

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
EM ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE

MAÍRA DE CARVALHO

**Calibração de modelos de drenagem urbana utilizando algoritmos
evolucionários multiobjetivo**

GOIÂNIA
2011

MAÍRA DE CARVALHO

**Calibração de modelos de drenagem urbana utilizando algoritmos
evolucionários multiobjetivo**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

Área de concentração: Recursos hídricos e Saneamento ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga

GOIÂNIA
2011

MAÍRA DE CARVALHO

**Calibração de modelos de drenagem urbana utilizando algoritmos
evolucionários multiobjetivos acoplados ao SWMM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

Dissertação defendida e aprovada em 29 de setembro de 2011, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga
Presidente da Banca - UFG

Prof. Dr. Alexandre Kepler Soares
Examinador interno - UFG

Prof. Dra. Jussanã Milograna
Examinador externo - IFG

Aos meus pais, Nilva Aparecida de Jesus Carvalho e Vicente Francino de Carvalho, pela semente do amor e da perseverança que sempre demonstraram, e que esteve sempre presente na minha caminhada de vida e de estudos.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo seu Amor, pela oportunidade que nos foi dada em compartilhar experiências, por me proporcionar saúde, sabedoria e perseverança para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga, pelo apoio, incentivo e presteza no auxílio às leituras sobre o andamento e normatização desta Dissertação de Mestrado.

Aos Professores e às Professoras do Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente pela constante dedicação e disposição.

Aos colegas de trabalho e do programa de mestrado que sempre me acompanharam nessa importante jornada, auxiliando, apoiando e sempre acreditando no potencial do trabalho.

Aos meus familiares, pelo apoio e incentivo incondicional dedicados durante todo o meu percurso acadêmico, principalmente nos momentos de maior dificuldade.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis”.

José de Alencar

RESUMO

CARVALHO, M. **Calibração de modelos de drenagem urbana utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

O presente trabalho propôs desenvolver e aplicar uma rotina de calibração de modelos hidrológicos aplicados a drenagem urbana empregando técnicas de otimização multiobjetivo. Para tornar possível a realização deste trabalho foi adotado o modelo Storm Water Management Model (SWMM) e as rotinas computacionais desenvolvidas em ambiente MATLAB, utilizando um algoritmo evolucionário. O método foi aplicado a dois diferentes níveis de detalhamento na representação da bacia do Arroio Cancela, localizada na zona urbana do município de Santa Maria-RS, na busca de valores ótimos de parâmetros hidrológicos da bacia. Foram definidas funções objetivo e aplicadas simultaneamente na calibração de parâmetros. Trabalhou-se com a simulação de eventos de baixa e alta intensidade para duas configurações de bacia hidrográfica, sendo simples e outra subdividida em 18 sub-bacias. A análise de sensibilidade realizada possibilitou a verificação de que os parâmetros que mais influenciaram na bacia simples foram: Porcentagem de área impermeável e Largura do escoamento. Em relação aos resultados para as diferentes configurações de discretização da bacia hidrográfica pode-se verificar que na maioria dos casos quando se trabalhou com uma bacia mais detalhada estes foram melhores, salvo alguns eventos isolados. No geral o modelo apresentou melhores resultados quando simulou eventos de alta intensidade para as soluções de melhor compromisso, assim mostrando a importância da utilização de um modelo multiobjetivo.

Palavras chave: modelos hidrológicos, otimização multiobjetivo, algoritmos evolucionários, drenagem urbana.

ABSTRACT

CARVALHO, M. **Calibration models of urban drainage using multiobjective evolutionary algorithms**. 2011. Dissertation (Masters of Environmental Engineering) - Civil Engineering College, Post-Graduation *Stricto Sensu* Program in Environmental Engineering - Federal University of Goiás, Goiânia, Goiás, Brazil, 2011..

This study proposed to develop and implement a calibration routine hydrological models applied to urban drainage using multiobjective optimization techniques. To make this work possible model was adopted Storm Water Management Model (SWMM) and the computational algorithms developed in MATLAB environment using an evolutionary algorithm. The method was applied to two different levels of detail in representing the Arroyo Cancels basin, located in the urban area of Santa Maria-RS, submitted to the hydrological processes involved in the process of rainfall-runoff transformation in the search for optimal values of hydrological parameters the basin. Objective functions were defined and applied simultaneously in the calibration parameters. Worked with the simulation of events of low and high intensity settings for two discretization of the watershed, and other simple and subdivided into 18 sub-basins. The sensitivity analysis performed made it possible to check that the parameters that most influenced the basin were simple: Percentage of impervious area and outlet width. Regarding the results for the various watershed discretization can be seen that in most cases when working with a more detailed watershed they were better, except for some isolated events. Overall the model showed better results when high-intensity simulated events for the best compromise solutions, thus showing the importance of using a multiobjective model.

keywords: hydrological models, multiobjective optimization, evolutionary algorithms, urban drainage

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Etapas do Algoritmo Genético.....	34
Figura 4.1	Evento 01 - 07/05/2004.....	41
Figura 4.2	Evento 02 - 10/06/2004.....	42
Figura 4.3	Evento 03 - 09/11/2004.....	42
Figura 4.4	Evento 04 - 10/09/2004.....	43
Figura 4.5	Evento 05 - 22/09/2004.....	43
Figura 4.6	Evento 06 - 12/10/2004.....	44
Figura 4.7	Ordenação no método NSGA-II.....	46
Figura 4.8	Esquema da definição de distância de multidão.....	47
Figura 4.9	Esquema do método NSGA-II.....	48
Figura 4.10	Bacia do Arroio Cancela.....	50
Figura 4.11	Discretização das subacias.....	51
Figura 5.1	Escoamento superficial para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 01 – Bacia Simples.....	55
Figura 5.2	Escoamento superficial para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 02 – Bacia Simples.....	57
Figura 5.3	Escoamento superficial para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 03 – Bacia Simples.....	59
Figura 5.4	Escoamento superficial para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 04 – Bacia Simples.....	61
Figura 5.5	Escoamento superficial para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 05 – Bacia Simples.....	63
Figura 5.6	Escoamento superficial para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 06 – Bacia Simples.....	65
Figura 5.7	Escoamento superficial resultante do evento 01 para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Simples.....	69

Figura 5.8	Escoamento superficial resultante do evento 02 para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Simples.....	70
Figura 5.9	Escoamento superficial resultante do evento 04 para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Simples.....	71
Figura 5.10	Escoamento superficial resultante do evento 05 para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Simples.....	72
Figura 5.11	Escoamento superficial resultante do evento 03 para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Simples.....	73
Figura 5.12	Escoamento superficial resultante do evento 06 para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Simples.....	74
Figura 5.13	Escoamento superficial para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 01 – Bacia Subdividida....	76
Figura 5.14	Escoamento superficial para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 02 – Bacia Subdividida....	78
Figura 5.15	Escoamento superficial para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 03 – Bacia Subdividida....	80
Figura 5.16	Escoamento superficial para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 04 – Bacia Subdividida....	82
Figura 5.17	Escoamento superficial para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 05 – Bacia Subdividida....	84
Figura 5.18	Escoamento superficial para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 06 – Bacia Subdividida....	86
Figura 5.19	Escoamento superficial resultante do evento 01 para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Subdividida.....	89

Figura 5.20	Escoamento superficial resultante do evento 02 para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Subdividida.....	90
Figura 5.21	Escoamento superficial resultante do evento 04 para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Subdividida.....	91
Figura 5.22	Escoamento superficial resultante do evento 05 para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Subdividida.....	92
Figura 5.23	Escoamento superficial resultante do evento 03 para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Subdividida.....	93
Figura 5.24	Escoamento superficial resultante do evento 06 para os parâmetros do modelo com as soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Subdividida.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Parâmetros das Sub-bacias.....	39
Tabela 4.2	Parâmetros dos Condutos.....	40
Tabela 4.3	Parâmetros dos nós.....	41
Tabela 5.1	Parâmetros e valores de funções objetivo das soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 01 – Bacia Simples.....	54
Tabela 5.2	Características dos parâmetros encontrados para o conjunto de 200 soluções finais para evento 01 – Bacia Simples.....	54
Tabela 5.3	Parâmetros e valores de funções objetivo das soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 02 – Bacia Simples.....	56
Tabela 5.4	Características dos parâmetros encontrados para o conjunto de 200 soluções finais para evento 02 – Bacia Simples.....	56
Tabela 5.5	Parâmetros e valores de funções objetivo das soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 03 – Bacia Simples.....	58
Tabela 5.6	Características dos parâmetros encontrados para o conjunto de 200 soluções finais para evento 03 – Bacia Simples.....	58
Tabela 5.7	Parâmetros e valores de funções objetivo das soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 04 – Bacia Simples.....	60
Tabela 5.8	Características dos parâmetros encontrados para o conjunto de 200 soluções finais para evento 04 – Bacia Simples.....	60
Tabela 5.9	Parâmetros e valores de funções objetivo das soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 05 – Bacia Simples.....	62
Tabela 5.10	Características dos parâmetros encontrados para o conjunto de 200 soluções finais para evento 05 – Bacia Simples.....	62
Tabela 5.11	Parâmetros e valores de funções objetivo das soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 06 – Bacia Simples.....	64
Tabela 5.12	Características dos parâmetros encontrados para o conjunto de 200 soluções finais para o evento 06 – Bacia Simples.....	64
Tabela 5.13	Variação das funções objetivo, quando alterado o valor dos parâmetros em 5% para análise de sensibilidade para o evento 01- Bacia Simples.....	66

Tabela 5.14	Variação das funções objetivo, quando alterado o valor dos parâmetros em 5% para análise de sensibilidade para o evento 06 – Bacia Simples.....	67
Tabela 5.15	Parâmetros e valores de funções objetivo das soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Simples.....	67
Tabela 5.16	Características dos parâmetros encontrados para o conjunto de 200 soluções finais para a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Simples.....	68
Tabela 5.17	Parâmetros e valores de funções objetivo das soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 01 – Bacia Subdividida.....	75
Tabela 5.18	Características dos parâmetros encontrados para o conjunto de 200 soluções finais para evento 01 – Bacia Subdividida.....	75
Tabela 5.19	Parâmetros e valores de funções objetivo das soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 02 – Bacia Subdividida.....	77
Tabela 5.20	Características dos parâmetros encontrados para o conjunto de 200 soluções finais para evento 02 – Bacia Subdividida.....	77
Tabela 5.21	Parâmetros e valores de funções objetivo das soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 03 – Bacia Subdividida.....	79
Tabela 5.22	Características dos parâmetros encontrados para o conjunto de 200 soluções finais para evento 03 – Bacia Subdividida.....	79
Tabela 5.23	Parâmetros e valores de funções objetivo das soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 04 – Bacia Subdividida.....	81
Tabela 5.24	Características dos parâmetros encontrados para o conjunto de 200 soluções finais para evento 04 – Bacia Subdividida.....	81
Tabela 5.25	Parâmetros e valores de funções objetivo das soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 05 – Bacia Subdividida.....	83
Tabela 5.26	Características dos parâmetros encontrados para o conjunto de 200 soluções finais para evento 05 – Bacia Subdividida.....	83
Tabela 5.27	Parâmetros e valores de funções objetivo das soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para o evento 06 – Bacia Subdividida.....	85
Tabela 5.28	Características dos parâmetros encontrados para o conjunto de 200 soluções finais para evento 06 – Bacia Subdividida.....	85
Tabela 5.29	Variação das funções objetivo, quando alterado o valor dos parâmetros em 5% para análise de sensibilidade para o evento 01 – Bacia Subdividida.....	87

Tabela 5.30	Variação das funções objetivo, quando alterado o valor dos parâmetros em 5% para análise de sensibilidade para o evento 06 – Bacia Subdividida.....	87
Tabela 5.31	Parâmetros e valores de funções objetivo das soluções com valores mais elevados para cada função objetivo e com o melhor compromisso para a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Subdividida.....	88
Tabela 5.32	Características dos parâmetros encontrados para o conjunto de 200 soluções finais para a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Subdividida.....	88
Tabela 5.33	Média dos parâmetros encontrados para cada conjunto de 200 soluções finais para cada evento e a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Simples.....	97
Tabela 5.34	Média dos parâmetros encontrados para cada conjunto de 200 soluções finais para cada evento e a combinação dos eventos 01, 02, 04 e 05 – Bacia Subdividida.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A: área
AE: Algoritmos Evolucionários
AG: Algoritmo Genético
AI: áreas impermeáveis
AINC: áreas permeáveis não conectadas
ASCE: *American Society of Civil Engineering*
At: área total de contribuição
CN: *Curve Number*
COE: coeficiente de eficiência de Nash e Stuclyffe
DA: distância de aglomeração
DI: capacidade de armazenamento em depressões (Superfícies impermeáveis)
DP: capacidade de armazenamento em depressões (Superfícies permeáveis)
EE: Estratégias de Evolução
EPA: *Environmental Protection Agency* dos Estados Unidos da América
FO: Função Objetivo
 $H_{inicial}$: altura inicial de escoamento
 $H_{máx}$: altura Máxima
 H_{off} : offset de saída
kc: coeficiente de compacidade
L: comprimento
Le: largura do retângulo equivalente
MOGA: *Multi-Objective Genetic Algorithm*
MOUSE: *Modelling of Urban Sewer*
MUSIC: *Model for Urban Stormwater Improvement Conceptualisation*
 μ : coeficiente de Manning
 $N_{cn}/N_{g,s}$: rugosidade
NI: coeficiente de rugosidade de Manning (Superfícies impermeáveis)
NP: coeficiente de rugosidade de Manning (Superfícies permeáveis)
NPGA: *Niched Pareto Genect Algorithm*
NSGA: *Non Dominated Sorting Genetic Algorithm*
OG: Otimização Global
P: perímetro da bacia hidrográfica ou sub-bacias (m)
PAES: *Pareto Archived*
PE: Programação Evolucionária
PESA: *Pareto Envelop*
PESA II: *Based Selection Algorithm*

PG: Programação Genética
PL: Programação Linear
PNL: Programação Não – Linear
PURRS: *Probabilistic Urban Rainwater and Wastewater Reuse Simulator*
q: vazão específica da bacia hidrográfica
Q_b: vazão de Base
Q_{calc}: vazão calculada
Q_{obs}: vazão no enxutório (m³/s)
S: declividade
S_c: declividade
SCE: *Shuffled Complex Evolution*
SCs: Sistemas Classificatórios
SCS: *Soil Conservation Service*
SIG: Sistemas de Informações Geográficas
SLAMM: *Source Loading and Management Model*
SPEA: *Strength Pareto Evolutionary Algorithm*
SWMM: *Storm Water Management Model*
UVQ: *Urban Volume and Quality*
Vol_{cal}: volume calculado
Vol_{obs}: volume observado
W: largura
WBM: *Water Balance Model*
Z: cota de fundo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. OBJETIVOS	24
2.1 OBJETIVO GERAL.....	24
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1 MODELOS HIDROLÓGICOS.....	25
3.1.1 <i>Storm Water Management Model</i> (SWMM).....	27
3.2 OTIMIZAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS	30
3.2.1 Programação Linear (PL)	30
3.2.2 Programação Não-Linear (PNL)	31
3.2.3 Algoritmos Evolucionários.....	32
3.3 OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO.....	36
4. METODOLOGIA.....	39
4.1 <i>Storm Water Management Model</i> - SWMM	39
4.1.1 Sub-bacias.....	39
4.1.2 Condutos	40
4.1.3 Nós.....	41
4.1.4 Dados Hidrológicos	41
4.2 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO	44
4.2.1 NSGA-II (<i>Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm</i>).....	45
4.2.2 Funções Objetivo	49
4.3 ÁREA DE ESTUDO	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1 BACIA SIMPLES	53
5.1.1 Evento 01	54
5.1.2 Evento 02	56
5.1.3 Evento 03	58
5.1.4 Evento 04	60
5.1.5 Evento 05	62
5.1.6 Evento 06	64
5.1.7 Análise de sensibilidade	66

5.1.8 Eventos compostos	67
5.2 BACIA SUBDIVIDIDA	75
5.2.1 Evento 01	75
5.2.2 Evento 02	77
5.2.3 Evento 03	79
5.2.4 Evento 04	81
5.2.5 Evento 05	83
5.2.6 Evento 06	85
5.2.7 Análise de sensibilidade	87
5.2.8 Eventos compostos	88
5.3 COMPARAÇÃO DE CENÁRIOS.....	95
5.3.1 Evento 01	95
5.3.2 Evento 02	95
5.3.3 Evento 03	95
5.3.4 Evento 04	96
5.3.5 Evento 05	96
5.3.6 Evento 06	96
5.3.7 Eventos compostos	96
5.4 COMPARAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS DOS PARÂMETROS	97
6. CONCLUSÃO.....	99
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	100
ANEXO I – Código de Otimização	107

1. INTRODUÇÃO

A maior parte das regiões metropolitanas no mundo é caracterizada pelo contínuo aumento das áreas impermeáveis. Tal ação acarreta no acréscimo do volume escoado, e conseqüentemente, das vazões máximas no sistema de drenagem, o que pode causar sérios prejuízos ao meio. Para evitar um aumento da degradação destes meios, têm-se buscado formas de reduzir o volume escoado e os picos de vazões de cheias. Para a implementação destas medidas é necessário, primeiramente, avaliar o efeito das possíveis modificações a serem feitas, e conseqüentemente as soluções mais eficientes para cada situação. As formas comumente empregadas para se fazer esta análise é por meio do uso de modelos matemáticos para as bacias urbanas (LIONG e YBRAHIM, 1995).

Nos últimos anos os modelos hidrológicos ganharam espaço por permitir a incorporação da variabilidade espacial das características das bacias hidrográficas e da precipitação. Porém, devido a essa capacidade, os modelos distribuídos tendem a ser matematicamente complexos e requerem inúmeros parâmetros, que devem ser medidos ou estimados, aumentando os esforços computacionais e de modelagem de uma forma geral. Portanto, é ideal que haja um equilíbrio entre o nível de detalhamento das bacias hidrográficas e os esforços de modelagem, de forma que resultados satisfatórios possam ser obtidos.

A modelação destaca-se como uma ferramenta imprescindível no que tange às questões hídricas em geral, e principalmente na avaliação de cheias de projeto, pois possibilita uma ampla abordagem sobre os principais mecanismos e interações que se desenvolvem em uma área urbana. Através dos modelos matemáticos é possível compreender algumas propriedades dos sistemas, prever suas reações a estímulos, e estimar as capacidades de escoamento da rede de drenagem existente ou a ser projetada. Essas ferramentas também permitem antever os impactos decorrentes de inúmeros cenários hipotéticos, o que possibilita fundamentar as decisões de gestão de bacias tomadas por seus responsáveis legais (SILVA, 2007).

A solução numérica do fluxo da água nos sistemas de drenagem urbana é uma ferramenta indispensável no planejamento, projeto, operação e manutenção destes sistemas. Nos últimos anos, devido ao grande aumento da capacidade de processamento dos computadores, além do melhor refinamento dos modelos hidrológicos surgiram várias abordagens mais sofisticadas e complexas do problema, o que provocou um novo desafio aos modeladores, uma vez que estes novos modelos permitem configurações mais realísticas e,

com isso desde que devidamente calibrados, resultados mais confiáveis. Porém tais modelos exigem melhores qualidades e quantidades de informações quando se compara com métodos tradicionais (BARCO *et al.* 2008).

A criação de um modelo de drenagem urbana envolve as seguintes etapas: 1) identificação das características superficiais da bacia, principalmente em termos de áreas impermeabilizadas, inclinação do terreno e uso do solo; 2) determinação das coordenadas, dimensões e características de todas as tubulações e estruturas associadas. 3) definição dos parâmetros hidráulicos e hidrológico dos diversos componentes do modelo.

Nas duas primeiras etapas, normalmente se utilizam, atualmente, procedimentos baseados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (LIONG *et al.*, 1991). Devido à complexidade do sistema estudado, e em virtude das inevitáveis simplificações de modelos matemáticos que os descrevem, alguns parâmetros devem ser determinados experimentalmente através de observações de campo, enquanto que outros podem ser estimados com base nas características da bacia (RAUCH e HARREMOES, 1999).

A determinação destes parâmetros necessita de um procedimento de calibração, ou seja, um método eficiente de se determinar um conjunto de parâmetros que minimizem, ou maximizem, alguns critérios que expressam o grau de concordância entre os resultados do modelo simulado e os dados medidos em campo (GUPTA e SOROOSHIAN, 1985).

Do ponto de vista prático, o principal objetivo da calibração é encontrar um único conjunto de parâmetros que represente o sistema. No entanto vários pesquisadores (KUCZERA E PARENT, 1998; SAVENIJE, 2001) têm salientado que este conjunto único é difícil de alcançar. Este ponto de vista contradiz diretamente a principal diretiva dos modelos de calibração. Beven (2001) preconiza o abandono destes modelos em favor de uma nova abordagem denominada de *equifinality*, é o princípio proposto por Bertalanffy (1968), segundo o qual um determinado estado de um sistema complexo pode ser encontrado por diferentes formas. Este método usa conceitos de máxima verossimilhança para avaliar a adequabilidade dos parâmetros do modelo, empregando um grande número de conjuntos de parâmetros para esta avaliação. Este método sofre, no entanto de grandes restrições práticas uma vez que requer quantidades de processamento muito elevadas (KHU e MADSEN, 2004).

Nos últimos anos, o processo de calibração a partir da abordagem de tentativa-e-erro, que consistia em se efetuar pequenas modificações nos parâmetros do modelo, um de cada vez, foi substituído pela calibração automática, mais adequada aos modelos hidrológicos de múltiplos parâmetros, que emprega técnicas de otimização para solucionar o problema (GUPTA, *et al.* 1998). Ao mesmo tempo em que houve esta mudança de filosofia na

calibração surgiu a necessidade de se encontrar medidas que melhor expressassem o grau de aptidão dos parâmetros do modelo em representar o sistema. Nas décadas de 1970 e 1980, uma série de trabalhos de investigações sobre os critérios adequados para o modelo de comparação foram publicados (JOHNSTON e PILGRIM, 1976; GUPTA e SOROOSHIAN, 1985). Esta necessidade é ainda mais ampliada quando a calibração é automática, pois a maior parte dos algoritmos de calibração automática exige uma definição unívoca do modelo de desempenho.

Os primeiros métodos de otimização empregados na calibração automática de modelos eram baseados em técnicas tradicionais que empregam derivadas (GUPTA e SOROOSHIAN, 1985). Estes métodos apresentam problemas em encontrar o ótimo global do sistema e são muito dependentes da estimativa inicial. Para se superar este problema, passou-se a empregar métodos mais robustos, como o algoritmo SCE - *Shuffled Complex Evolution* – (DUAN *et. al*, 1992; COLLISCHONN e TUCCI, 2003) e algoritmos genéticos (LIONG *et al.*, 1991; TAYFUR e MORAMARCO, 2008). Tais modelos mostraram-se eficientes na solução do problema de calibração, visto se tratar de técnicas de otimização global.

Uma das dificuldades encontradas no processo de calibração, de um modo geral, está em se calibrar parâmetros para representar diferentes cenários do sistema. Estes cenários são gerados pelos múltiplos eventos que podem ser observados, bem como pela distribuição de diferentes pontos de medição ao longo da bacia. Seibert e McDonnell (2002) mostram que nesta situação os modelos de otimização simples (de um objetivo) enfrentam dificuldades em encontrar um conjunto de parâmetros confiável para o problema. Uma das formas sugeridas para enfrentar esta dificuldade é o uso de modelos multiobjetivos, em que se podem empregar vários critérios de ajuste do modelo. Dentro do contexto multiobjetivo, várias funções objetivo podem ser consideradas simultaneamente no processo, de modo a se considerar os diferentes eventos avaliados sem, no entanto, se perder informações. Uma das dificuldades enfrentadas em lidar com estes métodos reside no fato de se ter várias soluções como resposta. Tal empecilho pode ser superado empregando-se técnicas específicas para definição do conjunto a ser escolhido (FORMIGA, 2005).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e aplicar uma rotina de calibração de modelos hidrológicos aplicados à drenagem urbana empregando técnicas de otimização multiobjetivo. Para tanto é utilizado um algoritmo evolucionário. O modelo hidrológico adotado foi o *Storm Water Management Model* (SWMM) e as rotinas computacionais desenvolvidas em ambiente MATLAB.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Acoplar o modelo SWMM à plataforma MATLAB;
- Definir as funções objetivo a serem trabalhadas;
- Avaliar a influência dos parâmetros dentro do modelo (quais os parâmetros que mais influenciam em cada função objetivo);
- Analisar o comportamento das funções objetivo dentro do algoritmo multiobjetivo;
- Avaliar a sensibilidade da função objetivo aos parâmetros do modelo;
- Avaliar o comportamento do modelo SWMM para diferentes configurações da discretização da bacia.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MODELOS HIDROLÓGICOS

Segundo Garcia e Paiva (2006), o crescimento planejado e sustentável das bacias hidrográficas urbanas torna cada vez mais necessário o estudo de ferramentas que possibilite um melhor entendimento e previsão dos processos ocorridos nas mesmas. O monitoramento de uma bacia hidrográfica pode fornecer indicações a respeito de mudanças desejáveis ou indesejáveis que estejam ocorrendo com os recursos hídricos como consequência de práticas de manejo (RENNÓ, 2003).

Os processos hidrológicos são geralmente bastante complexos, não lineares e possuem componentes aleatórios sobre a escala do tempo e do espaço. Steyaert (1993) afirmou que a possibilidade de expressar os processos físicos como um conjunto de equações matemáticas detalhadas pode não existir, ou as equações podem ser muito complexas, exigindo simplificações para seu uso. Assim muitos modelos procuram simplificar os processos que o envolvem.

Os modelos hidrológicos podem ser classificados de diversas formas devido a variabilidade da finalidade e metodologia utilizada. Quando considerado o tipo de variável, ele pode ser classificado como determinístico ou estocástico. São definidos como determinísticos os modelos que consideram o conceito de probabilidade, e quando uma ou mais variáveis utilizadas tiver comportamento aleatório, o modelo é estocástico (COLLODEL, 2009).

Tratando-se das relações existentes entre as variáveis envolvidas, os modelos hidrológicos podem ser conceituais ou empíricos. Os modelos conceituais baseiam-se em processos físicos, na tentativa de simular os processos que envolvem os fenômenos hidrológicos, enquanto que os modelos empíricos utilizam valores observados em suas simulações, por meio de relações empíricas estimadas, podendo variar muito de acordo com a região trabalhada (COLLODEL, 2009).

Em relação ao tempo pode-se classificar os modelos em discretos ou contínuos. Um modelo contínuo procura reproduzir o comportamento contínuo de um sistema ao longo do tempo de acordo com um conjunto de equações, geralmente, diferenciais, enquanto que em um sistema discreto a resposta é representada por uma sequência cronológica de eventos, e cada evento que ocorre num instante de tempo.

Cirilo (2003) classifica os modelos de propagação do escoamento em modelos de armazenamento e hidrodinâmicos. Os modelos de armazenamento consideram somente os efeitos do armazenamento na atenuação e deslocamento da onda de cheia, desprezando os efeitos de atrito levados em conta pela equação da quantidade do movimento. Os modelos que utilizam as equações de Saint Venant são chamados de hidrodinâmicos, e podem ser classificados em simplificados ou completos, de acordo com a consideração ou não dos termos da equação da quantidade do movimento.

Machado (2005) classifica os modelos em concentrados ou distribuídos. Os modelos concentrados são aqueles que não levam em consideração a variabilidade espacial das variáveis hidrológicas envolvidas no processo. Já os modelos distribuídos além de considerar como cada fenômeno ocorre ao longo do tempo, também consideram as variações espaciais.

Ainda segundo Tucci (1998), no gerenciamento dos recursos hídricos, pode-se classificar os modelos como: de comportamento, de otimização e de planejamento. Os modelos de comportamento descrevem o comportamento de um sistema, na tentativa de prognosticar a resposta do mesmo, quando estiver sujeito a diferentes entradas ou a modificações em suas características. Os modelos de otimização são utilizados para a obtenção de melhores soluções para objetivos específicos. E finalmente, os modelos de planejamento procuram soluções hidráulicas, hidrológicas e econômicas, considerando também aspectos sócio-econômicos e ambientais.

Verifica-se hoje a existência de uma grande quantidade de modelos hidrológicos disponíveis, isso ocorre porque cada modelo possui uma finalidade específica, diferentes formulações matemáticas e métodos empregados.

O uso de modelagem matemática para o dimensionamento de sistemas de drenagem urbana, de baixo impacto, é uma forma cada vez mais popular para reduzir os efeitos adversos, relacionados às águas pluviais sob os efeitos da urbanização. Elliot (2006) relacionou dez modelos de drenagem urbana, todos baseados em métodos convencionais de geração de escoamento e de encaminhamento, métodos convencionais de geração de contaminantes e tratamento. Os modelos relacionados foram: MOUSE (*Modelling of Urban Sewer*), MUSIC - *Model for Urban Stormwater Improvement Conceptualisation* (WONG, 2002), P8-UCM (PALMSTROM e WALKER, 1990), PURRS - *Probabilistic Urban Rainwater and Wastewater Reuse Simulator* (COOMBES, 2002), RUNQUAL (<http://wri.eas.cornell.edu/products/software/runqual>), SLAMM - *Source Loading and Management Model* (PITT, 1998), Storm Tac (LARM, 2000), SWMM - *Storm Water*

Management Model (ROSSMAN, 2004; HUBER e DICKINSON, 1988), UVQ - *Urban Volume and Quality* (MITCHELL *et al*, 2003) e *Water Balance Model* – WBM (<http://www.waterbalance.ca>).

Segundo Elliot (2006), os modelos MUSIC, P8, RUNQUAL, SLAMM e o WBM são aplicados com as mesmas finalidades sendo elas: desenvolvimento de regras de dimensionamento de dispositivos; planejamento do uso do solo nas bacias hidrográficas, inclusive centros urbanos; determinação da concepção preliminar de controles regionais; e projeto preliminar de uma sub-bacia ou local. Elliot (2006) afirma ainda que, os programas mais completos são o MOUSE e o SWMM que além das aplicações mencionadas anteriormente, também podem ser utilizados para pesquisa, projeto detalhado do sistema de drenagem regional, desenho detalhado, layout do local e seleção de materiais aplicáveis.

Meller (2004) e Garcia (2005) defendem que o MOUSE é um dos melhores aplicativos de modelagem para fins de drenagem urbana, quando se trata de simulação de variações espaciais de escoamento, profundidade de água, transporte de sedimentos e poluentes em rios e canais abertos. No entanto, não é um software gratuito nem aberto, diferente do SWMM.

O IPH-II é um modelo que merece destaque no cenário nacional, o mesmo foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS. Segundo Tucci (1998) o IPH-II é um modelo composto pelos seguintes algoritmos: perdas por evaporação e interceptação, separação de escoamentos e propagação de escoamentos superficiais e subterrâneos. Existem também as versões IPH-III e IV, que são utilizados para simulação em trechos e canais utilizando onda cinemática e hidrodinâmico, respectivamente.

A escolha do modelo SWMM para desenvolvimento do presente trabalho tem como influência, a acessibilidade do mesmo, pelo fato de ser de domínio público e ter seu código de programação aberto, permitindo modificações.

3.1.1 Storm Water Management Model (SWMM)

O modelo SWMM foi desenvolvido pela EPA (Environmental Protection Agency dos Estados Unidos da América) a sua primeira versão foi apresentada no final da década de 60, e é alvo de pesquisas até os dias de hoje. O modelo é composto por diversos módulos, possibilitando estudos de aspectos de hidrologia urbana e na determinação de ciclos de qualidade de água, incluindo precipitação, degelo, escoamento superficial, sub-superficial,

escoamento através de redes de drenagem, armazenamento e tratamento (Hubber e Dickinson, 1992).

Segundo Garcia (2005) foi o primeiro modelo computacional para análise quali-quantitativa associada ao escoamento gerado em áreas urbanas, sendo o aplicativo mais utilizado para simulação da drenagem urbana. Para Bastos (2007) o SWMM permite análise quali-quantitativa dos problemas relacionados à drenagem e à investigação de alternativas de controle do escoamento, fornecendo subsídios para estimativas de custo para estruturas de armazenamento e tratamento. As soluções adotadas podem ser avaliadas através de simulações que fornecem como resultados hidrogramas, polutogramas e cargas de poluentes.

Os módulos computacionais do SWMM são os responsáveis pelas rotinas de cálculo do aplicativo, podendo citar o processo de transformação chuva-vazão, propagação na rede, cargas de poluentes e simulação de estruturas de controle quali-quantitativo do escoamento, sendo auxiliados pelos módulos de serviço (MELLER, 2004). Os módulos de serviço possuem funções diversas, como os dados de precipitação (*Rain*) e temperatura (*Temp*), organização da ordem das simulações (*Executive*), apresentação de gráficos (*Graph*) e análise estatística (*Statistics*) dos resultados.

Segundo Collodel (2009), o SWMM é um modelo hidrológico dinâmico, que, a partir de dados de entrada, simula hidrogramas resultantes. Pode determinar a quantidade de escoamento gerado em cada sub-bacia, a vazão, a profundidade do fluxo, a qualidade da água em cada tubulação ou canal, durante o período de simulação, que compreende vários módulos de avaliação.

No módulo *Runoff*, a simulação quali-quantitativa do escoamento gerado em áreas urbanas e sua propagação na superfície são processadas com base em dados de precipitação, simulando a infiltração em áreas permeáveis (modelos de Horton ou Green Ampt), detenção na superfície, escoamento na superfície e em canais, podendo ser utilizado para simulações de eventos isolados ou contínuos.

A bacia hidrográfica de estudo pode ser representada na forma de um conjunto de sub-bacias e canais de propagação interconectados. Normalmente, cada sub-bacia é subdividida em três subáreas: impermeável com armazenamento, permeável com armazenamento e permeável sem armazenamento. Conforme Bastos (2007) o escoamento superficial é obtido através de um reservatório não-linear para cada sub-área representado pela combinação das equações de Manning e da continuidade, resolvidas pelo processo iterativo de Newton-Raphson. Segundo Garcia e Paiva (2006) a propagação do escoamento

pela rede de drenagem é calculada pelas equações completas de Saint Venant, por meio de um esquema explícito, segundo o método de Euler modificado.

Destacam-se alguns estudos de caso, nos quais o *Storm Water Management Model* (SWMM) foi aplicado.

Garcia (2005) aplicou o modelo SWMM na bacia hidrográfica do Arroio Cancela, na cidade de Santa Maria-RS, área de drenagem de 4,95 km², com aproximadamente 35% de área impermeável. O foco do trabalho foi a calibração dos eventos de cheia e o entendimento dos parâmetros envolvidos na simulação e a análise das mudanças ocorridas nos hidrogramas causados pelo processo de urbanização para os anos de 1980 e 2004. A bacia foi dividida em 18 sub-bacias e trabalhou com a calibração seis parâmetros de forma manual, por tentativa e erro (coeficiente de rugosidade de Manning e armazenamento em depressões para superfícies permeáveis e impermeáveis; e capacidades iniciais e finais de infiltração). Na avaliação do processo de urbanização a bacia apresentou crescimento de 17% da área urbana e 24% de áreas impermeabilizadas, entre 1980 e 2004, isso representou um aumento da vazão de pico e do volume escoado, neste período, de 109% e 89,8%, respectivamente. Com a discretização detalhada da bacia obteve-se um coeficiente de correlação médio de 0,95 para a vazão e erros médios, na vazão de pico e no volume escoado, de 2,9% e 17,1%, respectivamente. Já na discretização simplificada, desta bacia, obteve-se um coeficiente de correlação médio de 0,94 e erros médios de 6,3% e 17,3% para as respectivas variáveis. Também trabalhou com a simulação dos cenários futuros, de expansão urbana, para uma condição extrema um aumento na vazão de pico e do volume escoado de 60 e 59%, respectivamente, em relação ao cenário atual, apontando a necessidade do planejamento do uso e ocupação do solo em áreas urbanas.

Jang *et al* (2007) usou o SWMM como ferramenta de avaliação do impacto hidrológico devido aos efeitos da urbanização. Para tal avaliação, modelou-se para duas condições, pré e pós-desenvolvimento. Aplicou-se em três áreas (Seolmacheon, 8,51 km²; Weecheon, 33,63 km²; Pyungchang River, 55,93km²) de desenvolvimento planejado na Coreia do Sul. Trabalhou com vazão e tempo de pico, encontrou valores compatíveis com as vazões observadas, ajudando no desenvolvimento de simulações futuras para as áreas calibradas.

Barco *et al* (2008), adaptou e calibrou o *Storm Water Management Model* para uma bacia hidrográfica urbana no Sul da Califórnia, Ballona Creek. Utilizou-se o sistema de informação geográfica SIG para processar os dados de entrada e gerar a distribuição espacial da precipitação. Um procedimento de otimização usando o método complexo foi incorporada à estimativa dos parâmetros de escoamento, e foram utilizados dez eventos de precipitação

para a calibração e validação. O modelo calibrado previu os resultados observados com precisão razoável. A análise de sensibilidade mostrou o impacto dos parâmetros do modelo, e os resultados foram mais sensíveis à impermeabilidade e armazenamento impermeáveis em depressões e menos sensível a rugosidade de Manning para escoamento superficial.

3.2 OTIMIZAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS

A maioria dos modelos de otimização é baseada em algum tipo de programação matemática, sendo que uma classificação básica das técnicas de otimização é dada por (SANTOS, 2007):

- Programação Linear (PL);
- Programação Não-Linear (PNL) e
- Algoritmos Evolucionários.

A seguir serão expostas algumas vantagens e desvantagens dessas técnicas, com atenção maior aos Algoritmos Evolucionários, por serem apontados por muitos autores Simonovic, (1992), Santos, (2007), Labadie, (2004), Barbosa, (2002), Formiga, (2005), entre outros, como promissores na resolução de problemas hidráulicos em geral, além de ser a ferramenta de otimização considerada neste trabalho.

3.2.1 Programação Linear (PL)

Simonovic (1992), afirma que a PL é a técnica de otimização que mais se desenvolveu, além de ser considerada por alguns autores como um dos mais importantes avanços científicos da segunda metade do século XX.

O termo linear, como o próprio nome diz, refere-se à necessidade de haver relações lineares entre as variáveis, traduzidas pelas equações que caracterizam o problema. Mesmo quando as relações são não-lineares, a programação linear tem sido empregada com o auxílio de processos de linearização de funções ou através de um procedimento iterativo (SANTOS, 2007).

Labadie (2004) aponta as seguintes vantagens da PL: a habilidade para se ajustar e resolver problemas de grandes dimensões; atinge valores ótimos globais; teoria da dualidade bem desenvolvida para a análise de sensibilidade; a existência de pacotes computacionais prontos para resolução de problemas.

Barbosa (2002) menciona que a principal restrição da aplicação da PL é a exigência de linearidade das funções, o que não se verifica em muitos problemas hidráulicos em geral.

Formiga (2005) afirma que de um modo geral, os modelos baseados na PL foram relegados ao segundo plano no final dos anos de 1980 devido a alguns fatores:

- Dificuldades de retratar linearmente o problema não linear de modo completo, sendo que, para a utilização dessa ferramenta, é necessária a inclusão de diversas aproximações;
- Aparecimento de novos métodos de PNL que possibilitaram trabalhar com restrições como, por exemplo: Programação Quadrática Seqüencial, Gradiente Reduzido Generalizado 2;
- Aumento excessivo do número de variáveis de decisão, para problemas de maior porte;
- Aumento considerável da capacidade dos computadores desde o início de 1970, o que tornou possível a utilização de métodos mais complexos que demandam maior capacidade computacional, o que era impraticável anteriormente.

3.2.2 Programação Não-Linear (PNL)

A matemática envolvida nos modelos não lineares é muito mais complicada do que nos casos de programação linear (YEH, 1985). Porém, Simonovic (1992) relata que o desenvolvimento crescente dos recursos computacionais vem facilitando a aplicação da PNL.

A grande vantagem da PNL é a sua abrangência, oferecendo uma formulação matemática mais geral, não necessitando de simplificações, uma vez elaborado o modelo matemático que descreve o sistema a otimizar, aumenta a precisão nos resultados a serem alcançados (SIMONOVIC, 1992).

Como desvantagem, SANTOS (2007), destaca a incerteza de que, em muitos casos, a solução ótima obtida não é a melhor dentre todas as soluções ótimas no espaço viável, dado à natureza de não linearidade dos problemas. Formiga (1999) enfatiza que a principal dificuldade da PNL diz respeito à necessidade de bons valores iniciais para encontrar resultados satisfatórios, essa necessidade de valores iniciais aumenta à medida que o problema se torna mais complexo. Esse problema traz sérias restrições a aplicações dessa metodologia em problemas práticos, uma vez que os resultados obtidos não são confiáveis. Formiga (2005) também destaca a dificuldade da PNL em convergir em problemas descontínuos.

A exemplo de autores que utilizaram essa técnica de otimização está, Lopes (2001) que apresenta aplicações de PNL para otimização da operação de sistemas hidrenergéticos em reservatórios, utilizado em duas configurações: em paralelo e em série.

3.2.3 Algoritmos Evolucionários

O sucesso da calibração utilizando algoritmos tradicionais, geralmente depende de suposições linearizantes ou cálculo não realístico de derivadas parciais, através de procedimentos de otimização local, que tendem a tornar-se aprisionados em mínimos locais ou sofrer instabilidades numéricas associadas à inversão de matrizes. Portanto, as técnicas clássicas de otimização requerem muitas simplificações, que, por sua vez, podem produzir resultados insatisfatórios ou pouco realísticos (GOLDBERG, 1989).

Além das desvantagens descritas acima, os métodos de PL e PNL não garantem que a solução encontrada no processo de otimização seja a melhor, ou seja, o ótimo global para o problema. Diante disso, pesquisadores engajaram em desenvolver técnicas mais eficazes na obtenção desta solução.

Surgiu, portanto uma nova etapa denominada de Otimização Global (OG). Os métodos numéricos empregados na OG podem ser classificados em três grupos: Métodos Heurísticos, Métodos de Aproximação e Métodos Sistemáticos.

Lopes (2002) afirma que mesmo não sendo possível garantir que a solução encontrada seja o ótimo global, os métodos de OG são inteiramente capazes de atingir respostas próximas do mesmo, senão o próprio ótimo global. Ele descreve ainda que os métodos sistemáticos apresentam soluções mais confiáveis do que as dos métodos heurísticos, no entanto necessitam de uma quantidade de processamento computacional maior do que os algoritmos heurísticos, além de apresentarem problemas de convergência quando se otimiza redes mais complexas.

Os Métodos Heurísticos contém as metodologias que não podem provar formalmente que se encontrou o ótimo global considerando uma quantidade predefinida de passos ou iterações. São, portanto desprovidos de formulações matemáticas (WALTERS *et. al.*, 1993).

A maioria dos métodos que se enquadram nesse grupo (Métodos Heurísticos) são chamados Métodos Estocásticos, um exemplo dessa classe são os Algoritmos Evolucionários (AEs), todos com o objetivo de simular o processo de evolução de qualquer sistema. Os AEs são classificados em: Algoritmos Genéticos (AGs), Estratégias de Evolução (EE),

Programação Evolucionária (PE), Programação Genética (PG) e Sistemas Classificatórios (SCs).

Dentre os tipos de AEs citados, os mais conhecidos são os AGs por serem considerados promissores na resolução de problemas não-lineares irrestritos como os de calibração, devido à flexibilidade de incorporar problemas discretos, a ausência do uso de derivadas, a eficiência na exploração do espaço de busca, além das facilidades na implementação e no tratamento de funções complexas e descontínuas (CHEUNG, 2004).

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são exemplos clássicos de técnicas de programação evolucionária inspiradas nos mecanismos de evolução de população de seres vivos. Desenvolvido na Alemanha por Rechenberg (1973), em paralelo com Holland (1975) e popularizado por Goldberg (1989), estes algoritmos seguem o princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto, conceito introduzido pelo naturalista e fisiologista Charles Darwin em 1859 (FORMIGA, 2005).

Utilizando de termos biológicos, pode-se dizer que os AGs são baseados em genes (string), que representam as variáveis de decisão possíveis do problema, um conjunto de genes forma um indivíduo (cromossomo) ou uma possível solução do problema. O conjunto de indivíduos forma uma população que será avaliada com base em uma função objetivo.

Para dar início ao algoritmo, deve-se criar uma população inicial aleatoriamente, porém, atentando-se para os valores limites de cada gene. Em seguida, utilizando-se dos operadores: seleção, recombinação e mutação, parte-se para o processo de otimização de cada população, onde cada cromossomo (solução) recebe uma “nota”, que é o seu *fitness* (aptidão), geralmente este *fitness* é a própria função objetivo. Esse processo repete-se continuamente em busca de soluções ótimas, e, a medida que populações vão sendo geradas, as soluções com maior aptidão vão sendo armazenadas, até atingir o critério de parada.

O critério de parada é determinado pelo pesquisador, podendo optar por um limite máximo de gerações, ou quando as soluções atingirem uma faixa de aptidão pré-estabelecida, entre outros. O conjunto de todas as configurações que as soluções podem assumir constitui o “espaço de busca” do problema. Se a solução representa n variáveis de decisão, então o espaço de busca é um espaço com n dimensões.

A Figura 3.1 abrange o processo geral de um Algoritmo Genético Simples:

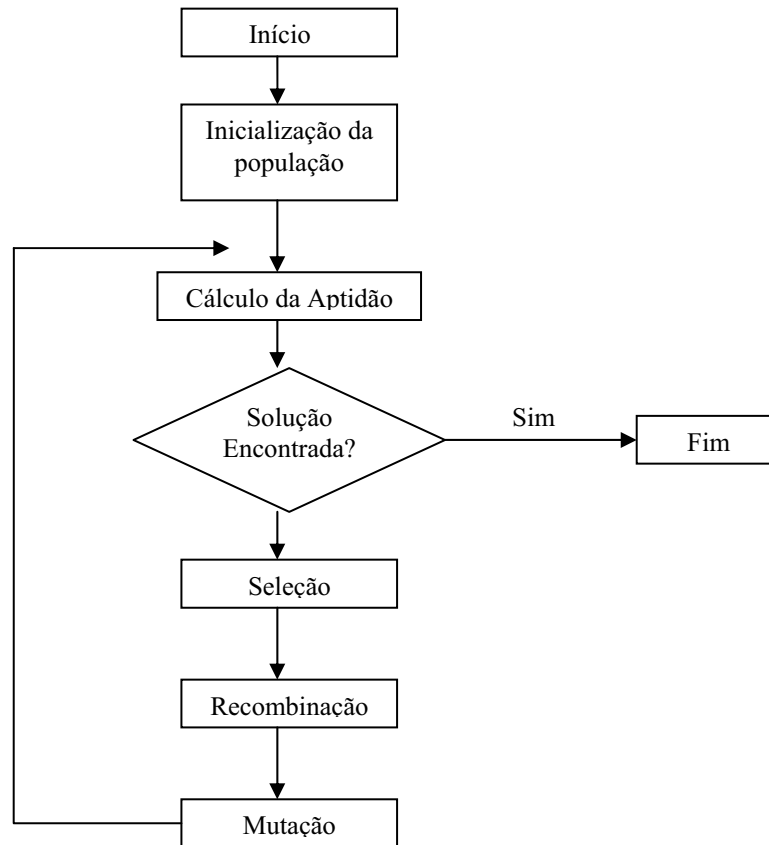


Figura 3.1 – Etapas do Algoritmo Gen tico

A implementa o dos AGs   constitu da das seguintes etapas:

- Escolha da representa o dos grupos de vari veis de decis o que definem completamente as solu es, cujos valores pretende-se determinar;
- Gera o da popula o inicial de solu es alternativas geralmente aleat ria;
- Defini o da avalia o de desempenho das solu es, chamado de fun o objetivo ou de aptid o;
- Especifica o dos operadores gen ticos para a realiza o dos mecanismos de sele o, recombina o e muta o; e
- Escolha dos par metros dos AGs (probabilidades de recombina o e muta o e tamanho da popula o inicial, tamanho da popula o ao longo das itera es, etc).

As popula es geradas dependem do tipo de AG adotado: geracional, geracional com elitismo ou *Steady-State*. No primeiro caso, as popula es s o renovadas a cada gera o, ou seja, criam-se n filhos para substituirem os n pais. No segundo caso, h  o que se chama de

elitismo, onde os pais mais aptos são mantidos nas próximas gerações. No terceiro, são criados n filhos para substituírem os n piores pais da população em cada geração (SOARES, 2003).

Seleção é o operador genético que decide quais indivíduos sofrerão recombinação e mutação a cada geração, baseado, geralmente, na aptidão de cada cromossomo. Segundo Brinckle (1996, APUD FORMIGA, 2005) no processo de seleção, os indivíduos de menor adaptabilidade tendem a ser removidos enquanto que os indivíduos mais aptos se reproduzem passando os valores do seu código, ou variáveis de decisão, para as iterações, ou gerações, posteriores.

A recombinação é responsável por promover a permuta de características dos pais para os filhos. Já a operação de mutação é utilizada para garantir uma maior varredura do espaço de estados e evitar que o algoritmo genético convergia muito cedo para mínimos locais. A mutação é efetuada alterando-se o valor de um gene de um indivíduo sorteado aleatoriamente com uma determinada probabilidade, denominada probabilidade de mutação, sendo substituído por outro dentro da faixa admissível.

Além das vantagens descritas anteriormente, Soares (2003) relata outras relevantes:

- Buscam, a partir de uma população de pontos e não de um único ponto;
- Usam informações da função objetivo apenas, não necessitando de derivadas ou de outras informações;
- São capazes de otimizar um número grande de variáveis, trabalhando com funções objetivo com superfícies complexas, reduzindo a incidência de mínimos ou máximos locais;
- Adaptam-se bem a técnicas de computação paralela;
- Fornecem uma gama de parâmetros ótimos e não uma simples solução;
- Usam regras de transição probabilísticas e não determinísticas;
- São facilmente hibridizados com outras técnicas;
- Apresentam a propriedade de "varrer" o espaço de soluções de maneira eficaz quando o número de variáveis de decisão do problema é grande.

A principal desvantagem relatada diz respeito ao seu custo computacional, são lentos, justamente por abordarem um conjunto grande de pontos para uma busca eficaz de soluções.

3.3 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

No processo de calibração ao se trabalhar apenas com uma função objetivo tende-se a ter parâmetros superadaptados a representar apenas um conjunto de situações, ou um modelo superespecialista que em muitos casos não poderiam ser aplicados em outras simulações, como por exemplo, análise da mudança do uso do solo na bacia.

Uma parcela considerável das críticas à calibração automática está relacionada às funções objetivo que são utilizadas. Ainda são incipientes as tentativas de definir funções objetivo que podem ser comparadas à função objetivo implícita no processo de calibração manual. As funções objetivo normalmente utilizadas na calibração automática não contemplam toda a complexidade considerada na calibração manual (Boyle *et al.*, 2000).

Todos estes métodos sempre trataram o problema de otimização de modelos hidrológicos através de uma única função objetivo implícita. A função objetivo deve ser representativa quanto à qualidade dos resultados desejados. Várias destas funções foram propostas e testadas e geralmente a função quadrática da diferença das vazões apresentou melhor resultado porque não apresenta importantes singularidades. No entanto, quando se escolhe uma função pode-se obter resultados tendenciosos. Por exemplo, a função quadrática tende a priorizar os valores maiores na medida que se minimiza o desvio quadrático das vazões.

Quando se utiliza algoritmos de otimização com objetivo simples, a solução gerada é única e não reporta os outros objetivos do sistema. Por isso, Collischonn e Tucci (2003) afirmam que há uma tendência na literatura em substituir a otimização convencional de um objetivo pela otimização multiobjetivo, pois esta, além de considerar os vários problemas de uma rede, dá ao decisor o poder de escolher qual solução é mais adequada ao sistema.

Atualmente, a forma de classificação dos métodos multiobjetivos mais aceita é a proposta por Cohon (1978):

- Técnicas de geração de soluções Pareto;
- Técnicas de articulação de preferências ou métodos não-iterativos;
- Técnicas de articulação progressiva de preferências ou métodos iterativos.

Os métodos de geração de soluções Pareto procuram gerar o conjunto de soluções não dominadas empregando técnicas de otimização. O domínio que estas soluções apresentam é geralmente contínuo, com um número infinito de alternativas factíveis. O conjunto Pareto é então levado a um tomador de decisão para que se possa escolher, dentre as soluções

pertencentes àquele conjunto, aquela que apresenta um maior nível de compatibilidade ou preferência. Uma grande vantagem deste método é a facilidade de visualização e interpretação das soluções geradas num gráfico em duas dimensões para uma função com dois objetivos. Porém, para uma função com mais objetivos, os gráficos gerados são bem complexos (FORMIGA, 2005).

A partir de 1993, diferentes algoritmos evolucionários foram sugeridos para resolver problemas de otimização multiobjetivo. Fonseca e Fleming (1993) com o *Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA)*, Horn *et al.* (1994) com o *Niched-Pareto Genetic Algorithm (NPGA)* e Srinivas e Deb (1994) com o *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)*, foram os precursores desta técnica, cujas características básicas são: avaliação dos membros de uma população com base no conceito de dominância Pareto e preservação da diversidade de soluções. Tais algoritmos mostraram-se eficientes na obtenção de múltiplas soluções não dominadas, para vários problemas de engenharia. No entanto, pesquisadores têm sugerido a introdução do elitismo para melhorar as suas propriedades de convergência. Dentre os algoritmos evolucionários multiobjetivo que consideram o elitismo, destacam-se os algoritmos *SPEA e SPEAII (Strength Pareto Evolutionary Algorithm - Zitzler e Thiele, 1998)*, *PAES (Pareto-Archived Evolution Strategy - Knowles e Corne, 1999)*, *AG elitista* de Rudolph, 1999, *PESA e PESAI (Pareto Envelope-based Selection Algorithm- Corne et al., 2000 e 2001)* e *NSGAI (Nondominated Sorting Genetic Algorithm- Deb et al., 2002)* (FORMIGA, 2005).

Zitzler e Thiele (1998) introduziram o elitismo através da manutenção de uma população externa (secundária). Esta população armazena um número fixo de soluções não dominadas previamente encontradas no início da simulação. Em cada geração, novas soluções não dominadas são comparadas com a população externa existente e as soluções não dominadas resultantes são preservadas. Este algoritmo não somente preserva as melhores soluções como também as utiliza para participar das operações genéticas com o objetivo de atingir melhores regiões dentro do espaço de busca.

Segundo Collischonn e Tucci (2003), a calibração de modelos hidrológicos pode ser uma tarefa tediosa quando realizada por tentativa e erro, especialmente quando o usuário do modelo é pouco experiente, já o ajuste automático é realizado por otimização através de técnicas iterativas, que possuem as seguintes limitações: solução com mínimos locais; solução matemática encontrando parâmetros distantes da realidade física, limitações das funções objetivo, entre outros.

Collischonn e Tucci (2003) trabalharam na implantação de um método de calibração automática, proposto por Yapo *et al.* (1998), que simplifica o processo de calibração, mas mantém algumas características desejáveis da calibração manual, em especial a consideração de várias funções objetivo ao mesmo tempo. Utilizou o modelo IPH2 em uma bacia de 989 km² no Estado de Santa Catarina, considerando, ao mesmo tempo, até três funções objetivo. Constatou-se que a calibração tende a ser melhor com o aumento do número de indivíduos na população (*ns*), porém para *ns* = 500 pontos os resultados são plenamente satisfatórios quando são otimizadas duas funções objetivo. Já a otimização de três funções objetivo apresenta resultados melhores com aproximadamente *ns* = 1000 pontos, sem comprometer a eficiência em termos de tempo de processamento.

Bravo, Collischonn e Tucci (2010) desenvolveram um trabalho utilizando um algoritmo evolucionário multiobjetivo de otimização desenvolvido por Vrugt *et al.* (2003) e aplicado na calibração automática do modelo hidrológico IPH II. Foram realizados dois testes na calibração automática do modelo IPH II e o algoritmo MOCOM-UA foi utilizado na comparação dos resultados. O primeiro teste foi baseado numa série sintética e ambos os algoritmos, o MOSCEM-UA e o MOCOM-UA conseguiram encontrar as soluções do problema. No segundo teste, uma série real foi utilizada sendo obtidos bons ajustes entre as vazões observadas e calculadas pelo modelo IPH II com base nos conjuntos de parâmetros que geraram soluções na aproximação do frente de Pareto. O trabalho ainda, mostrou algumas vantagens sobre outro algoritmo evolucionário multiobjetivo atualmente utilizado na calibração automática do modelo hidrológico IPH II.

4. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho é apresentada em três etapas. A primeira refere-se ao modelo hidrológico, o qual é empregado no estudo, indicando os parâmetros que serão ajustados na etapa de calibração. A segunda etapa apresenta a descrição das rotinas computacionais empregadas na calibração. A terceira trata da região de estudo.

4.1 *STORM WATER MANAGEMENT MODEL - SWMM*

O SWMM, modelo hidrológico utilizado no presente trabalho, busca representar o sistema de drenagem por meio de bacias, condutos e nós. Determinou-se os parâmetros necessários para a simulação, muitos dos quais foram calibrados, sendo, por tanto, alguns valores aqui descritos adotados como estimativas iniciais.

4.1.1 Sub-bacias

As sub-bacias se caracterizam pelos parâmetros apresentados na tabela abaixo:

Tabela 4.1 – Parâmetros das Sub-bacias

Parâmetro	Sigla	Unidade
Área	A	ha
Largura	W	m
Declividade	S	%
Áreas impermeáveis	AI	%
Coefficiente de rugosidade de Manning – Superfícies impermeáveis	NI	-
Coefficiente de rugosidade de Manning – superfícies permeáveis	NP	-
Capacidade de armazenamento em depressões – superfícies impermeáveis	DI	mm
Capacidade de armazenamento em depressões – superfícies permeáveis	DP	mm
Áreas permeáveis não conectadas	AINC	%

As larguras das sub-bacias foram determinadas conforme orientação do manual do SWMM, que as define como estimativa inicial, como uma relação entre a área e o valor médio dos comprimentos máximos de escoamento superficial. Assim optou-se pela largura equivalente “Le”, para a representação da bacia hidrográfica de forma retangular.

$$Le = \frac{k_c \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{k_c} \right)^2} \right] \quad (4.1)$$

$$k_c = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (4.2)$$

Na qual:

Le = largura do retângulo equivalente (m);

A = Área da bacia hidrográfica ou sub-bacia (m²);

kc = coeficiente de compacidade (adimensional);

P = perímetro da bacia hidrográfica ou sub-bacias (m);

Assim pode-se calcular as larguras das sub-bacias (equação 3.3):

$$W = \frac{A}{Le} \quad (4.3)$$

Em que:

W = largura das sub-bacias (m);

A = Área da bacia hidrográfica ou sub-bacia (m²);

Em relação a infiltração o SWMM oferece três alternativas para modelagem: Equações de *Horton*, Método de *Green-Ampt* e Método SCS (*Soil Conservation Service*). Dos quais as equações de *Horton* e o Método de *Green-Ampt* são conceituais e o Método SCS é empírico devido a atribuição do CN (*Curve Number*). Os registros literários demonstram que diversos especialistas dão preferência pelas equações de *Horton*, motivo pelo qual optou-se por sua utilização no presente trabalho.

4.1.2 Condutos

São dispositivos pelos quais a água é encaminhada dentro do sistema de drenagem: sarjetas, galerias pluviais e canais naturais. Para sua caracterização no SWMM são necessários os parâmetros descritos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros dos Condutos

Parâmetro	Sigla	Unidade
Comprimento	L	m
Declividade	Sc	m/m
Rugosidade	Ncn/Ng,s	-
Seção transversal	-	-
Vazão de base	Q _b	m ³ /s
Offset de saída (cota)	h _{off}	m

4.1.3 Nós

São junções que ligam os condutos e que recebem a contribuição das sub-bacias. Os parâmetros de entrada dos nós no modelo hidrológico SWMM estão descritos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Parâmetros dos nós

Parâmetro	Sigla	Unidade
Coordenadas	x,y	-
Cota de fundo	Z	m
Altura Máxima	$h_{máx}$	m
Vazão de base	Q_b	m^3/s
Altura inicial de escoamento	$H_{inicial}$	m

4.1.4 Dados Hidrológicos

Os dados de precipitação e vazão utilizados foram fornecidos por Garcia e Paiva (2005), no qual foram trabalhados seis eventos, sendo três de alta intensidade e três de baixa intensidade, conforme verificado nas Figuras 4.1 a 4.6. Os gráficos abaixo foram obtidos com auxílio dos programas de computador: AUTOCAD, EXECEL e MATLAB.

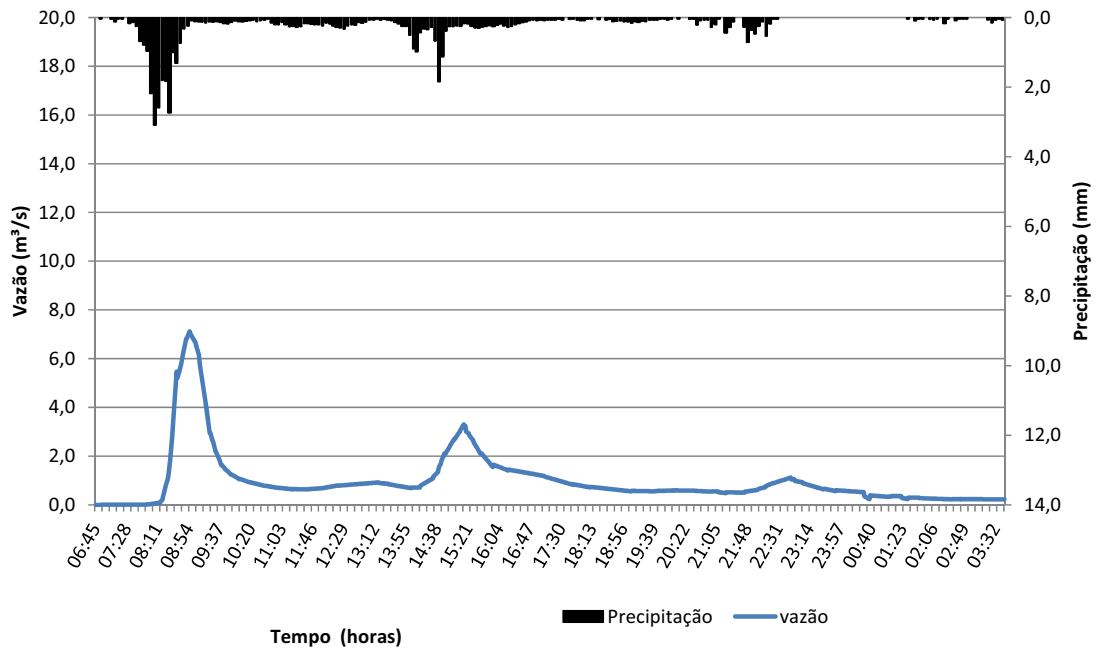


Figura 4.1 – Evento 01 07/05/2004 (adaptado de Garcia e Paiva, 2005)

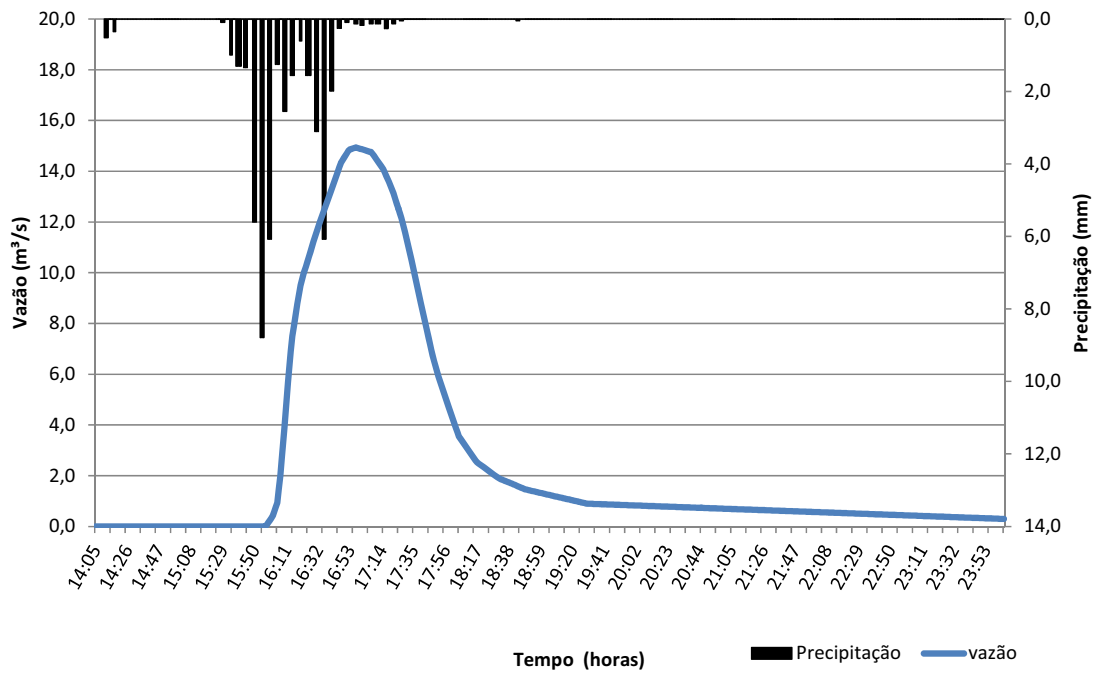


Figura 4.2 – Evento 02 - 10/06/2004 (adaptado de Garcia e Paiva, 2005)

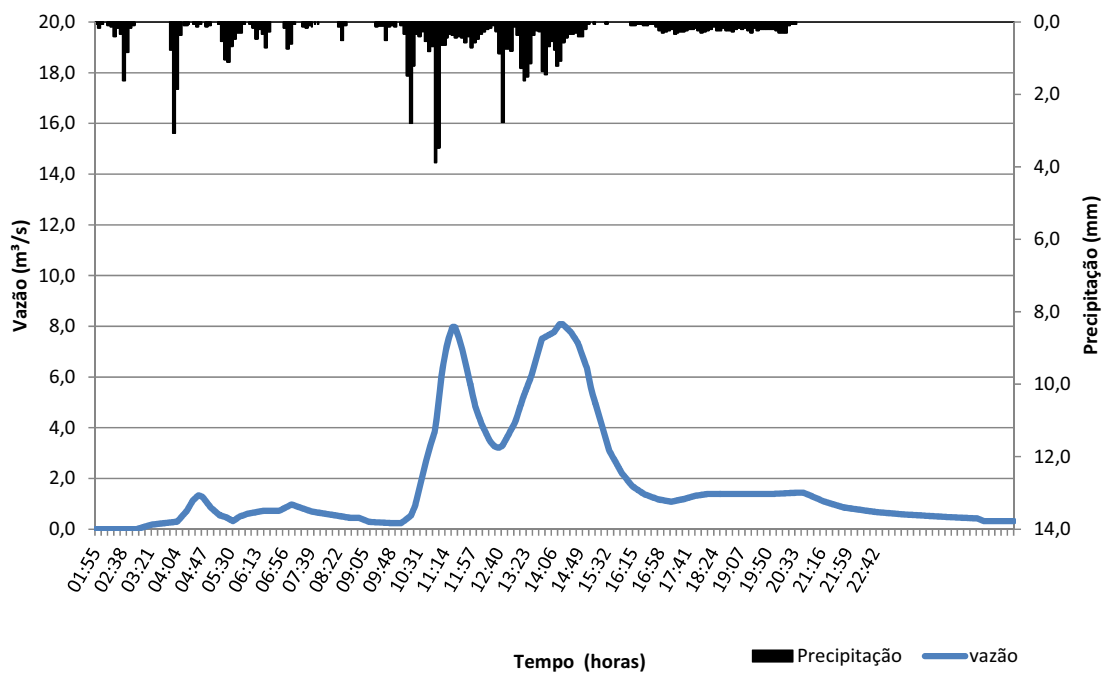


Figura 4.3 – Evento 03 - 09/11/2004 (adaptado de Garcia e Paiva, 2005)

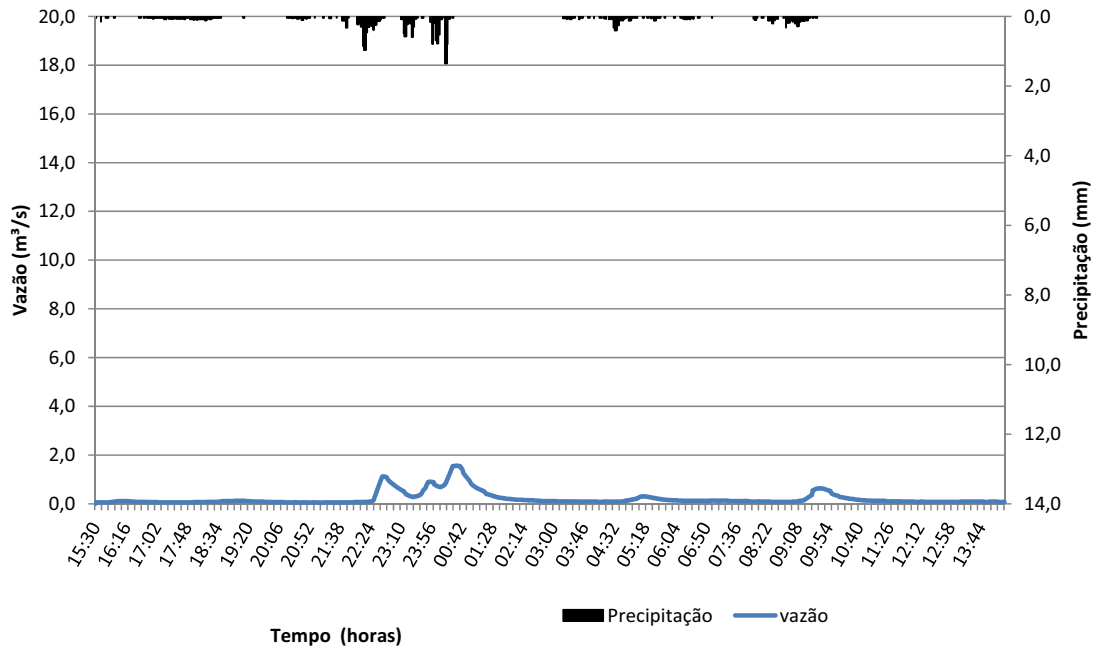


Figura 4.4 – Evento 04 - dia 10/09/2004 (adaptado de Garcia e Paiva, 2005)

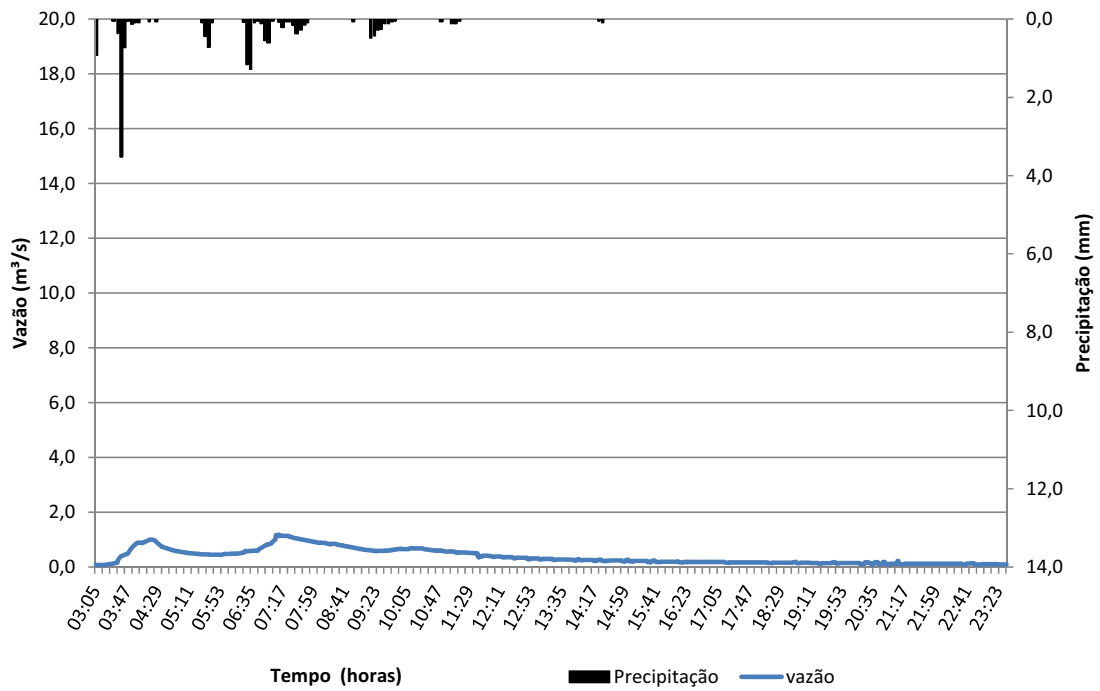


Figura 4.5 – Evento 05 - 22/09/2004 (adaptado de Garcia e Paiva, 2005)