelo evento critico de chuva. Isso evidencia que com o aumento da demanda os volumes disponíveis para amortecimento são maiores e mais frequentes.

Se for analisada uma mesma demanda, se observa que quanto maior for o reservatório, menor será a falha no atendimento da demanda e maior será a probabilidade de amortecimento. Em razão de que reservatórios maiores atingem sua capacidade de armazenamento com menos

frequência que os menores, portanto possuem volumes disponíveis para amortecimento mais vezes ao longo do tempo.

Os métodos propõem a estimativa da probabilidade em que os volumes disponíveis para amortecimento estão presentes para diferentes demandas e volumes de reservatórios. Ou seja, é possível mensurar a eficiência do sistema de amortecimento de escoamento superficial através da probabilidade em que o reservatório consegue amortecer o evento crítico de chuva. Assim como, o método permite determinar a confiabilidade do sistema de aproveitamento de água da chuva através do índice de falha no atendimento a demanda.

REFERÊNCIAS

ALVES, W. C.; KIPERSTOK, A.; ZANELLA, L.; PHILLIPI, L. S.; SANTOS, M. F. L.; VALENTINA, R. S.; OLIVEIRA, L. V.; GONÇALVES, R. F. Tecnologias de conservação em sistemas prediais. In: GONÇALVES, R. F. (Coord.). **Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p. 220-294.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15527**: água da chuva – aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – requisitos. Rio de Janeiro, 2007.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia**: ciência e aplicação. 1. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS; ABRH, 1993. v. 4. p. 177-241.

BIDONE, F.; TUCCI, C. E. M. Microdrenagem. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R.; BARROS, M. (Org.). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS; ABRH, 1995. p. 77-105.

BRASIL. Congresso Nacional. **Lei n. 9.433**, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1. da Lei n. 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei n. 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em: 3 dez. 2012.

CHEVALLIER, P. Aquisição e Processamento de Dados. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia**: ciência e aplicação. 1. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS; ABRH, 1993. v. 4. p. 485-525.

COSTA, F. J. L. **Estratégias de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Brasil**: áreas de cooperação com o Banco Mundial. 1. ed. Brasília: Banco Mundial, 2003. Série Água Brasil 1.

DALTRO FILHO, J. **Saneamento Ambiental**: doença, saúde e o saneamento da água. São Cristóvão: Editora da UFS; Fundação Oviêdo Teixeira, 2004.

DORNELES, F. **Aproveitamento de Água de Chuva no Meio Urbano e seu Efeito na Drenagem Pluvial**. 2012. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2012.

FERNANDEZ, J. C.; GARRIDO, R. J. S. **Economia dos Recursos Hídricos**. Salvador: EDUFBA, 2002.

GROUP RAINDROPS. **Aproveitamento da água da chuva**. 1. ed. Brasil: Torre de Papel, 2002.

MANO, R. S. **Captação Residencial de Água de Chuva para Fins não Potáveis em Porto Alegre:** aspectos básicos da viabilidade e benefícios do sistema**.** 2004. 175 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

NETTO, J. M. A.; FERNANDEZ, M. F.; ARAUJO, R.; ITO, A. E. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

PIO, A. A. B.; DOMINGUES, A. F.; SARROUF, L.; PINA, R. S.; GUSMAN JÚNIOR, U. (Coord.). Conservação e Reúso da Água em Edificações. São Paulo: ANA; FIESP; SINDUSCON/SP, 2005.

PORTO, R. L. Escoamento Superficial Direto. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R.; BARROS, M. (Org.). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS; ABRH, 1995. p. 107-165.

PORTO ALEGRE. Departamento Municipal de Água e Esgoto. **Decreto n. 9369,** de 29 de dezembro de 1988. Regulamenta a Lei Complementar n. 107, de 31 de dezembro de 1987, alterada parcialmente pela Lei Complementar n. 180 de 18 de agosto de 1988, a qual estabelece normas para instalação hidrossanitárias e serviços públicos de abastecimento de água e esgoto sanitário prestados pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto. Porto Alegre, 1988. Disponível em: <http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dmae/usu_doc/cip9369-decreto.pdf >. Acesso em: 5 dez. 2012.

_____. Secretaria do Planejamento Municipal. **Lei Complementar n. 434**, de 27 de março de 1999. Dispõe sobre o desenvolvimento urbano no Município de Porto Alegre, institui o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental de Porto Alegre e dá outras providências. Porto Alegre, 1999. Disponível em: <http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/spm/usu_doc/planodiretortexto.pdf>. Acesso em: 10 maio 2013.

_____. Departamento de Esgotos Pluviais. **Plano diretor de drenagem urbana**: manual de drenagem urbana. Porto Alegre, 2005. v. 6. Disponível em: <http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/usu_doc/manual_de_drenagem_ultima_versao.pdf>. Acesso em: 3 dez. 2012.

_____. Prefeitura Municipal de Porto Alegre. **Decreto n. 16305,** de 26 de maio de 2009. Regulamenta a Lei n. 10506, de 5 de agosto de 2008, que institui o Programa de Conservação, Uso Racional e Reaproveitamento das Águas. Porto Alegre, 2009. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/cgi-bin/nph-brs?s1=000030452.DOCN.&l=20&u=/netahtml/sirel/simples.html&p=1&r=1&f=G&d=atos&SECT1=TEXT>. Acesso em: 5 dez. 2012.

SILVA, L. F. S. **Aproveitamento de águas pluviais:** ferramentas para tomadas de decisões em projetos**.** 2012. 123 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia**: ciência e aplicação. 1. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS; ABRH, 1993. v. 4. p. 35-51.

TUCCI, C. E. M. Escoamento Superficial. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia**: ciência e aplicação. 1. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS; ABRH, 1993a. v. 4. p. 391-437.

_____. Regularização de Vazões. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia**: ciência e aplicação. 1. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS; ABRH, 1993b. v. 4. p. 573-619.

_____. Inundações Urbanas. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R.; BARROS, M. (Org.). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS; ABRH, 1995. p. 15-36.

_____. Avaliação e controle dos impactos ambientais decorrentes da urbanização: apresentação do projeto. In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. (Org.). **Avaliação e controle da drenagem urbana**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS; ABRH, 2000. p. 13-21.

_____. **Gestão de águas pluviais urbanas**: saneamento para todos. Brasília: Ministério das Cidades, 2005. v. 4.

TUCCI, C. E. M.; GENZ, F. Controle do Impacto da Urbanização. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R.; BARROS, M. (Org.). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS; ABRH, 1995. p. 277-308.

UNITED NATIONS POPULATION FUND. **Relatório sobre a Situação da População Mundial 2011**. [S.l.]: 2011. Disponível em: <http://www.oi.acidi.gov.pt/docs/jpg/ONU%20Situcao%20da%20Populacao%20Mundia%202011.pdf>. Acesso em 3 dez. 2012.

ZAHED FILHO, K.; MARCELLINI, S. S. Precipitações Máximas. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R.; BARROS, M. (Org.). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS; ABRH, 1995. p. 37-76.

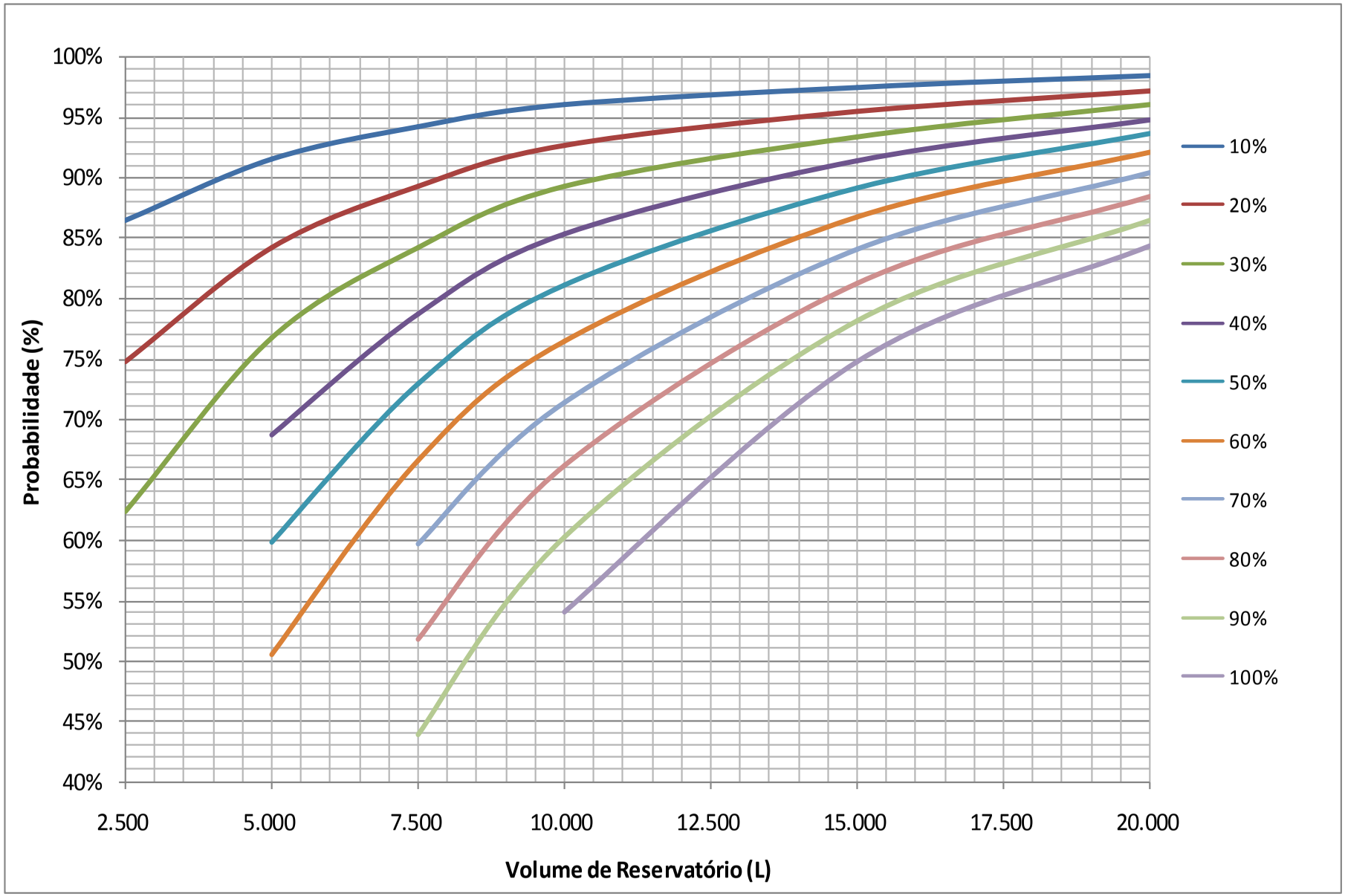
APÊNDICE A – TABELA VOLUME GERADO PELO HIDROGRAMA

(elaborado pelo autor)

Tempo (min)	Vazão (L/s)	Volume gerado (L)	Volume Acumulado(L)	Tempo (min)	Vazão (L/s)	Volume gerado (L)	Volume Acumulado(L)
1	0,00	0,00	0,00	61	1,27	86,23	8325,77
2	0,00	0,00	0,00	62	0,66	57,75	8383,52
3	0,00	0,00	0,00	63	0,25	27,10	8410,62
4	0,00	0,00	0,00	64	0,03	8,23	8418,85
5	0,00	0,00	0,00	65	0,00	0,84	8419,69
6	0,00	0,00	0,00	66	0,00	0,00	8419,69
7	0,00	0,00	0,00	67	0,00	0,00	8419,69
8	0,00	0,00	0,00	68	0,00	0,00	8419,69
9	0,00	0,00	0,00	69	0,00	0,00	8419,69
10	0,00	0,00	0,00	70	0,00	0,00	8419,69
11	0,00	0,00	0,00	71	0,00	0,00	8419,69
12	0,00	0,00	0,00	72	0,00	0,00	8419,69
13	0,00	0,00	0,00	73	0,00	0,00	8419,69
14	0,00	0,00	0,00	74	0,00	0,00	8419,69
15	0,00	0,00	0,00	75	0,00	0,00	8419,69
16	0,00	0,00	0,00	76	0,00	0,00	8419,69
17	0,00	0,00	0,00	77	0,00	0,00	8419,69
18	0,02	0,50	0,50	78	0,00	0,00	8419,69
19	0,08	2,94	3,43	79	0,00	0,00	8419,69
20	0,22	8,91	12,34	80	0,00	0,00	8419,69
21	0,40	18,41	30,76	81	0,00	0,00	8419,69
22	0,62	30,44	61,20	82	0,00	0,00	8419,69
23	0,89	45,19	106,39	83	0,00	0,00	8419,69
24	1,21	63,06	169,45	84	0,00	0,00	8419,69
25	1,60	84,51	253,97	85	0,00	0,00	8419,69
26	2,10	111,23	365,19	86	0,00	0,00	8419,69
27	2,76	145,94	511,14	87	0,00	0,00	8419,69
28	3,64	192,19	703,33	88	0,00	0,00	8419,69
29	4,90	256,23	959,56	89	0,00	0,00	8419,69
30	6,74	348,95	1308,51	90	0,00	0,00	8419,69
31	8,52	457,72	1766,23	91	0,00	0,00	8419,69
32	9,17	530,82	2297,05	92	0,00	0,00	8419,69
33	8,73	537,21	2834,25	93	0,00	0,00	8419,69
34	7,75	494,44	3328,69	94	0,00	0,00	8419,69
35	6,77	435,41	3764,11	95	0,00	0,00	8419,69
36	5,96	381,95	4146,06	96	0,00	0,00	8419,69
37	5,33	338,87	4484,93	97	0,00	0,00	8419,69
38	4,82	304,59	4789,51	98	0,00	0,00	8419,69
39	4,40	276,53	5066,05	99	0,00	0,00	8419,69
40	4,04	253,22	5319,27	100	0,00	0,00	8419,69
41	3,75	233,82	5553,09	101	0,00	0,00	8419,69
42	3,49	217,09	5770,17	102	0,00	0,00	8419,69
43	3,25	202,23	5972,40	103	0,00	0,00	8419,69
44	3,05	189,25	6161,66	104	0,00	0,00	8419,69
45	2,89	178,41	6340,06	105	0,00	0,00	8419,69
46	2,74	169,00	6509,07	106	0,00	0,00	8419,69
47	2,58	159,69	6668,76	107	0,00	0,00	8419,69
48	2,45	151,11	6819,87	108	0,00	0,00	8419,69
49	2,35	144,13	6964,00	109	0,00	0,00	8419,69
50	2,26	138,39	7102,39	110	0,00	0,00	8419,69
51	2,18	133,34	7235,73	111	0,00	0,00	8419,69
52	2,10	128,39	7364,12	112	0,00	0,00	8419,69
53	2,02	123,43	7487,55	113	0,00	0,00	8419,69
54	1,93	118,47	7606,01	114	0,00	0,00	8419,69
55	1,87	114,01	7720,02	115	0,00	0,00	8419,69
56	1,82	110,49	7830,51	116	0,00	0,00	8419,69
57	1,75	107,13	7937,64	117	0,00	0,00	8419,69
58	1,70	103,66	8041,30	118	0,00	0,00	8419,69
59	1,65	100,53	8141,83	119	0,00	0,00	8419,69
60	1,61	97,71	8239,54	120	0,00	0,00	8419,69

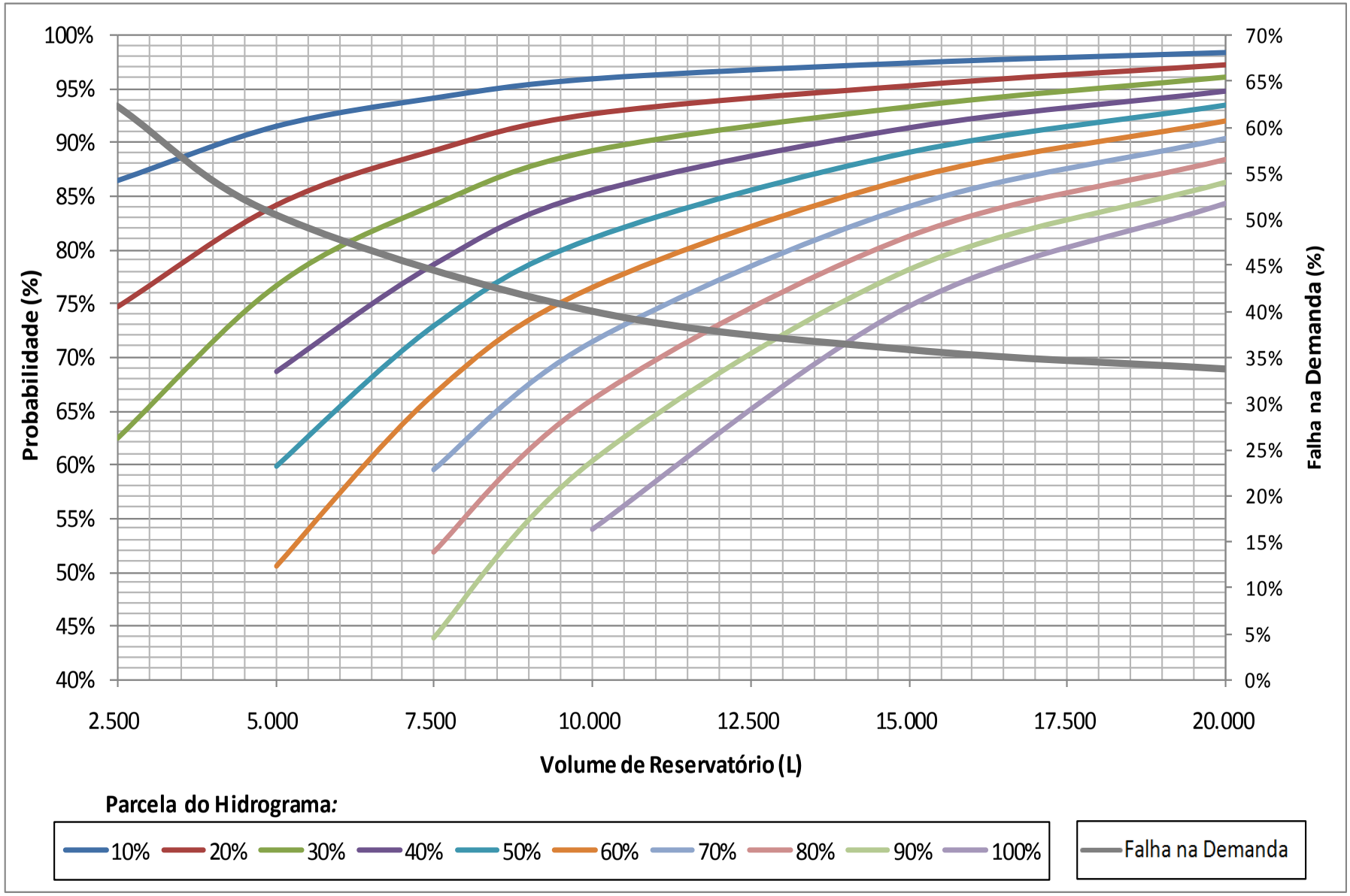
APÊNDICE B – GRÁFICO PROBABILIDADE DE AMORTECIMENTO PARA DEMANDA DE 852,8 LITROS/DIA

(elaborado pelo autor)


100%
95%
90%
85%
80%
75%
70%
65%
60%
55%
50%
45%
40%
Probabilidade (%)
2.500
5.000
7.500
10.000
12.500
15.000
17.500
20.000
Volume de Reservatório (L)
10%
20%
30%
40%
50%
60%
70%
80%
90%
100%

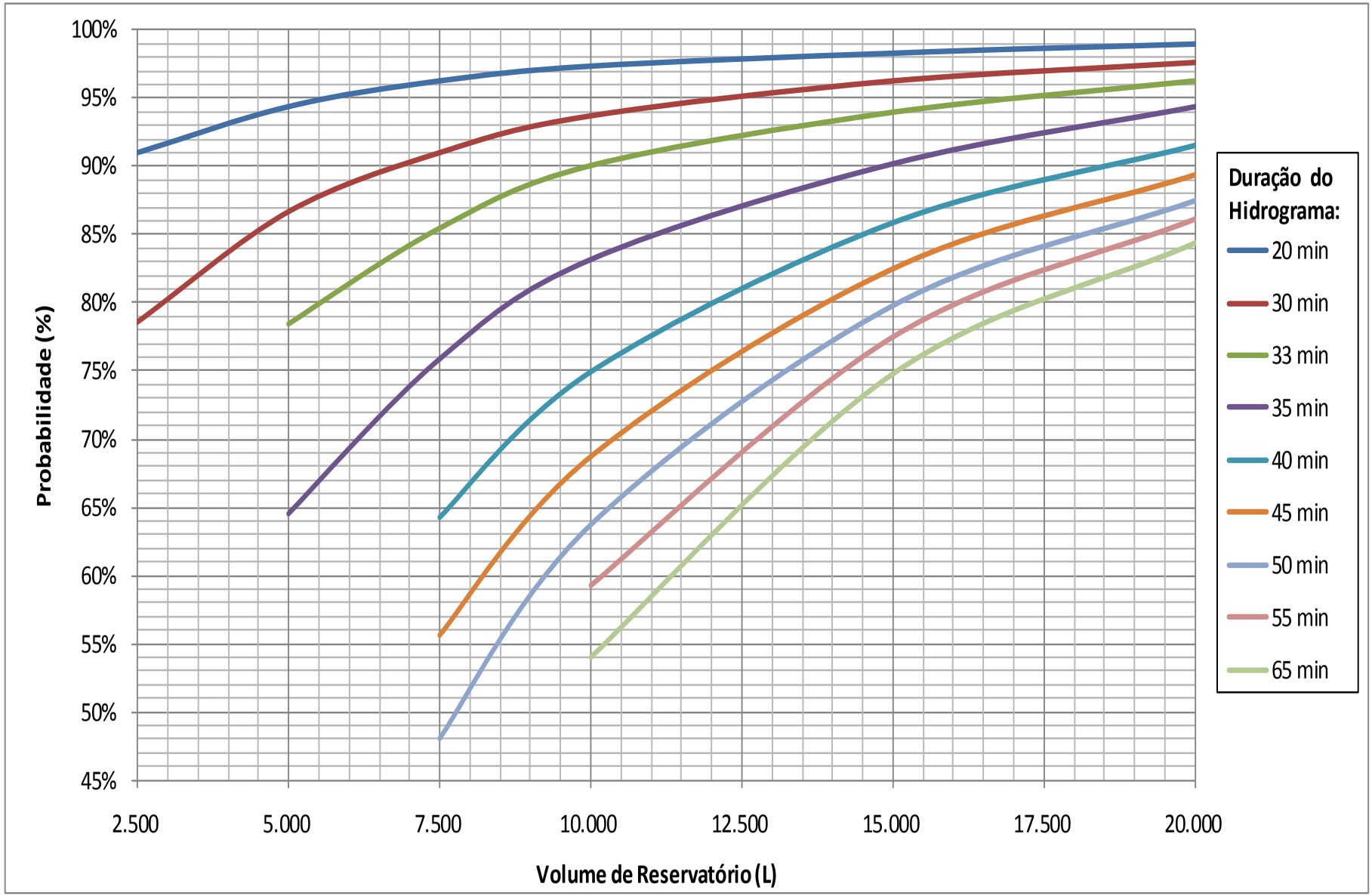
APÊNDICE C – GRÁFICO PROBABILIDADE DE AMORTECIMENTO PARA DEMANDA DE 852,8 LITROS/DIA COM FALHA DE ATENDIMENTO

(elaborado pelo autor)


100%
95%
90%
85%
80%
75%
70%
65%
60%
55%
50%
45%
40%
Probabilidade (%)
70%
65%
60%
55%
50%
45%
40%
35%
30%
25%
20%
15%
10%
5%
0%
Falha na Demanda (%)
2.500
5.000
7.500
10.000
12.500
15.000
17.500
20.000
Volume de Reservatório (L)
Parcela do Hidrograma:
10%
20%
30%
40%
50%
60%
70%
80%
90%
100%
Falha na Demanda

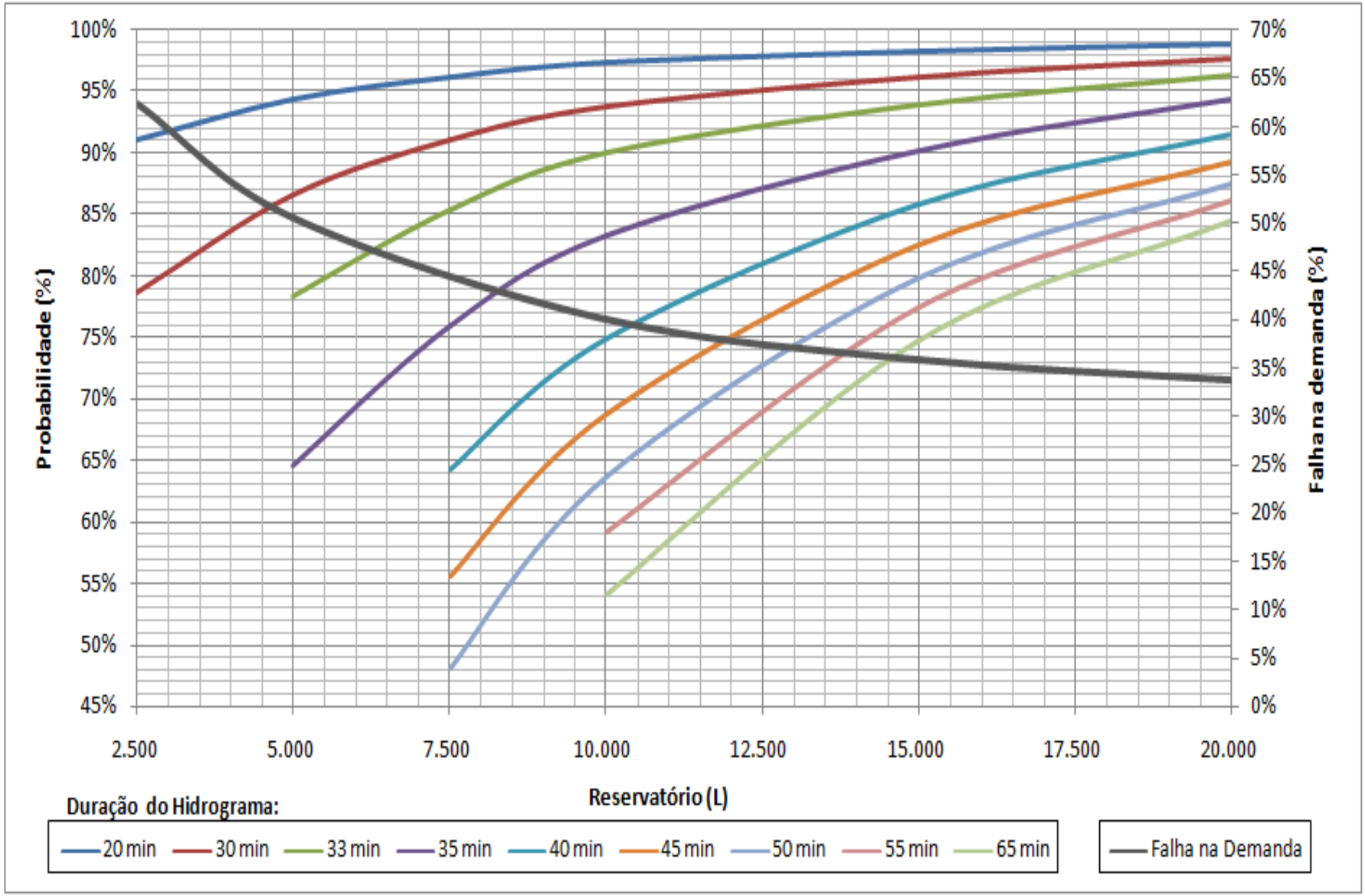
APÊNDICE D – GRÁFICO PROBABILIDADE DO TEMPO SUPORTADO PARA DEMANDA DE 852,8 LITROS/DIA

(elaborado pelo autor)


100%
95%
90%
85%
80%
75%
70%
65%
60%
55%
50%
45%
Probabilidade (%)
2.500
5.000
7.500
10.000
12.500
15.000
17.500
20.000
Volume de Reservatório (L)
Duração do Hidrograma:
20 min
30 min
33 min
35 min
40 min
45 min
50 min
55 min
65 min

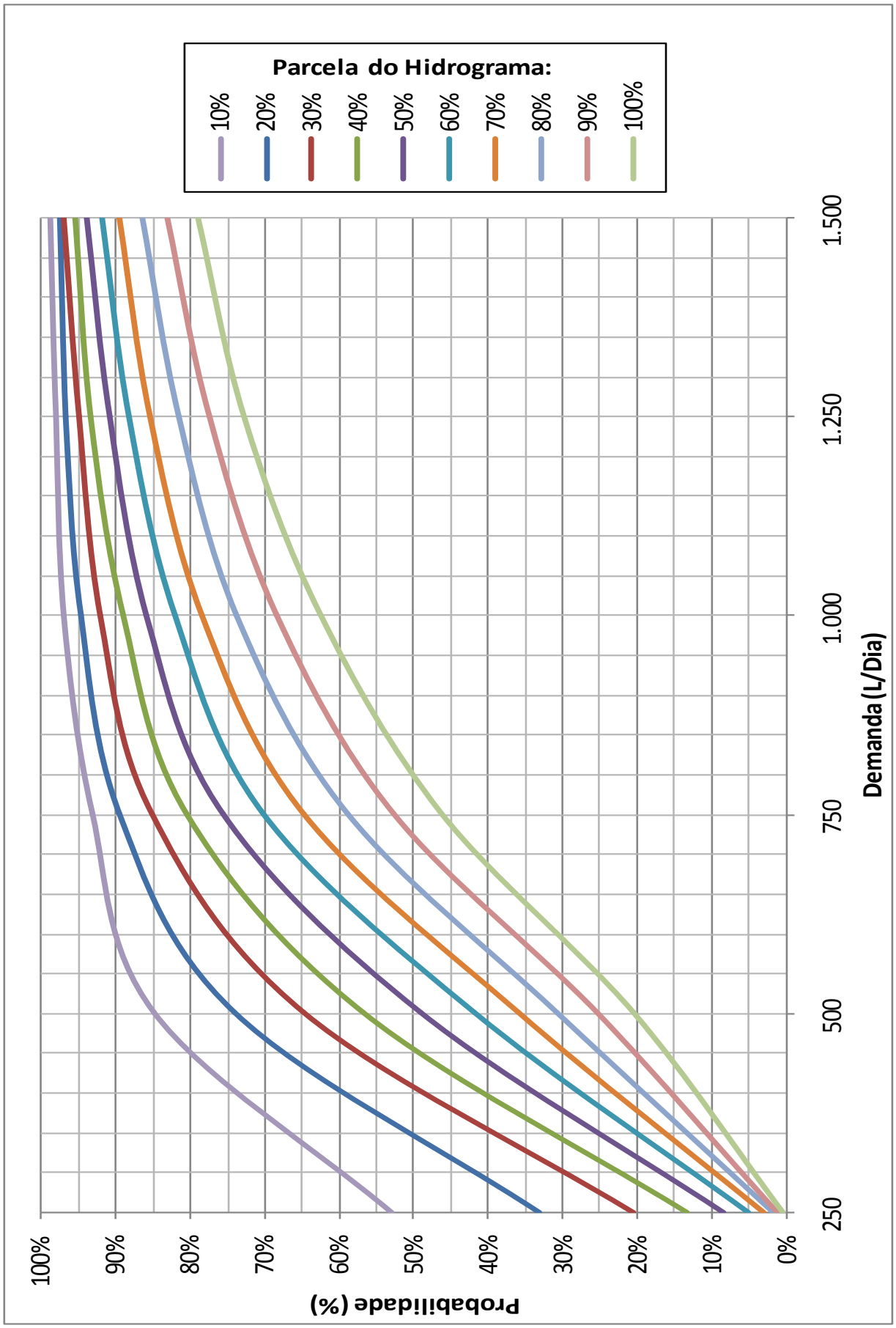
APÊNDICE E – GRÁFICO PROBABILIDADE DO TEMPO SUPORTADO PARA DEMANDA DE 852,8 LITROS/DIA COM FALHA DE ATENDIMENTO

(elaborado pelo autor)


100%
95%
90%
85%
80%
75%
70%
65%
60%
55%
50%
45%
Probabilidade (%)
70%
65%
60%
55%
50%
45%
40%
35%
30%
25%
20%
15%
10%
5%
0%
Falha na demanda (%)
2.500
5.000
7.500
10.000
12.500
15.000
17.500
20.000
Reservatório (L)
Duração do Hidrograma:
20 min
30 min
33 min
35 min
40 min
45 min
50 min
55 min
65 min
Falha na Demanda

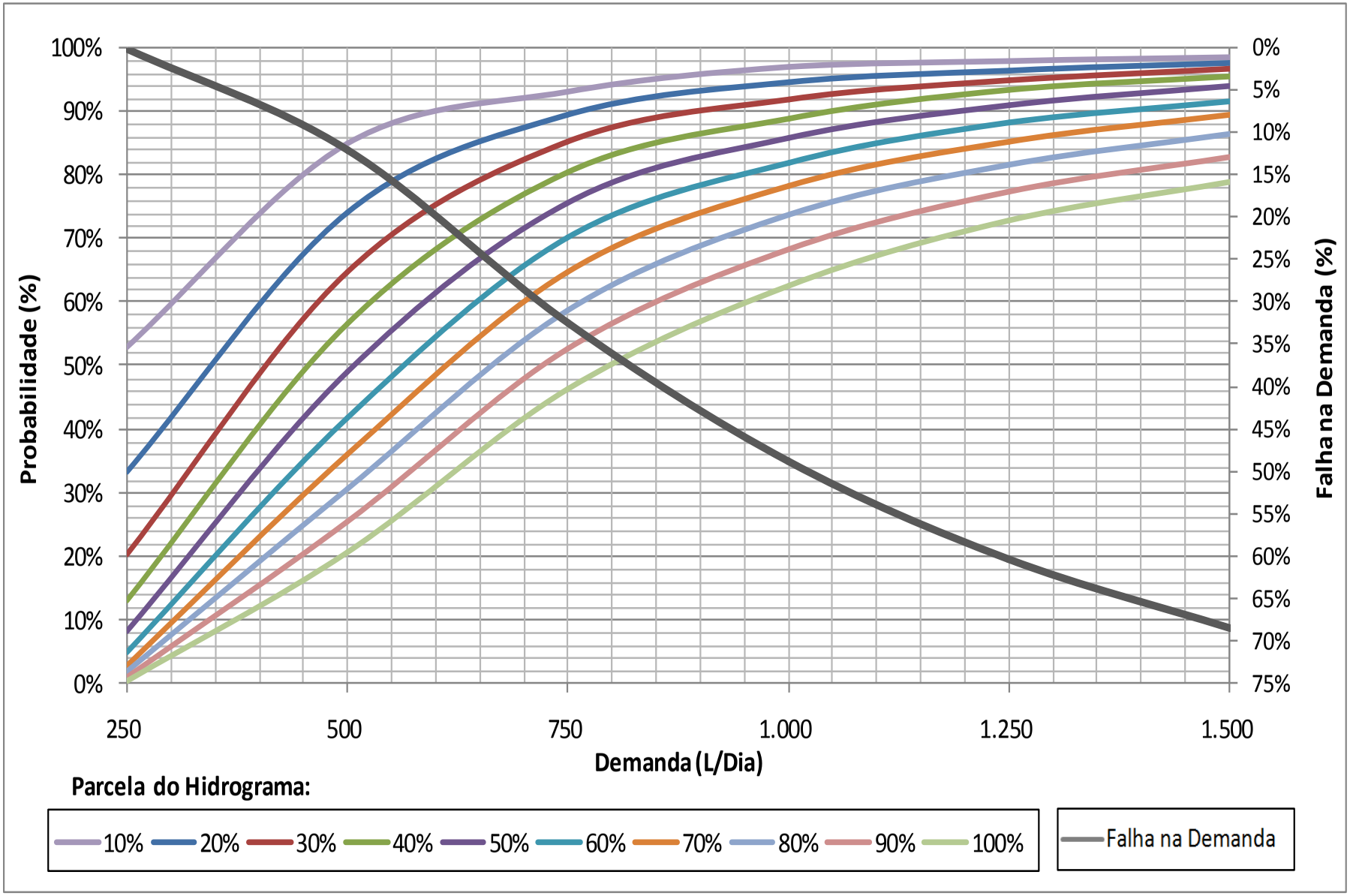
APÊNDICE F – GRÁFICO PROBABILIDADE DE AMORTECIMENTO PARA RESERVATÓRIO DE 10.000 LITROS

(elaborado pelo autor)

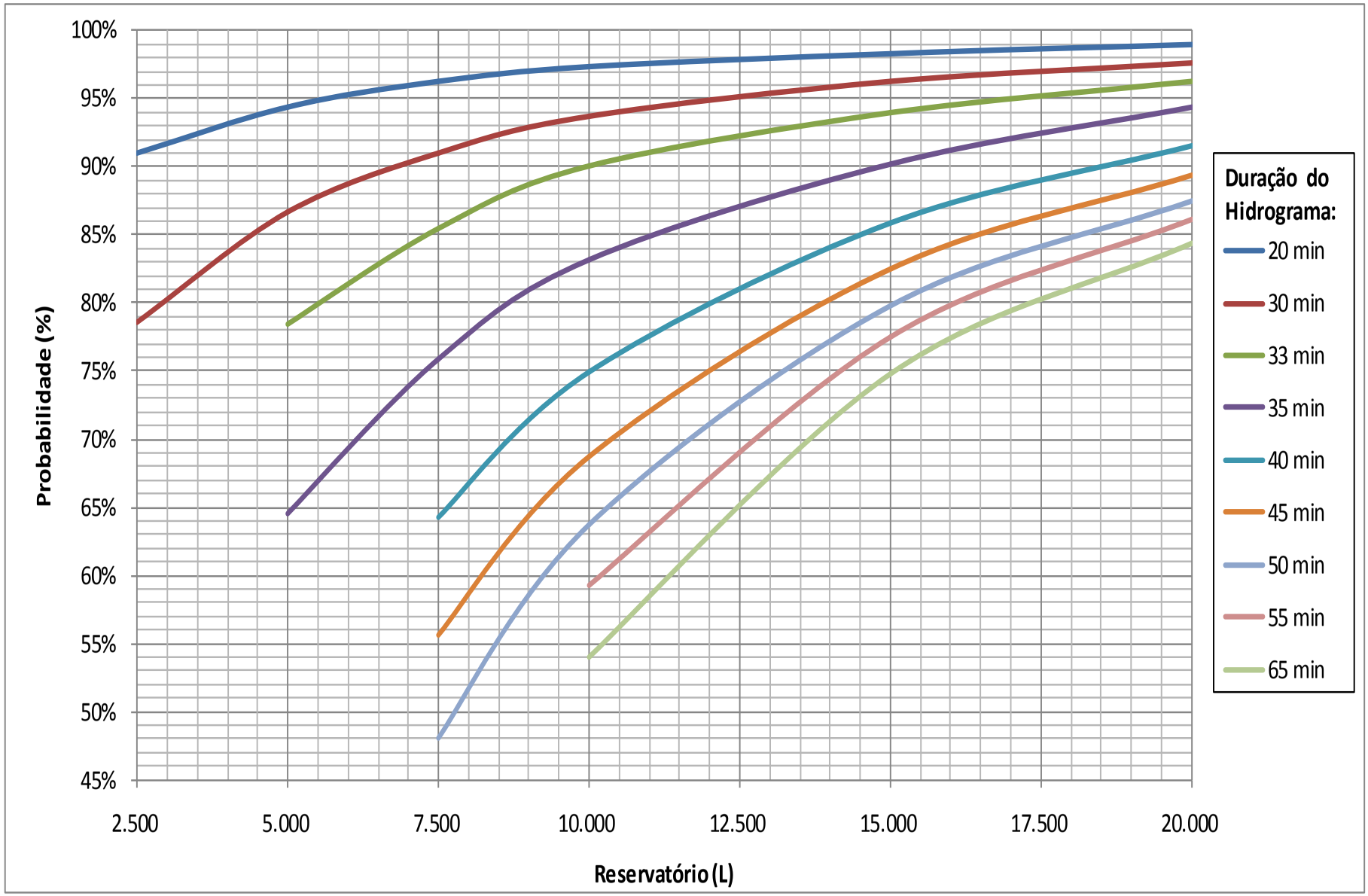

Parcela do Hidrograma:
10%
20%
30%
40%
50%
60%
70%
80%
90%
100%
Probabilidade (%)
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
250
500
750
1.000
1.250
1.500
Demanda (L/Dia)

APÊNDICE G – GRÁFICO PROBABILIDADE DE AMORTECIMENTO PARA RESERVATÓRIO DE 10.000 LITROS COM FALHA DE ATENDIMENTO

(elaborado pelo autor)

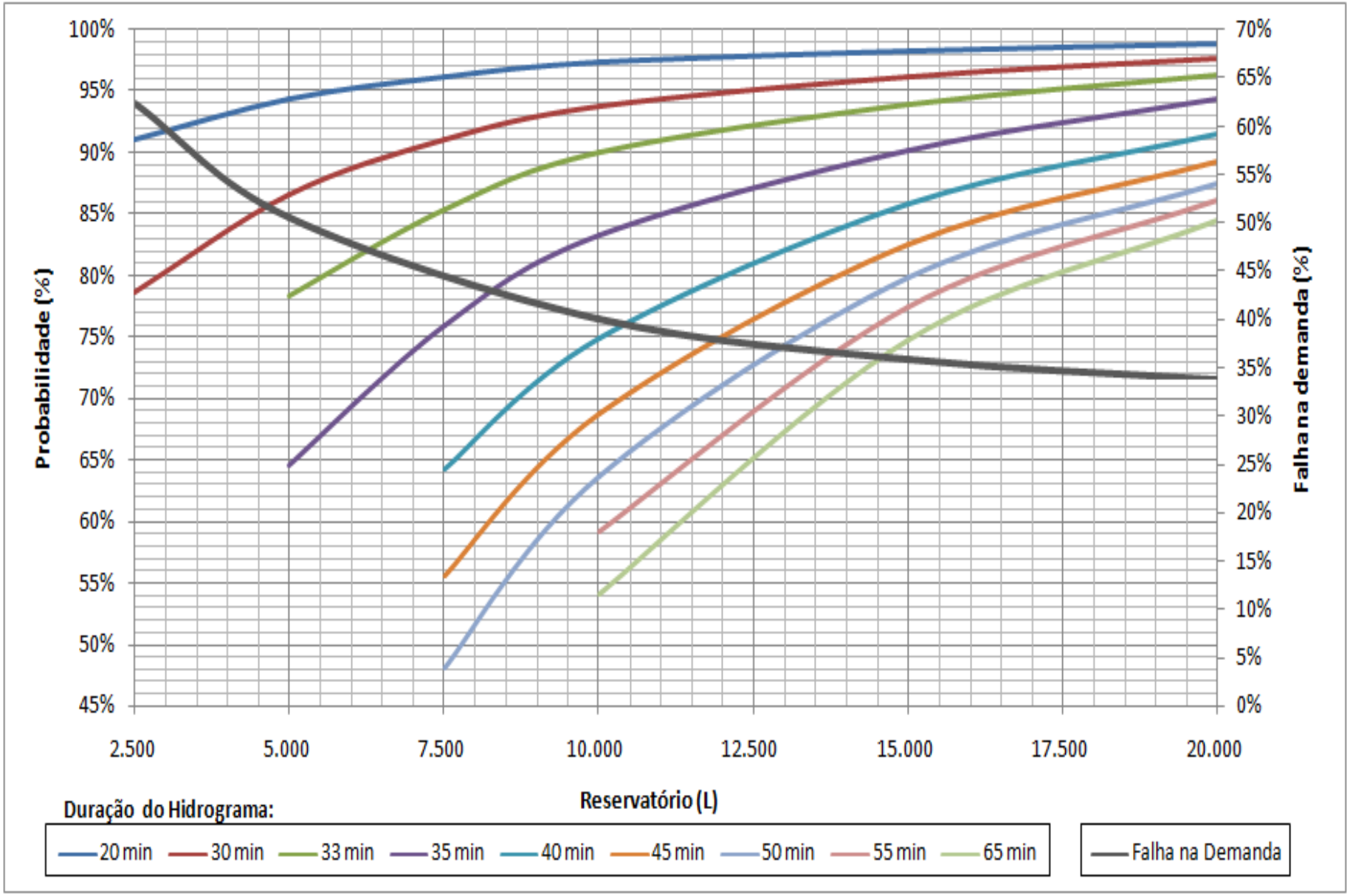

100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
Probabilidade (%)
0%
5%
10%
15%
20%
25%
30%
35%
40%
45%
50%
55%
60%
65%
70%
75%
Falha na Demanda (%)
250
500
750
1.000
1.250
1.500
Demanda (L/Dia)
Parcela do Hidrograma:
10%
20%
30%
40%
50%
60%
70%
80%
90%
100%
Falha na Demanda

APÊNDICE H – GRÁFICO PROBABILIDADE DO TEMPO SUPORTADO PARA RESERVATÓRIO DE 10.000 LITROS (elaborado pelo autor)


100%
95%
90%
85%
80%
75%
70%
65%
60%
55%
50%
45%
Probabilidade (%)
2.500
5.000
7.500
10.000
12.500
15.000
17.500
20.000
Reservatório (L)
Duração do Hidrograma:
20 min
30 min
33 min
35 min
40 min
45 min
50 min
55 min
65 min

APÊNDICE I – GRÁFICO PROBABILIDADE DO TEMPO SUPORTADO PARA RESERVATÓRIO DE 10.000 LITROS COM FALHA DA DEMANDA

(elaborado pelo autor)


100%
95%
90%
85%
80%
75%
70%
65%
60%
55%
50%
45%
Probabilidade (%)
70%
65%
60%
55%
50%
45%
40%
35%
30%
25%
20%
15%
10%
5%
0%
Falha na demanda (%)
2.500
5.000
7.500
10.000
12.500
15.000
17.500
20.000
Reservatório (L)
Duração do Hidrograma:
20 min
30 min
33 min
35 min
40 min
45 min
50 min
55 min
65 min
Falha na Demanda