

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

GUILHERME LAZARINI RIBEIRO ALEM FERREIRA

**Análise de desempenho do *Ensemble Kalman Filter* com matriz de estados aumentada
para localização de vazamentos em rede de distribuição de água**

**São Carlos
2020**

GUILHERME LAZARINI RIBEIRO ALEM FERREIRA

Análise de desempenho do *Ensemble Kalman Filter* com matriz de estados aumentada para localização de vazamentos em rede de distribuição de água

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento

Orientador: Prof. Tit. Edson Cezar Wendland

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

F383a Ferreira, Guilherme Lazarini Ribeiro Alem
Análise de desempenho do Ensemble Kalman Filter
com matriz de estados aumentada para localização de
vazamentos em rede de distribuição de água / Guilherme
Lazarini Ribeiro Alem Ferreira; orientador Edson Cezar
Wendland. São Carlos, 2020.

Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e
Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2020.

1. Localização de vazamentos. 2. Ensemble Kalman
Filter. 3. Análise de eficiência. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **GUILHERME LAZARINI RIBEIRO ALEM FERREIRA.**

Título da dissertação: " Análise de desempenho do *Ensemble Kalman Filter* com matriz de estados aumentada para localização de vazamentos em rede de distribuição de água ".

Data da defesa: 17/09/2020.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Edson Cezar Wendland**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Alexandre Keppler Soares**
(Universidade de Brasília/UnB)

Aprovado

Prof. Dr. **Bruno Melo Brentan**
(Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Dr. **Eduardo Mario Mendiando**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

Aos meus pais, ao meu irmão, à minha companheira e à minha avó.

AGRADECIMENTOS

Sou grato a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a proposição, o desenvolvimento e a conclusão deste trabalho que me trouxe tanto aprendizado.

Aos meus pais José Jilson e Irlene Mara, ao meu irmão Ramiz ,à Rosângela e à toda minha família, por todo amor e carinho.

Ao Prof. Edson Wendland, pela oportunidade de desenvolvimento da pesquisa e pela sabedoria e proatividade na orientação do trabalho.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC), pelas amizades, pelo companheirismo e por todas as experiências enriquecedoras: Alan, Alessandra, Alex, Alice, Ballarin, Bérghamo, Camila, Dimaghi, Davi, David, Érick, Gabriel, Hélio, Jamil, Jaqueline, Jean, João Paulo, Julian, Kalyl, Livia, Luis Eduardo, Natália, Pedro e Yuri.

Aos colaboradores da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), especialmente a todo o Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento (PPG-SHS), pelo apoio institucional e pela infraestrutura disponibilizados.

À coordenação do Residencial Damha pela colaboração como trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ / Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI, pelo apoio financeiro na forma de bolsa de mestrado.

RESUMO

FERREIRA, Guilherme Lazarini Ribeiro Alem. Análise de desempenho do *Ensemble Kalman Filter* com matriz de estados aumentada para localização de vazamentos em rede de distribuição de água. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

O *Ensemble Kalman Filter* com matriz de estados aumentada é uma técnica de assimilação de dados e estimativa de parâmetros fundamentada na comparação entre a covariância da matriz de estados aumentada e a covariância da matriz de medição. Esse trabalho teve como objetivo analisar o desempenho dessa metodologia na localização de vazamentos perante variações de coeficiente de vazamento e número de membros do *ensemble* (NME). A análise foi desenvolvida com base nos resultados de localização de vazamento de trinta e seis simulações de um modelo sintético, sendo que estes foram comparados com os resultados do estudo de caso de localização de vazamento em uma rede real. Os dados coletados da rede real consistiram de dados de pressão, vazão do reservatório e consumo médio de água nas residências com intervalo de coleta de trinta dias. Para a obtenção da curva de vazão do reservatório foi instalada uma estrutura de aquisição e armazenamento de dados em vídeo dos macromedidores de volume de saída do reservatório, também foi desenvolvido um código de leitura de imagens e cálculo de vazão. A avaliação de desempenho do método se deu a partir de cinco critérios: número de iterações até resposta definitiva; tempo de compilação do algoritmo; solução correta; soluções incorretas e magnitude do vazamento em solução correta. Os resultados indicaram uma melhora significativa no desempenho da localização de vazamentos para valores de coeficiente de vazamento maiores ou iguais a $0,05 \text{ L/s/mca}^{1,18}$. Em relação a NME as diferenças observadas foram menos significativas. As soluções observadas nas realizações do estudo de caso revelaram desempenho não ótimo do método de localização de vazamento, que pode estar relacionado a ausência de calibração de rugosidades das tubulações no anel central da rede e a ausência de dados da variação de nível do reservatório. Entretanto as soluções do estudo de caso se aproximam da localização correta do vazamento por se concentrarem em uma mesma região onde foi observado vazamento real. Conclui-se a partir dos resultados, que há significativa dependência, não somente em relação à magnitude do vazamento buscado e ao NME, mas também à posição do vazamento e disponibilidade de dados de vazão de saída e altura do reservatório, para o bom desempenho dessa técnica na localização de vazamentos.

Palavras-chave: Localização de vazamentos. *Ensemble Kalman Filter*. Análise de desempenho.

ABSTRACT

Ferreira, Guilherme Lazarini Ribeiro Alem. Performance analysis of Ensemble Kalman Filter with augmented state matrix for leakage location in water distribution network. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

The Ensemble Kalman Filter with augmented state matrix is a data assimilation and parameters prediction technique based on the comparison between the augmented state matrix covariance and the measurements matrix covariance. As the main purpose of this work, performance analysis was carried out to evaluate the technique's suitability to find leakage locations through variations on the leakage coefficient and the number of ensemble members (NEM). For these analyses, the results of thirty-six simulations of a synthetic model were compared with the results of the leakage location from a real network considered. The data collected from this real network consisted of pressure, flow of the reservoir, and average household water consumption data with a collection interval of thirty days. In order to obtain the reservoir's flow curve, a structure was installed to acquisition and to store video records of flowmeters data of the reservoir outputs, and also an image reading code and flow calculation was developed. The performance analysis of the technique was based on five criteria: the total required number of iterations; compilation time of the algorithm; correct solution; incorrect solutions and magnitude of the leak in the correct solution. The results indicated a significant performance improvement of the leakage location for the leakage coefficient values greater than or equal to $0.05 \text{ L/s/mWC}^{1.18}$. Regarding NEM, the differences observed were less significant. For the real network, the solutions observed in the realizations revealed an unsatisfactory performance of method, which could be related to the absence of calibration of the pipe roughness to the network central ring and also to the lack of the reservoir level's variation records. However, the founded solutions were close to the correct leakage locations, at least near to the real leak's region. In essence, the Ensemble Kalman Filter with augmented state matrix has its performance dependence not only rely on the searched leakage's magnitude and the NEM, but also to the leakage position, and the availability of the outflow and water level's reservoir data.

Keywords: Leakage location. Ensemble Kalman Filter. Performance analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação do balanço hídrico.....	31
Figura 2 - Técnicas de detecção e/ou localização de vazamentos.....	33
Figura 3 - Trabalhos relacionados ao KF e metodologias derivadas em tubulações de distribuição de água.....	43
Figura 4 - Representação do ciclo de funcionamento do Filtro de Kalman.....	46
Figura 5 - Representação das etapas do Filtro de Kalman.....	48
Figura 6 - Representação da matriz de estados (ensemble).....	49
Figura 7 - Representação da matriz de estados aumentada.....	52
Figura 8 - Planta do condomínio residencial estudado.....	55
Figura 9 - Intervalos de cotas topográficas dos nós da rede de estudo.....	56
Figura 10 - Intervalos de cotas topográficas dos nós da rede de estudo.....	57
Figura 11 - Planta de monitoramento de sensores de pressão.....	61
Figura 12 - Algoritmo de assimilação de dados e estimativa de vazamentos com <i>EnKF</i>	61
Figura 13 - Cenários de simulação para valores de NME e de coeficiente c	64
Figura 14 - Localização do nó com vazamento simulado para o modelo sintético.....	65
Figura 15 - Diagrama de fluxo de método 1.....	66
Figura 16 - Diagrama de fluxo de método 2.....	69
Figura 17 - Representação anel central da rede estudada.....	70
Figura 18 - Medidor de pressão conectado a cavalete.....	71
Figura 19 - Diferença de pressões entre simulações para $\varepsilon = 0,0015$ mm e $\varepsilon = 0,01$ mm.....	72
Figura 20 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,005$ e NME = 50.....	74
Figura 21 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,005$ e NME = 100.....	75
Figura 22 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,005$ e NME = 200.....	75
Figura 23 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,005$ e NME = 300.....	76
Figura 24 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,005$ e NME = 400.....	76
Figura 25 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,005$ e NME = 500.....	77

Figura 26 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,01$ e NME = 50.....	78
Figura 27 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,01$ e NME = 100.	78
Figura 28 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,01$ e NME = 200.	79
Figura 29 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,01$ e NME = 300.	79
Figura 30 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,01$ e NME = 400.	80
Figura 31 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,01$ e NME = 500.	80
Figura 32 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,05$ e NME = 50.....	81
Figura 33 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,05$ e NME = 100.....	82
Figura 34 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,05$ e NME = 200.....	82
Figura 35 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,05$ e NME = 300.....	83
Figura 36 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,05$ e NME = 400.....	84
Figura 37 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,05$ e NME = 500.....	84
Figura 38 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,1$ e NME = 50.....	85
Figura 39 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,1$ e NME = 100.....	85
Figura 40 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,1$ e NME = 200.....	86
Figura 41 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,1$ e NME = 300.....	86
Figura 42 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,1$ e NME = 400.....	87
Figura 43 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,1$ e NME = 500.....	87
Figura 44 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,5$ e NME = 50.....	88

Figura 45 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,5$ e NME = 100.....	89
Figura 46 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,5$ e NME = 200.....	89
Figura 47 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,5$ e NME = 300.....	90
Figura 48 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,5$ e NME = 400.....	90
Figura 49 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,5$ e NME = 500.....	91
Figura 50 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 1$ e NME = 50.....	92
Figura 51 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 1$ e NME = 100.....	92
Figura 52 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 1$ e NME = 200.....	93
Figura 53 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 1$ e NME = 300.....	93
Figura 54 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 1$ e NME = 400.....	94
Figura 55 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 1$ e NME = 500.....	94
Figura 56 - Localização nó vazamento – Anel central.....	104
Figura 57 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_r = 0,05$ e NME = 500.....	104
Figura 58 - Localização nó vazamento – Próximo ao Anel central.....	105
Figura 59 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_r = 0,05$ e NME = 500.....	105
Figura 60 - Localização do vazamento simulado- Extremidade da rede.....	106
Figura 61 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_r = 0,05$ e NME = 500.....	106
Figura 62 - Localização do vazamento simulado – Entre anel central e extremidade.....	107
Figura 63 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_r = 0,05$ e NME = 500.....	107
Figura 64 - Gráfico de pressões medidas ao longo do tempo.....	108
Figura 65 -. Identificação dos pontos de medição de pressão.....	109
Figura 66 - Curva de vazão resultante.....	110

Figura 67 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó com NME = 50.....	112
Figura 68 - Localização do vazamento encontrado com NME = 50.....	112
Figura 69 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó com NME = 100....	113
Figura 70 - Localização do vazamento encontrado com NME = 100.....	113
Figura 71 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó com NME = 200....	114
Figura 72 - Localização do vazamento encontrado com NME = 200.....	114
Figura 73 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó com NME = 300....	115
Figura 74 - Localização do vazamento encontrado com NME = 300.....	115
Figura 75 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó com NME = 400....	116
Figura 76 - Localização do vazamento encontrado com NME = 400.....	116
Figura 77 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó com NME = 500....	117
Figura 78 - Localização do vazamento encontrado com NME = 500.....	117
Figura 79 - Diferenças de pressões estimadas e medidas.....	118
Figura 80 - Curva estimada de nível do reservatório.....	119
Figura 81 - Localização do vazamento identificado em campo.....	122
Figura 82 - Vazamento identificado em campo.....	121
Figura 83 - Ligação Anel Central – Reservatórios.....	128
Figura 84 - Estrutura de filmagem do medidor de volume.....	129
Figura 85 - Esquema do sistema de captura de imagem.....	130
Figura 86 - Imagens dos medidores.....	130
Figura 87 - Composição da leitura do macromedidor de volume.....	132
Figura 88 – Algoritmo de processamento da imagem e leitura de dados.....	132
Figura 89 - Ficha para registro da primeira leitura.....	133
Figura 90 - Ficha de registro para segunda leitura.....	134
Figura 91 - Representação esquemática das áreas de leitura – Área 1.....	135
Figura 92 - Representação esquemática das áreas de leitura – Área 2.....	136
Figura 93 - Representação esquemática das áreas de leitura – Área 3.....	137
Figura 94 - Representação esquemática das áreas de leitura – Área 4.	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontuação para P_{NIR} apenas (Número de passos para resposta definitiva).....	95
Tabela 2 - Pontuação para P_{TCA} apenas (Tempo de compilação do algoritmo).....	95
Tabela 3 - Pontuação para P_{SC} apenas (Solução correta).....	96
Tabela 4 - Pontuação para P_{SI} apenas (Soluções incorretas).....	96
Tabela 5 - Pontuação para P_{MV} apenas (Magnitude do vazamento em solução correta).....	97
Tabela 6 - Variáveis de análise para NME = 50.....	97
Tabela 7 - Variáveis de análise para NME = 100.....	97
Tabela 8 - Variáveis de análise para NME = 200.....	98
Tabela 9 - Variáveis de análise para NME = 300.....	98
Tabela 10 - Variáveis de análise para NME = 400.....	98
Tabela 11 - Variáveis de análise para NME = 500.....	98
Tabela 12 - Pontuações calculadas para NME=50.....	99
Tabela 13 - Pontuações calculadas para NME=100.....	99
Tabela 14 - Pontuações calculadas para NME=200.....	99
Tabela 15 - Pontuações calculadas para NME=300.....	100
Tabela 16 - Pontuações calculadas para NME=400.....	100
Tabela 17 - Pontuações calculadas para NME=500.....	100
Tabela 18 - Pontuação da primeira realização.....	101
Tabela 19 - Pontuação da segunda realização.....	101
Tabela 20 - Pontuação final.....	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DVR	<i>Digital Video Recorder</i>
EKF	<i>Extended Kalman Filter</i>
EnKF	<i>Ensemble Kalman Filter</i>
ES	<i>Ensemble Smoother</i>
HD	<i>Hard disk</i>
IWA	<i>International Water Association</i>
KF	<i>Kalman Filter</i>
MV	Magnitude do vazamento em solução correta
Nan	<i>not a number</i>
NIR	Número de iterações até resposta definitiva
NME	Número de membros do Ensemble.
<i>npar</i>	Número de parâmetros.
NSGA-II	<i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
nvar	Número de variáveis estudadas (estados).
RDA	Redes de distribuição de água
SC	Solução correta
SI	Soluções incorretas
TRA	Tempo de realização do algoritmo

LISTA DE SÍMBOLOS

BV	balanço de volume calculado
V_e	volume de entrada
V_s	volume de saída
ΔV	volume de água contido no trecho estudado
A	matriz Jacobiana (derivadas parciais da perda de carga em cada trecho).
H	vetor de incógnitas de cotas piezométricas.
F	vetor de termos referentes ao balanço de vazão
Q_{ij}	vazão no trecho entre os nós i e j
Y	fator de correção de vazão
d	derivada da expressão da perda de carga em relação à vazão
h	altura piezométrica em um nó (termo do vetor H)
Q	vazão de vazamento
c	coeficiente de vazamento (emitter)
α	expoente de vazamento
x^a	vetor de estados assimilados
x^p	vetor de estados previstos
A	matriz de transição
e_1	vetor de erros inerentes ao processo de modelagem.
W	matriz de covariância do vetor de erros de modelagem
p^p	matriz de covariância do vetor de estados previstos
p^a	matriz de covariância do vetor de estados assimilados
t_i	passo de tempo em análise
z^m	vetor de medições
M	matriz de medição
e_2	vetor de erros inerentes à medição
K	ganho de Kalman
R	matriz de covariância das medições
X	matriz de estados (ensemble)
X	<i>matriz de estados verdadeira</i>
X^p	vetor de estados previstos
P^p	matriz de covariância da matriz de estados previstos

$\langle * \rangle$	operação de convolução
$()^T$	operação de transposição
$\overline{X^P}$	vetor de médias da matriz de covariância dos estados previstos
XA	matriz de estados aumentada
$C_{a,b}$	matriz de correlação entre os nós a e b acumulada para o dia
$CH_{a,b}^h$	matriz de correlação entre os nós a e b para a hora h
$PL_{a,l}$	matriz de pressões na presença de vazamentos
\overline{PL}_a	matriz de pressões na ausência de vazamento
$S_{n,l}$	sensibilidade do nó n a um dado vazamento no nó l
$PL_{n,l}$	pressão no nó n na presença de vazamentos no nó l
PN_n	pressão no nó n na ausência de vazamentos
$f1_X$	função objetivo 1
$f2_X$	função objetivo 2
$f3_X$	função objetivo 3
D_X	distância euclidiana
F_{i_x}	pontuação final
p_n	valor da pressão do nó n
c_n	valor de coeficiente de vazamento do nó n
q_R	valor da vazão de saída do reservatório
N_R	valor do nível do reservatório
P_{NIR}	pontuação para o critério NIR
N_i	número de iterações para a ocorrência da resposta definitiva
N_{ti}	número total de iterações realizadas
P_{TRA}	pontuação para o critério TRA
T_i	tempo de duração de uma iteração
T_{ti}	tempo de duração da iteração mais duradoura
P_{SI}	pontuação para o critério SI
nSI	número de soluções incorretas obtidas
P_{MV}	pontuação para o critério MV
c_e	valor do coeficiente de vazamento encontrado
c_s	valor do coeficiente de vazamento simulado
P_f	pontuação final de desempenho
ε	rugosidade absoluta (mm)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	OBJETIVOS.....	29
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
	3.1 Métodos de Detecção e Vazamentos	32
	3.2 Ferramenta de Modelagem	40
	3.3 Aplicação de Técnicas Baseadas em Filtro de Kalman para Detecção e/ou Localização de Vazamentos	41
	3.4 Filtro de Kalman	45
	3.5 Variações do <i>Kalman Filter</i>	48
	3.6 <i>Ensemble Kalman Filter</i>	48
	3.7 Matriz de Estados Aumentada com Parâmetros	51
4	METODOLOGIA	54
	4.1 Rede estudada	54
	4.2 Projeto de Monitoramento	57
	4.3 Algoritmo de detecção e localização de vazamentos.....	61
	4.4 Análise de Sensibilidade - Modelo Sintético	64
	4.4.1 Método de Avaliação do Desempenho do Processo de Detecção de Vazamentos	66
	4.5 Estudo de caso - Modelo do caso real.....	68
	4.5.1 Dados de Vazão e Consumo	70
	4.5.2 Dados de Pressão	71
	4.5.3 Particularidades do processo de modelagem.....	71
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
	5.1 Resultados da Análise de Eficiência.....	74
	5.2 Resultados do estudo de caso.....	108
6	CONCLUSÃO	123
7	REFERÊNCIAS	125
	APÊNDICE A – METODOLOGIA DE COLETA E ASSIMILAÇÃO DE DADOS DE CAMPO	129

1 INTRODUÇÃO

Dado o inegável valor da água para a subsistência humana, e a tendência de aumento da demanda deste recurso devido ao crescimento populacional, é natural que um tema pertinente no campo de pesquisas atuais seja a manutenção ou preservação da disponibilidade de recursos hídricos. Dentro deste escopo insere-se, sob o ponto de vista do abastecimento hídrico urbano, o estudo de operação e manutenção de redes de distribuição de água (RDA). Este estudo apresenta-se como assunto fundamental pois tais redes são parte significativa do caminho da água até seu usuário final.

Um dos assuntos importantes dentro do estudo das redes de distribuição é a redução de perdas de água. Isso porque, atualmente no Brasil, as perdas totais, que contabilizam perdas físicas e comerciais, representam cerca de 38% do volume total de água tratada (SNIS, 2016). À medida que tal porcentagem aumenta, o sistema de distribuição se torna mais dispendioso e, conseqüentemente, menos eficiente, dificultando o processo de operação pelas empresas responsáveis. Assim, os estudos de metodologias aplicadas à redução de perdas totais têm, naturalmente, grande valia para a manutenção dos sistemas de abastecimento de água.

Outro ponto a ser ressaltado refere-se a gastos com expansão de rede que podem ser evitados. Dada uma demanda específica em uma determinada rede de distribuição que apresenta um volume substancial de perdas, são propostos projetos de expansão da estrutura da rede com objetivo de manter a capacidade de abastecimento. Tais projetos poderiam ser evitados através técnicas de redução de vazamentos, garantindo o volume de abastecimento e gerando economia para a empresa de distribuição de água.

Ainda como argumento de importância do assunto abordado, a ineficiência na distribuição de água devido a vazamentos gera, indiretamente, uma maior captação de água bruta das fontes naturais. Ou seja, as perdas de água estão relacionadas ao desperdício gerado no processo de tratamento. Dessa forma, a ocorrência de vazamentos também pode ser vista como prejudicial do ponto de vista ambiental

Assim é visível a pertinência de estudos de redução de vazamentos em redes de distribuição de água no que diz respeito à manutenção da qualidade de vida da população servida, do equilíbrio financeiro das empresas prestadoras de serviço e do equilíbrio da

disponibilidade da água como recurso ambiental. Neste sentido, diversas técnicas de redução de vazamentos foram e ainda são desenvolvidas.

Parte dos estudos na área de redução de perdas, refere-se à localização de vazamentos em trechos específicos de uma determinada rede de distribuição. Estas são técnicas de prospecção física baseadas em inspeções locais ou em busca por auscultação de tubulação em pontos dos trechos estudados (Babbitt *et al.*, 1920). Conseqüentemente o método de prospecção dos possíveis vazamentos é limitado a ser aplicado em um trecho por vez. Outra abordagem mais ampla dedica-se à determinação de trechos com maior probabilidade de apresentarem vazamentos, como resultado de uma busca em RDAs maiores e mais complexas.

Outra parte dos estudos na área de redução de perdas se baseiam no monitoramento de variáveis de hidráulicas da rede estudada como nível de reservatório, vazões e pressões. A relação entre tais variáveis possibilita a aplicação de metodologias computacionais de detecção de vazamentos em RDA's mais amplas. Atualmente, diversas ferramentas matemáticas foram e ainda são propostas visando maior eficiência e precisão dos trabalhos.

Dentre as técnicas de detecção e localização de vazamentos já propostas, destaca-se o uso do *Ensemble Kalman Filter (EnKF)* com Vetor de Estados Aumentado como ferramenta de assimilação de dados ruidosos oriundos de imperfeições nos processos de medição. O funcionamento da técnica se resume a aplicação da ferramenta de assimilação de medições de variáveis de estado (pressão e vazão) como método de determinação de parâmetros. Neste caso, os parâmetros estudados são a localização e magnitude de vazamentos.

Sob ponto de vista de aumento de eficiência da metodologia de detecção e localização de vazamentos com o *EnKF* com Vetor de Estados Aumentado, há variáveis que impactam fortemente no resultado da metodologia. Isto é, fatores como velocidade de execução, eficácia, ocorrência de falsos positivos e exatidão dos resultados são sensíveis, principalmente, a duas variáveis da metodologia citada: o número de membros do conjunto *ensemble* e a ordem de grandeza dos coeficientes de vazamento, que serão devidamente explicadas no Capítulo de Metodologia deste trabalho.

Com o exposto, neste trabalho, avalia-se a influência da variação das incógnitas citadas na eficiência da metodologia de detecção e localização de vazamentos. Para isso, é proposta uma metodologia de avaliação de eficiência com base nos parâmetros julgados pertinentes à avaliação do processo.

Além disso, é explorada a capacidade de assimilação de dados da metodologia ao ser aplicada em um estudo de caso que apresenta dados ruidosos coletados e limitação de informações.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é quantificar a variação do desempenho do *Ensemble Kalman Filter* utilizado como ferramenta para a detecção de perdas de água a partir de simulações do modelo hidráulico estudado submetido a várias condições de funcionamento. Realiza-se um estudo de caso para a observação dos resultados obtidos em condições reais de obtenção de dados e modelagem. Especificamente, têm-se os seguintes objetivos:

Obter a rede de amostragem ótima com a localização de oito medidores de pressão ao longo da rede de distribuição de água;

Propor e aplicar um método de avaliação de desempenho da ferramenta de detecção de vazamentos no modelo hidráulico sintético;

Aplicar a metodologia de localização de vazamentos com os dados coletados em campo aplicados ao modelo do caso real

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Jalalkamali e Eftekhari (2012), a ocorrência de vazamentos pode influenciar na qualidade do sistema de abastecimento. Em casos de eventos de seca, uma quantidade significativa de vazamentos pode dificultar a operação de uma determinada rede de distribuição de água e, conseqüentemente, pode impedir o abastecimento de toda a demanda de determinada população.

A classificação dos tipos de perda se baseia na causa ou origem do déficit. A classificação de todo o balanço hídrico de um sistema de distribuição de água é proposta por IWA (2000) conforme apresentado na Figura 1, salienta-se que para este trabalho, as perdas de água abordadas são as perdas reais por vazamentos na distribuição até o ponto de medição do cliente.

Figura 1 - Classificação do balanço hídrico.

Volume de entrada do sistema	Consumo autorizado	Consumo autorizado faturado	Consumo faturado medido	Água faturada	
			Consumo faturado não medido		
		Consumo autorizado não faturado		Consumo medido não faturado	Água não faturada
				Consumo não medido e não faturado	
	Perdas de água	Perdas aparentes		Consumo não autorizado	
				Imprecisão na medição do consumo	
Perdas reais			Vazamentos e transbordamentos em reservatórios		
			Vazamentos na transmissão e/ou distribuição até o ponto de medição do cliente		

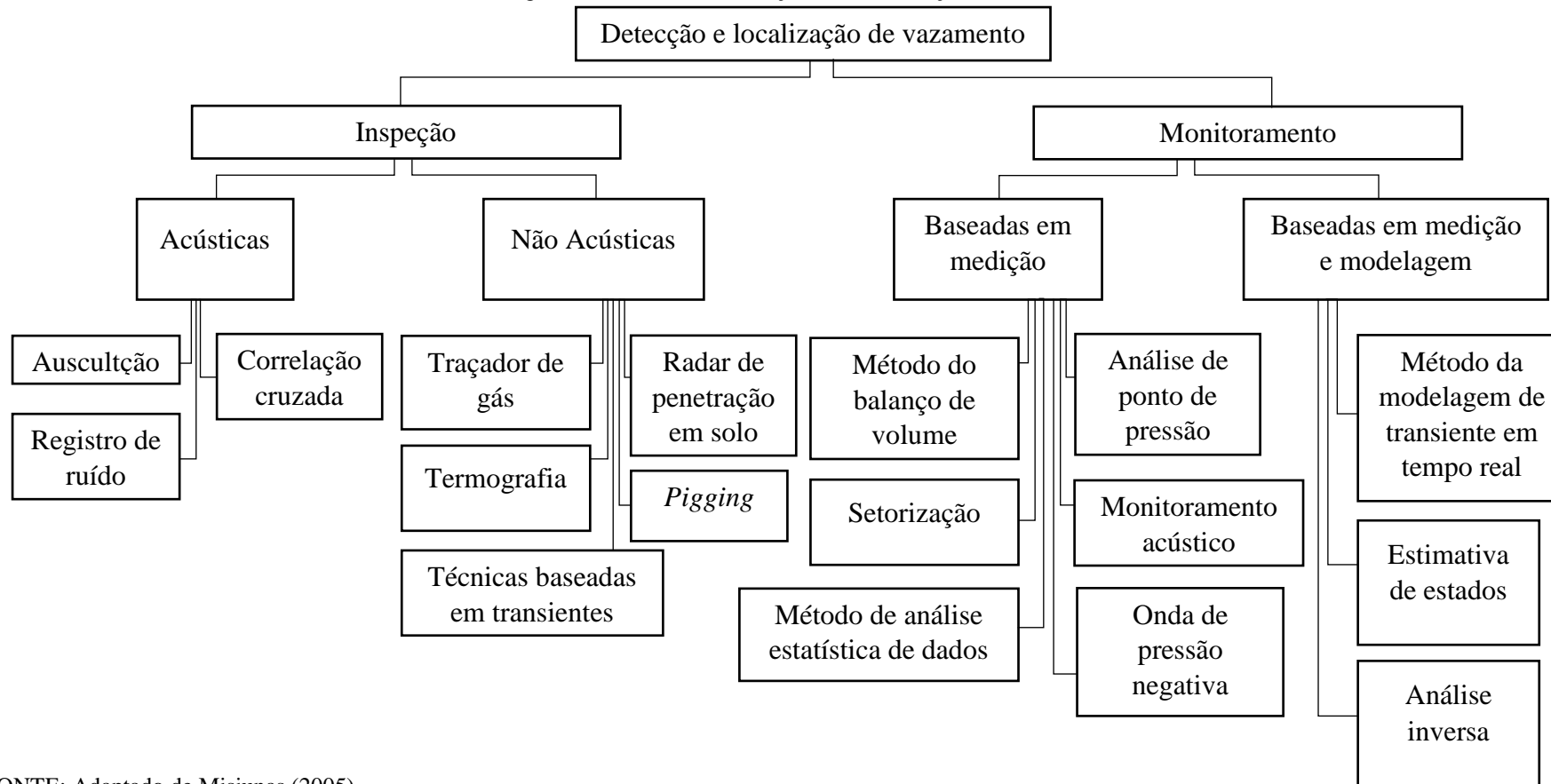
FONTE: Adaptado de IWA (2000).

3.1 Métodos de Detecção e Vazamentos

É descrita, a seguir, uma classificação de técnicas de detecção e localização de vazamentos, citando as técnicas mais relevantes desenvolvidas, sem pretender abordar todos os tipos de classificação possíveis. Desta forma, são abordadas as diferentes características das técnicas existentes para a discussão da escolha da técnica empregada neste trabalho.

Em seu trabalho, Misiunas (2005) apresenta uma compilação das principais técnicas ativas de detecção e localização de vazamentos registrados na literatura, o que se sintetiza na Figura 2. É importante salientar que são chamadas técnicas ativas aquelas em que o processo de detecção/localização ocorre de maneira intencional, diferentemente das técnicas passivas que se baseiam na simples observação de sinais evidentes de vazamentos, como por exemplo o surgimento de água em pontos específicos de uma via urbana em dias secos. Apresentam-se, na Figura 2, as técnicas seguidas de breve explicação de seus modos de funcionamento:

Figura 2 - Técnicas de detecção e/ou localização de vazamentos.



FONTE: Adaptado de Misiunas (2005).

Misiunas (2005) subdivide os métodos ativos de detecção e localização de vazamentos em inspeção e monitoramento. As técnicas de inspeção são definidas pela busca por vazamentos por um período determinado de tempo e são aplicadas em parte ou na totalidade da rede estudada. São exemplos de técnicas de inspeção as técnicas auscultação e termografia. Já as técnicas de monitoramento, geralmente ocorrem de maneira ininterrupta após a instalação do sistema de detecção/localização de vazamentos. São metodologias que, uma vez implementadas, produzem dados continuamente para o monitoramento da rede estudada.

1. Auscultação - *Listening*: trata-se de uma técnica pioneira, baseada na detecção do sinal sonoro emitido por um vazamento através de um orifício na tubulação sob pressão. Naturalmente, é aplicada localmente, sendo a busca restrita a um trecho de tubulação por vez.
2. Registro de ruído – *Noise Logging*: também baseada em sinal sonoro emitido pelo vazamento na tubulação. Instalam-se sensores acústicos adjacentes à tubulação possibilitando assim o monitoramento. Aqui sim, tem-se um exemplo de técnica que pode ser implementada em um período de tempo determinado ou permanentemente.
3. Correlação cruzada – *Cross correlation*: ainda lançando mão da busca por vazamentos com base em sinais sonoros, a correlação cruzada oferece possibilidade de localização do vazamento com maior precisão. Isso se dá ao fato de se utilizarem dois sensores para detectar o sinal sonoro do vazamento, um a montante outro a jusante do trecho estudado. Com estes sinais processados, obtém-se uma função de correlação que, caso exista um vazamento no trecho, apresentará um comportamento distinto. Além disso, a partir da defasagem dos sinais captados também é possível estimar a posição do vazamento no trecho.
4. Traçador de gás – *Tracer gas*: também utilizada localmente em cada trecho da rede de distribuição estudada, esta técnica é empregada através da detecção de vazamentos de gás da tubulação estudada por um detector de gás localizado na superfície do solo onde está o trecho de tubulação. É injetado um volume de gás na tubulação isolada e se houver algum vazamento de gás, será detectado.
5. Termografia - *Thermography*: o princípio de funcionamento desta técnica se baseia na detecção de queda pontual de temperatura ao longo do trecho estudado, esta queda indica o vazamento buscado. Com o uso de uma câmera infravermelha, o solo na

região da tubulação é escaneada ao longo do comprimento do trecho. Assim pontos de queda de temperatura indicam a presença de água proveniente de vazamentos.

6. Radar de penetração em solo - *Ground Penetrating Radar*: técnica aplicada localmente a cada trecho retilíneo de tubulação, está fundamentada no reconhecimento de perturbações das propriedades dielétricas do solo adjacente à tubulação. Perturbações estas causadas pela presença de água proveniente de vazamentos. A ferramenta de medição é o GPR que, através de uma configuração de sensores alinhados ao longo do comprimento do solo, produz pulsos de ondas de rádio que se comportam de maneiras diversas dependendo das propriedades do solo. Produz-se um perfil do alinhamento estudado e as regiões mais discrepantes podem ser consideradas regiões de provável vazamento.
7. *Pigging*: as técnicas baseadas em *Pigging* se caracterizam pela inserção de um dispositivo (*Pig*) no interior da rede para a localização de vazamentos. Também aplicada trecho a trecho, a técnica consiste no monitoramento do interior da tubulação através de um sensor sonoro.

Dando continuidade à classificação proposta por Misiunas (2005) apresentam-se a seguir as técnicas baseadas em eventos transientes hidráulicos. Tratam-se de técnicas que trabalham com informações obtidas durante eventos com fenômenos hidráulicos em regime não permanente.

1. Método de reflexão de vazamento - *Leak reflection method*: técnica baseada na interpretação de sinais de pressão durante um evento transiente gerado intencionalmente. A velocidade da onda de pressão gerada em um dado evento pode chegar a 1000 m/s, esta onda, ao se deparar com um vazamento em um determinado trecho de tubulação, é parcialmente refletida. Com isso, a análise destes dados de pressão gerado e refletido podem ser utilizados para detecção/localização de vazamentos.
2. Análise do transiente inverso - *Inverse transient analysis*: esta técnica também faz uso de dados de pressão coletados durante um evento transiente gerado. A metodologia utilizada emprega os dados coletados em um modelo hidráulico através de uma análise inversa. Ou seja, é aplicada uma regressão matemática entre dados obtidos em campo e dados produzidos por modelagem a fim de se estimarem as localizações dos vazamentos.
3. Análise de resposta ao impulso - *Impulse response analysis*: técnica aplicada

especificamente em trechos experimentais de tubulação, é baseada na comparação do amortecimento da onda transiente de pressão nas situações com e sem vazamento. O amortecimento citado é gerado pelo cisalhamento entre a água e as paredes do tubo e, notadamente, pela presença de vazamento. Há grande dependência da precisão da localização do vazamento em relação à distância de discretização do trecho estudado para a instalação dos sensores.

4. Método do amortecimento de transiente - *Transient damping method*: o ponto principal da técnica é o desenvolvimento analítico de um método de detecção e localização de vazamento. Um resultado obtido por Wang *et al.* (2002) descreve analiticamente o comportamento da onda transiente como exatamente exponencial, diferentemente do caso em que há ocorrência de vazamento. Tal diferenciação aliada com o equacionamento analítico possibilita a detecção e localização de vazamentos.
5. Análise da respostas no domínio da frequência - *Frequency domain response analysis (FDR)*: trata-se de uma técnica baseada na comparação das frequências de onda transiente apresentadas por tubulações com e sem vazamentos. A comparação entre frequências dominantes entre tubulações que apresentam e não apresentam vazamentos possibilitam a determinação dos locais e ocorrência de vazamentos.

Apresentam-se agora as técnicas de monitoramento catalogadas por Misiunas (2005). São técnicas em que o período de captura dos dados é significativamente grande, deixando de se tratar de um período pontual, como era considerado nas técnicas de inspeção apresentadas até agora. Dentro das técnicas de monitoramento há uma subdivisão entre técnicas baseadas em medição e técnicas baseadas em modelagem. Dentre as técnicas de monitoramento baseadas em medição apresentam-se:

1. Monitoramento acústico - *Acoustic Monitoring*: já apresentada como técnica de inspeção, pode ser empregada como técnica de monitoramento contínuo. As diferenças apresentadas na execução desta técnica estão na implementação de um sistema automático e em tempo real de alarme de vazamentos ao longo da rede estudada. Além disso, tem-se que o custo gerado pela implantação da estrutura de monitoramento pode ser mais facilmente compensada com a grande quantidade de vazamentos detectados ao longo do período de monitoramento.
2. Método do balanço de volume - *Volume balance method*: técnica baseada no princípio de conservação de massa de um sistema. A técnica é aplicada em trechos da rede estudada com a instalação de sensores de vazão. Desta forma é possível efetuar

obalço de massa representado pela Equação 1:

$$BV = V_e - V_s - \Delta V \quad (1)$$

Tem-se: ΔV Volume de água contido no trecho de tubulação estudado; V_e o volume de água que entra no trecho estudado ao longo de um dado intervalo de tempo; V_s o volume que sai do trecho estudado ao longo do mesmo intervalo de tempo e BV balanço de volume calculado. Pode ser nulo, indicando que não há dissipação do volume de água (vazamento) ou pode ser positivo indicando a existência de vazamento. Naturalmente, dada a configuração da técnica, o resultado do processo se limita à detecção e localização parcial do vazamento. Uma vez realizada a detecção, é necessária uma técnica adicional para a localização exata do vazamento.

3. Análise de ponto de pressão - *Pressure-point analysis*: o método de funcionamento desta técnica se baseia na análise de dados de pressão ao longo do período de funcionamento da rede estudada. Mais especificamente tem-se a detecção de diminuição do valor de pressão hidráulica monitorada em pontos específicos da rede. São calculadas médias e desvios padrão dos valores de pressão obtidos. Comparando-se dados recentes com dados mais antigos, pode-se identificar a ocorrência de um vazamento na região próxima ao local de coleta do dado de pressão.
4. Onda de pressão negativa - *Negative pressure wave*: trata-se de técnica baseada na identificação da chegada da onda transiente em diversos pontos onde estão localizados medidores de pressão. Uma vez iniciado o vazamento, sua interferência em diversos medidores de pressão são comparados para a determinação do local do vazamento.
5. Método de análise estatística de dados - *Statistical data analysis-based method*: o método consiste na análise estatística e da modelagem de dados obtidos em um determinado trecho de tubulação estudado. São instalados medidores de pressão nas extremidades da tubulação que irão produzir uma sequência de dados para a modelagem do fenômeno e a detecção ou não de vazamentos através de testes no modelo.
6. Setorização - *District meter areas*: esta técnica está intimamente ligada com as características topológicas da rede estudada. Na verdade trata-se de uma estratégia de subdivisão da rede de distribuição em setores isolados para facilitar o monitoramento e a operação. Uma vez delimitados os setores, estes funcionam como redes menos complexas que podem ser analisadas separadamente para a detecção e localização de

perdas. Especificamente, a técnica em questão se baseia na análise de dados de pressão e/ou vazão coletados em pontos da extremidade do setor para serem analisados em busca de vazamentos (detecção e localização). Uma forma de aplicação desta técnica se dá pela prospecção realizada com dados obtidos no período noturno. Isso se dá pela diminuição expressiva do consumo e, conseqüentemente, pelo aumento sensível nas pressões da rede, o que pode evidenciar a existência de eventuais vazamentos.

A partir deste ponto, são citadas outras técnicas de detecção e/ou localização de vazamentos citadas por Misiunas (2005). Estas fazem parte do grupo das técnicas de monitoramento baseadas em modelagem matemática. São técnicas que conjugam modelagem hidráulica do sistema com dados obtidos de medições em campo.

1. Método de modelagem de transiente em tempo real - *de Real-time transient model-based method*: esta técnica retoma a análise de eventos transientes juntamente com a modelagem da rede de distribuição de água. Notadamente, é necessária a obtenção de várias informações para que o processo de modelagem matemática resulte confiável. Além disso dadas as incertezas das características do sistema, é necessário o processo de calibração do modelo obtido. Aditivamente, nesta técnica, a análise dos dados é feita instantaneamente após sua coleta.
2. Análise inversa em regime permanente - *Steady-state inverse analysis*: nesta metodologia o ponto fundamental é a utilização de dados de pressão ou vazão para a modelagem do sistema sem a aplicação de eventos transientes. A partir da variação de pressão e vazão ao longo do período de coleta de dados são comparados dados simulados e medidos em campo para a estimativa dos vazamentos representados por orifícios de diâmetros a serem determinados. Vale a pena citar a necessidade fundamental de se obterem valores confiáveis de rugosidade das tubulações e de consumos de água para a modelagem do problema.
3. Análise inversa de transiente - *Inverse transient analysis*: aplica-se a modelagem inversa para a detecção de vazamentos em situações de regime não permanente. Ou seja, a partir de dados de vazão e pressão, se obtém os parâmetros de interesse para o modelo. Nesta metodologia proposta foi possível a calibração dos parâmetros modelados, juntamente com a detecção de vazamentos.

Outras técnicas empregadas são citadas por Misiunas (2005) com metodologias de estimativa de estados que não se enquadram especificamente na classificação anterior. Tratam-se de técnicas empregadas para a correta estimativa das variáveis que descrevem o

funcionamento do sistema em estudo, podendo ser pressões nos nós, velocidades nos tubos, por exemplo. As técnicas desta classificação podem ou não apresentar a detecção e localização de vazamentos como parte de seu escopo. Apresentam-se:

1. Filtro de Kalman estendido - *Extended Kalman Filter*; técnica desenvolvida para sistemas modelados com equações não lineares, é empregada a partir da comparação entre dados de campo e dados modelados. Pode ser utilizada na detecção e localização de vazamentos sendo estes modelados como orifícios presentes ou não nos nós da rede estudada.
2. Mínimos quadrados ponderados - *Weighted least squares*: trata-se de uma metodologia de detecção e localização de vazamentos baseada na minimização de uma função objetivo relacionada com os erros entre dados medidos e simulados. Sendo que tal minimização se dá através da metodologia de mínimos quadrados.

Dentre as técnicas apresentadas anteriormente é possível fazer uma diferenciação quanto à escala do sistema analisado no processo de detecção e /ou localização de vazamentos. Há técnicas que são aplicadas pontualmente em trechos específicos de tubulação com uma quantidade significativa de sensores para o comprimento de tubulação estudado. Há também as técnicas que são aplicadas com dados de um sistema complexo (rede) de distribuição, sendo real ou simulado. Ou seja, são técnicas que lidam com um modelo do sistema estudado, representando matematicamente os fenômenos hidráulicos que ocorrem na rede de distribuição de água.

Quando se comparam estes dois tipos de técnicas de detecção e localização de vazamentos, dois principais pontos são relevantes quanto a decisão de qual delas é mais indicado para ser utilizado. Primeiramente, fala-se propriamente na escala de atuação das técnicas. Isto é, qual a escala de análise é a mais indicada: a escala local, aplicada a um único trecho de tubulação, ou escala geral, que corresponde a se trabalhar com um dado sistema de distribuição de água com todos seus componentes hidráulicos. O outro ponto relevante na escolha de qual tipo de técnica deve ser aplicado para a detecção e localização de vazamentos é a precisão do resultado obtido. Naturalmente, as técnicas pontuais aplicadas apresentam maior precisão ao serem aplicadas, dado o fato de que o sistema analisado é composto por apenas um trecho de tubulação. De maneira diferente, com as técnicas gerais de detecção e localização a precisão obtida tende a ser menor, isso porque a quantidade de variáveis envolvidas no processo é substancialmente maior.

Dado o que foi exposto anteriormente através da listagem das técnicas de detecção e/ou localização apresentadas na literatura, opta-se, neste trabalho, pelo estudo de técnicas que, avaliem a rede de distribuição de forma geral, não apenas trecho a trecho. Estas técnicas são também amplamente estudadas resultando em diversas metodologias com características distintas.

3.2 Ferramenta de Modelagem

O EPANET foi utilizado neste trabalho por apresentar características relevantes à execução da metodologia. Trata-se de um software gratuito desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency*, com ampla utilização em trabalhos acadêmicos. Entre outras funções, realiza-se a modelagem hidráulica de sistemas de distribuição de água.

A modelagem hidráulica é aplicada de acordo com a consideração dos dois princípios físicos básicos de equilíbrio do sistema: a conservação de energia e de massa (equação da continuidade). De acordo com o manual do EPANET (ROSSMAN *et al.*, 2000) tal processo é calculado iterativamente a partir do Método do Gradiente. As iterações de cálculo empregando nas simulações se baseiam na resolução das Equações 2 e 3:

$$A * H = F \quad (2)$$

Em que:

A =matriz Jacobiana (derivadas parciais da perda de carga em cada trecho).

H =vetor de incógnitas de cotas piezométricas.

F =vetor de termos referentes ao balanço de vazão (entrada, saída, consumos e fator de correção de vazão).

$$Q_{ij} = Q_{ij} - (y_{ij} - d_{ij}(h_i - h_j)) \quad (3)$$

Em que:

Q_{ij} = vazão no trecho entre os nós i e j .

y = fator de correção de vazão.

d = derivada da expressão da perda de carga em relação à vazão (termo da matriz A).

h = altura piezométrica em um nó (termo do vetor H).

A modelagem do vazamento é realizada incluindo-se um consumo proporcional à cota piezométrica em um dado nó. Matematicamente, a modelagem é feita através da seguinte equação:

$$Q = c * h^\alpha \quad (4)$$

Em que:

Q = vazão de vazamento.
 c = coeficiente de vazamento (emitter).
 α = expoente de vazamento.

3.3 Aplicação de Técnicas Baseadas em Filtro de Kalman para Localização de Vazamentos

O Filtro de Kalman foi aplicado em diversas propostas de trabalho, dada sua versatilidade. Desta forma, são notáveis os trabalhos apresentados que demonstram o emprego de variações do Filtro de Kalman aplicadas na detecção e/ou localização de vazamentos. Ressalta-se que a utilização destas técnicas se justifica inicialmente pelo fato de que o tipo de problema abordado se trata da previsão de variáveis de estado acrescido da estimação de parâmetros. Ou seja, a ferramenta matemática em questão foi proposta inicialmente para previsão de variáveis como vazão e pressão e, além disso, foi agregada a técnica de estimativa de parâmetros, como os vazamentos propriamente, o que será detalhado mais adiante.

Um dos trabalhos pioneiros no emprego de derivações do Filtro de Kalman em redes de distribuição de água com objetivo de redução de perdas de água por vazamentos foi o de Ye e Fenner (2011). A partir do tratamento (filtragem) dos dados temporais, são aplicadas metodologias de detecção de vazamento baseadas na variação dos dados simulados e medidos. Esse trabalho apresenta a aplicação de sua metodologia em uma rede real com dados de vazão ou pressão em pontos determinados.

No mesmo trabalho, é interessante salientar que são analisados ou o comportamento dos dados de pressão ou dos dados de vazão. Em suma uma variação brusca no valor dos dados medidos indica a possibilidade de ocorrência de vazamento. Como conclusão, é apresentado que vazamentos repentinos são mais propensos a serem detectados do que aqueles que já ocorrem de maneira estável dentro do sistema de distribuição.

Outro trabalho que trata da detecção de vazamentos é o de Jung e Lansey (2013) que a partir de uma técnica baseada em modelagem propõe a aplicação do *Extended Kalman Filter* para a estimação de demandas de água e detecção de vazamentos com base apenas em dados de vazão aferidos ao longo da rede. O trabalho em questão foi aplicado em uma rede real de distribuição de água e um de seus principais resultados foi a possibilidade de detecção de vazamentos mesmo em casos em que as condições de operação da rede se modificam. Nesse caso, por exemplo, foi inserido no modelo o processo de fechamento de uma válvula hidráulica presente no sistema.

Outro ponto importante neste mesmo trabalho foi a possibilidade de, durante a manobra de fechamento de válvula, ao longo do período de operação do sistema, não serem dados falsos alarmes de vazamentos pelo filtro. A técnica foi considerada aplicável para os propósitos indicados no trabalho e foram indicadas possíveis oportunidades de estudo de outras manobras de operação da rede como abertura e fechamento de reservatório e a operação de bombas hidráulicas.

Outro trabalho com uso de derivação do Filtro de Kalman na detecção de vazamentos é o de Choi *et al.* (2016) no qual é desenvolvido um método de detecção de vazamentos em tempo real com o Filtro de Kalman de Ye e Fenner (2011) para o estudo do intervalo de amostragem no processo de detecção de vazamentos. No mesmo trabalho é proposto um novo algoritmo de amostragem baseado nos valores residuais de vazão ao longo do tempo. Ou seja, de maneira resumida, o intervalo de tempo entre produção de dados de amostragem varia de acordo com os valores de vazão obtidos após a filtragem. O modelo construído se refere à topologia de uma rede real com curva de demanda criada artificialmente. O Filtro de Kalman é aplicado com dados de vazão para o processo de filtragem e o cálculo de vazões residuais como a diferença entre vazão estimada e medida. Tal residual, ao longo do processo de medição pode indicar ocorrência de vazamento de acordo com seus valores assumidos. Como resultados, foram comprovados a eficiência do algoritmo, bem como a acurácia do processo de detecção de vazamento dada a aplicação da metodologia.

O trabalho de Khalilabad *et al.* (2018) apresenta a aplicação do *Extended Kalman Filter* como ferramenta matemática de detecção e localização de vazamentos em uma rede real de distribuição de água, dada a característica de não linearidade do problema abordado. Comparam-se *Non-linear Kalman Filter* com *Extended Kalman Filter* em relação à detecção e localização de vazamentos de mesma magnitude. Como resultado declara-se que o *Extended Kalman Filter* estima a localização e magnitude dos vazamentos com maior eficiência.

Têm-se os vários trabalhos feitos sobre a temática de estudos de sistemas de monitoramento computacional de tubulações de distribuição de água com o uso de técnicas baseadas no uso do Filtro de Kalman ou seus derivados. Torres *et al.* (2014) apresenta uma compilação feita de vários trabalhos publicados neste contexto, demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Trabalhos relacionados ao KF e metodologias derivadas em tubulações de distribuição de água.

Referência	Título	Tipo de perda	Teste	Tipo de Filtro
Tao e Fang (1988a)	<i>Robust observer design for a fluid pipeline</i>	NA*	Simulação, Laboratório	<i>Kalman Filter</i>
Verde (2000)	<i>Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines</i>	Vazamentos simultâneos	Simulação, Laboratório	<i>Kalman Filter</i>
Emara-Shabaik et al. (2002)	<i>A non-linear multiple-model state estimation scheme for pipeline leak detection and isolation</i>	Único Vazamento	Simulação	<i>Modified Extended Kalman Filter</i>
Verde (2004)	<i>Minimal order nonlinear observer for leak detection</i>	Vazamentos simultâneos	Simulação, Laboratório	<i>Nonlinear Kalman Filter</i>
Verde e Visairo (2004)	<i>Identifiability of multi-leaks in a pipeline</i>	Vazamentos simultâneos	Simulação, Laboratório	<i>Extended Kalman Filter</i>
Kurtis (2007)	<i>Leak detection in pipelines using the extended Kalman filter and the extended boundary approach</i>	Vazamentos simultâneos	Simulação, Laboratório	<i>Extended Kalman Filter</i>
Besancon et al. (2007)	<i>Direct observer design for leak detection and estimation in pipelines</i>	Vazamentos Simultâneos	Simulação	<i>Extended Kalman Filter</i>
Begovich et al. (2017)	<i>Comparison of two detection algorithms for pipeline leaks</i>	Único Vazamento	Laboratório	<i>Extended Kalman Filter</i>
Torres et al (2008)	<i>A collocation model for water-hammer dynamics with application to leak detection</i>	Único, sequencial e simultâneos	Simulação	<i>Extended Kalman Filter</i>
Continua				

Referência	Título	Tipo de perda	Teste	Tipo de Filtro
Torres <i>et al.</i> (2014)	<i>Collocation modeling with experimental validation for pipeline dynamics and application to transient data estimations</i>	Único, sequencial	Laboratório	<i>Extended Kalman Filter</i>
Navarro <i>et al.</i> (2017)	<i>Real-time leak isolation based on state estimation in a plastic pipeline</i>	Vazamento único	Laboratório	<i>Extended Kalman Filter</i>
Navarro <i>et al.</i> (2011)	<i>Calibration of fitting loss coefficients for modelling purpose of a plastic pipeline</i>	NA	Laboratório	<i>Extended Kalman Filter</i>
Pizano-Moreno e Begovich (2012)	<i>Leak isolation with temperature compensation in pipelines</i>	Único vazamento	Laboratório	<i>Extended Kalman Filter</i>
Padilla e Begovich (2012)	<i>Real-time leak isolation based on a fault model approach algorithm in a water pipeline prototype</i>	Único Vazamento	Laboratório	<i>Extended Kalman Filter</i>
Guillen <i>et al.</i> (2014)	<i>Leak detection and location based on improved pipe model and nonlinear observer</i>	Único Vazamento	Simulação, Laboratório	<i>Extended Kalman Filter</i>
Tian e Wang (2014)	<i>Design and realization of the Kalman filter based on LabVIEW</i>	NA	Simulação	<i>Kalman Filter</i>
Continua				

Referência	Título	Tipo de perda	Teste	Tipo de Filtro
Delgado-Aguiñaga e Begovich (2017)	<i>Water Leak diagnosis in pressurized pipelines: a real case study</i>	Único Vazamento	Laboratório	<i>Extended Kalman Filter</i>
Navarro et al. (2017)	<i>Real-Time Leak Isolation Based on State Estimation with Fitting Loss Coefficient Calibration in a Plastic Pipeline</i>	Único Vazamento	Laboratório	<i>Extended Kalman Filter</i>
Santos-Ruiz et al. (2018)	<i>Online leak diagnosis in pipelines using an EKF-based and steady-state mixed approach</i>	Único vazamento	Laboratório	<i>Extended Kalman Filter</i>
Delgado-Aguiñaga e Besançon (2018)	<i>EKF-based leak diagnosis schemes for pipeline networks</i>	Único vazamento	Laboratório	<i>Extended Kalman Filter</i>
Liu et al. (2018)	<i>Multi-leak diagnosis and isolation in oil pipelines based on Unscented Kalman filter</i>	Único Vazamento	Simulação	<i>Unscented Kalman Filter</i>

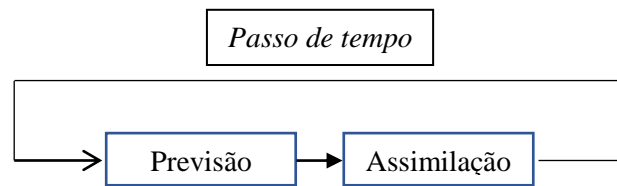
FONTE: adaptado de Torres et al. (2014)

3.4 Filtro de Kalman

O Filtro de Kalman se trata de uma ferramenta matemática desenvolvida para lidar com problemas de assimilação de dados. O processo de aplicação se baseia na assimilação de dados aleatórios e na utilização de equações de transição para modelagem de sistemas dinâmicos. Ou seja, esta ferramenta se destina à filtragem e assimilação de dados que apresentam ruído, combinada com a utilização de equações de transição para a estimativa de variáveis de estado através de dados assimilados. Uma particularidade da proposição original do filtro é a de considerar que os dados a serem assimilados apresentam ruídos de medição brancos. Isto é a distribuição de probabilidade dos ruídos dos dados de medição é gaussiana.

O filtro, por se tratar de uma ferramenta de assimilação de dados coletados ao longo de um intervalo de tempo, tem na sua aplicação um processo repetitivo para a assimilação dos dados. Assim, em sua implementação computacional, o filtro é organizado como um algoritmo que se repete a cada passo de tempo. Além disso, o filtro pode ser subdividido em duas etapas dentro de cada passo de tempo. Tem-se as etapas de previsão e assimilação, de acordo com a Figura 4:

Figura 4 - Representação do ciclo de funcionamento do Filtro de Kalman.



FONTE: Autor (2020)

Durante a etapa de previsão, as equações de transição são aplicadas com os dados obtidos do passo anterior (ou do passo inicial na primeira iteração) para a previsão dos dados do passo de tempo em questão. Ou seja, as equações de transição permitem a modelagem de processos variantes com o tempo. Já ao longo da etapa de assimilação, em suma, os dados previstos são comparados com os dados medidos. Os dados assimilados são compostos de uma ponderação entre previsão e medição. De acordo com Ruzza (2017), apresentam-se as Equações 5 e 6 relativas à etapa de previsão:

$$\mathbf{x}_{t_i}^p = \mathbf{A}\mathbf{x}_{t_i-1}^a + \mathbf{e}_{1t_i} \quad (5)$$

$$\mathbf{p}_{t_i}^p = \mathbf{A}\mathbf{p}_{t_i-1}^a\mathbf{A}^T + \mathbf{W}_{t_i} \quad (6)$$

Em que:

\mathbf{x}^a : Vetor de estados assimilados.

\mathbf{x}^p : Vetor de estados previstos.

\mathbf{A} : Matriz de transição.

\mathbf{e}_1 : Vetor de erros inerentes ao processo de modelagem.

\mathbf{W} : Matriz de covariância do vetor de erros de modelagem.

\mathbf{p}^p : matriz de covariância do vetor de estados previstos

\mathbf{p}^a : matriz de covariância do vetor de estados assimilados

t_i : passo de tempo em análise.

Detalhando-se a etapa de previsão, as equações apresentadas podem ser descritas de acordo com sua função. De maneira prática as Equações 5 e 6 representam a utilização de um determinado modelo para o cálculo das variáveis de estado no próximo passo de tempo, não

sendo, necessariamente, calculados os erros inerentes ao processo. A Equação 5 representa a etapa de previsão do vetor de estados. A matriz A é responsável por relacionar vetores de estados consecutivos. A Equação 6 simboliza o cálculo da covariância do vetor de estados previsto a partir da matriz de covariância da iteração anterior. De maneira geral, esta matriz p representa a incerteza da estimativa realizada. De acordo com Ruzza (2017), são apresentadas as Equações 7, 8, 9 e 10 que se referem à etapa de assimilação.

$$z_{t_i}^m = Mx_{t_i} + e_{2t_i} \quad (7)$$

$$K_{t_i} = p_{t_i}^p M^T (M p_{t_i}^p M^T + R_{t_i})^{-1} \quad (8)$$

$$x_{t_i}^a = x_{t_i}^p + K_{t_i} (z_{t_i}^m - Mx_{t_i}^p) \quad (9)$$

$$p_{t_i}^a = (I - K_{t_i} M) p_{t_i}^p \quad (10)$$

Em que:

z^m : Vetor de medições.

M : Matriz de medição.

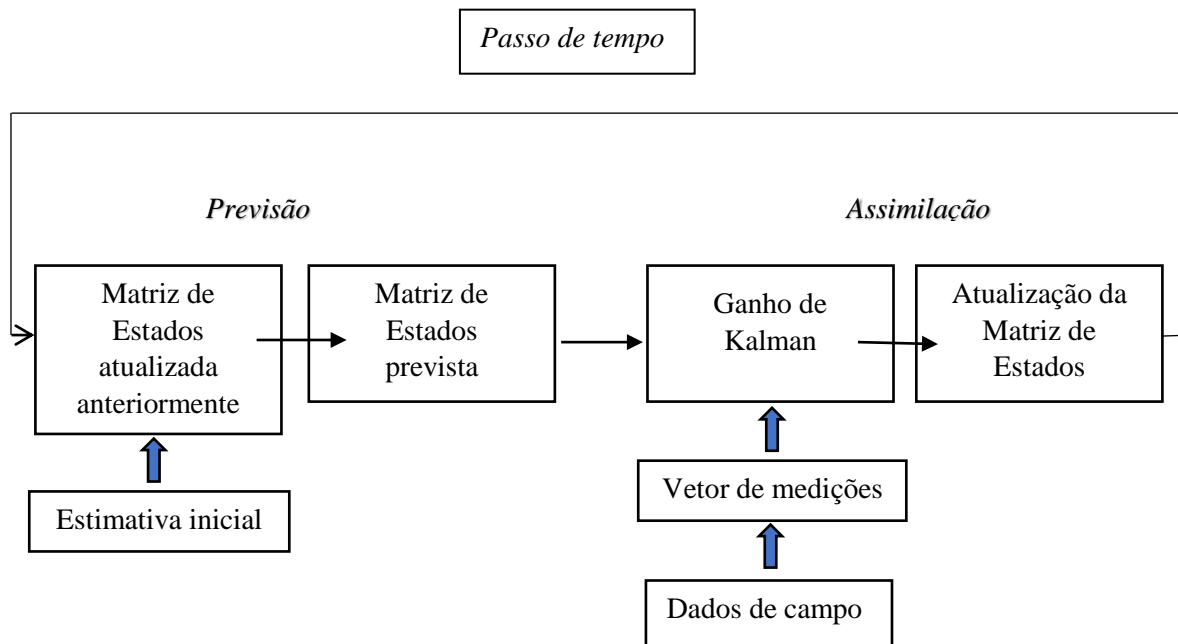
e_2 : Vetor de erros inerentes à medição.

K : Ganho de Kalman.

R : Matriz de covariância das medições.

Dentro da etapa de assimilação, a Equação 7 demonstra o vetor de grandezas observadas composto pelo vetor de estados observado, a matriz e a incerteza da medição. A Equação 8 demonstra o cálculo do Ganho de Kalman que, de maneira simplificada, é usado para determinar quanto do novo dado medido é utilizado para atualizar a nova estimativa. A matriz M relaciona a matriz de covariância do vetor de estados (p) com a matriz de covariância de medições (R), compatibilizando as dimensões de p para a operação de divisão por R . A matriz M é esparsa composta de zeros e de uns na mesma coluna em que o dado de medição aparece no vetor de estados. Através da Equação 9, o vetor de estados é atualizado através da soma ponderada entre o vetor de estado previsto e a inovação. Entende-se inovação como a diferença entre o vetor de estados previsto e do vetor de grandezas observadas. Após o chamado passo de assimilação de dados da Equação 9, atualiza-se o a matriz de covariância dos estados pela Equação 10. Para melhor interpretação, a Figura 5 esquematiza as diferentes etapas do filtro:

Figura 5 - Representação das etapas do Filtro de Kalman.



FONTE: Autor (2020).

3.5 Variações do Kalman Filter

Dada a versatilidade de implementação da ferramenta em questão para diferentes tipos de dados, surgiram, ao longo do tempo, diversas propostas do *Kalman Filter* a diferentes tipos de problemas como, por exemplo, navegação assistida por *GPS* (HIDE; MOORE; SMITH, 2003) e automação robótica (CHEN, 2012).

Algumas variações de *KF* foram desenvolvidas no intuito de se lidar com modelos que apresentam equações não lineares dos fenômenos estudados. Um desses exemplos é o *Extended Kalman Filter (EKF)* que, em suma, se assemelha ao *KF*, exceto pelo cálculo do Jacobiano da matriz dinâmica para sanar a necessidade de linearização.

De acordo com Bragalli *et al.* (2016), o uso do *EKF* para assimilação de dados leva a resultados não satisfatórios, uma vez que gera estimativas não ótimas que podem resultar na divergência do processo da assimilação de dados.

3.6 Ensemble Kalman Filter

A proposição do EnKF (Evensen, 1994, 2003) foi motivada por algumas limitações na metodologia do *EKF* (Jazwinsky, 1970). A primeira limitação diz respeito a um processo de linearização feito na equação de covariância que foi considerado inválido em alguns

exemplos de aplicação. A segunda se relaciona com dificuldades na realização de cálculos repetidos da matriz de covariância a cada iteração.

A principal diferenciação na metodologia do *EnKF* é a representação estatística do fenômeno estudado a partir do método de Monte Carlo. Isto é, um conjunto (*Ensemble*) de realizações de determinado fenômeno pode ser utilizado para estimar o comportamento da função de densidade de probabilidade real deste mesmo fenômeno em questão (EVENSEN, 1994). Assim, as limitações das metodologias anteriores são atenuadas.

O emprego do método Monte Carlo dentro da metodologia do *EnKF* se faz através da substituição do vetor de estados pela matriz de estados composta por um conjunto de vetores criados a partir de uma estimativa inicial criada anteriormente ao processo de assimilação de dados. Assim como proposto por *Burgers et al.* (1998), a distribuição de probabilidade utilizada na geração dos vetores é normal. A Figura 6 representa a estrutura da matriz de estados.

Figura 6 - Representação da matriz de estados (*ensemble*).

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & \dots & x_{1,nvar} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & \dots & x_{2,nvar} \\ x_{3,1} & x_{3,2} & x_{3,3} & \dots & x_{3,nvar} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{NME,1} & x_{NME,2} & x_{NME,3} & \dots & x_{NME,nvar} \end{bmatrix}$$

Em que:

NME: Número de membros do Ensemble.

nvar: número de variáveis estudadas (estados).

FONTE: Autor (2020).

A formulação do *EnKF* se assemelha à do *KF* demonstrada anteriormente, exceto pelas modificações apresentadas no cálculo da matriz de covariância dos estados. É proposta na metodologia, um modo de se simplificar o cálculo da matriz de covariância. Diferentemente da metodologia do *EKF*, é eleito um conjunto (*ensemble*) de vetores de estado para que o cálculo da matriz de covariância seja suficientemente próximo da matriz que seria calculada para todo o conjunto de dados. Define-se a equação de obtenção da matriz de covariância dos estados na Equação 11:

$$P^p = \langle (X^p - X) * (X^p - X)^T \rangle \quad (11)$$

Em que:

X: Matriz de estados reais (*ensemble*).

X^p: Matriz de estados previstos.

P^p: Matriz de covariância da matriz de estados previstos

$\langle * \rangle$: Operação de convolução.
 $()^T$: Operação de transposição.

A matriz de estados reais X não é conhecida, dados os erros inerentes aos processos de modelagem e medição, e deve ser estimada de acordo com os dados da própria matriz de estados previstos de acordo com a Equação 13. Assim a matriz de covariância P^p é estimada conforme a Equação 12. A nomenclatura de Ruzza (2017) apresenta NME como o Número de Membros do *Ensemble*. Além de me representar o índice de qual membro está sendo referido dentro do grupo ensemble.:

$$P^p \approx \frac{1}{NME-1} \Sigma_{me}^{NME} \left[(X_{me}^p - \bar{X}^p) * (X_{me}^p - \bar{X}^p)^T \right] \quad (12)$$

Define-se, também o vetor de médias \bar{X}^p :

$$\bar{X}^p = \frac{1}{(NME-1)} \Sigma_{me}^{NME} [X_{me}^p] \quad (13)$$

A matriz R de covariância de tem dimensões $NME \times NVMED$ (número de membros do ensemble *versus* número de variáveis medidas). Representando cada variável medida em campo, cada coluna de R tem média igual ao valor medido no passo de tempo analisado e desvio padrão com valor fixo obtido através de considerações físicas relacionadas com a precisão dos instrumentos de medição (RUZZA, 2017).

Uma aplicação do EnKF relacionada com o estudo de redes de distribuição de água foi a de Okeya et al. (2014). Neste trabalho, o EnKF foi utilizado como método de assimilação de dados de pressão e vazão para a estimativa de consumos nodais e variáveis de estado futuros. Foram comparadas duas metodologias: uma com assimilação em tempo real e outra feita com dados históricos. O trabalho permite afirmar que a assimilação de dados online é mais satisfatória pois as condições de estado do sistema são atualizadas, o que minimiza erros nas condições iniciais do modelo.

Em suma, a técnica proposta utiliza o Filtro de Kalman para a estimativa de consumos através do chamado modelo de previsão de consumo de água e comparação com os valores medidos e se existe discrepância entre os dados comparados é detectado o vazamento. O modelo de previsão de consumo de água citado possibilita a análise especificamente de dados de vazão de água como dados de entrada, ou seja, valores de pressão são apenas simulados como dados de saída do modelo. O processo de calibração ocorreu a partir de dados históricos de vazões afluentes e efluentes à rede estudada.

Os vazamentos estimados foram modelados como proporcionais à pressão hidráulica presente no ponto dado e foram locados nos nós da rede de distribuição de água. As métricas de detecção utilizadas para a análise de sensibilidade foram: residual de vazão/pressão; residual de vazão/pressão normalizado; média móvel do residual de vazão/pressão e média móvel normalizada do residual de vazão/pressão, sendo que as métricas que mais se destacaram foram residual de vazão e residual de vazão normalizado. Também foram propostos trabalhos futuros relacionados à quantidade e localização dos sensores utilizados na medição dos dados da rede real

Cita-se outro trabalho que faz uso do EnKF utilizado como método de assimilação de dados. Bragalli et al. (2016) desenvolveram uma metodologia de assimilação de dados com três passos. Uma cadeia de EnKF foi aplicada para assimilar dados de pressão, vazão e demanda a fim de identificarem-se melhores opções de pontos de monitoramento de uma determinada rede, o chamado projeto de amostragem. Foi possível estimar a localização ótima dos sensores, bem como o número e tipo de sensores que compõem a combinação mais eficiente.

Ruzza et al. (2015) propõem uma comparação entre duas técnicas de assimilação de dados baseadas no Filtro de Kalman: *EnKF* e *Ensemble Smoother (ES)* (VAN LEEUWEN AND EVENSEN, 1996) para a estimação das regiões mais prováveis de ocorrência de vazamentos. Em suma a metodologia *ES* atualiza a estimativa de variáveis de estado de todos os passos de tempo anteriores para cada medição realizada. Pela observação dos resultados apresentados, afirma-se que *EnKF* supera *ES* na correta estimativa da distribuição espacial dos vazamentos.

3.7 Matriz de Estados Aumentada com Parâmetros

Logo em sua proposição, o EnKF já tem seu uso com a matriz de estados aumentada como uma possibilidade (EVENSEN, 2003). Trata-se da inserção de parâmetros do sistema na matriz de estados para serem submetidos às mesmas operações ao longo do processo de assimilação de dados. Esta técnica proporciona ao EnKF a possibilidade de ser utilizado para previsão e assimilação de estados e também como técnica de estimativa de parâmetros como, por exemplo, coeficientes de vazamentos. Apresenta-se a representação dos componentes da matriz de estados aumentada na Figura 7:

Figura 7 - Representação da matriz de estados aumentada.

$$XA = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & x_{1,nvar} & x_{1,nvar+1} & \cdots & x_{1,nvar+np\text{ar}} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & x_{2,nvar} & x_{2,nvar+1} & \cdots & x_{2,nvar+np\text{ar}} \\ x_{3,1} & x_{3,2} & x_{3,3} & x_{3,nvar} & x_{3,nvar+1} & \cdots & x_{3,nvar+np\text{ar}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{NME,1} & x_{NME,2} & x_{NME,3} & x_{NME,nvar} & x_{NME,nvar+1} & \cdots & x_{NME,nvar+np\text{ar}} \end{bmatrix}$$

Em que:

XA : Matriz de estados aumentada.

NME : Número de membros do *Ensemble*.

$nvar$: número de variáveis estudadas (estados).

$np\text{ar}$; número de parâmetros.

FONTE: Autor (2020).

4 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho se divide em duas etapas para análise de desempenho da ferramenta proposta. Ambas diferem entre si basicamente pela origem dos dados utilizados nas simulações. Naturalmente, tais etapas serão descritas de modo detalhado ao longo deste capítulo. Assim, apresenta-se um resumo dos métodos empregados, facilitando entendimento do leitor.

A primeira etapa consiste especificamente no processo de análise de desempenho do *EnKF* empregado na detecção de vazamentos. Para tanto, são abordados, nessa primeira etapa, a composição do algoritmo de modelagem e detecção de vazamentos e também a execução das várias realizações do processo de detecção de vazamento, a partir da modificação de parâmetros do modelo. Ainda na primeira etapa, é proposto um método de avaliação do desempenho do processo de detecção de vazamentos.

Já a segunda etapa da metodologia aborda um estudo de caso. Nela foi aplicada uma modelagem da rede estudada para detecção de possíveis vazamentos com dados reais coletados em campo. Ou seja, após a campanha de coleta de dados realizada, o processo é aplicado para a detecção de possíveis vazamentos reais desconhecidos.

Dadas as variações de casos realizados na primeira etapa, serão obtidos diferentes desempenhos do processo de detecção de vazamentos, avaliados de acordo com o método proposto. É possível, assim, a estimativa de confiabilidade dos resultados obtidos após a segunda etapa, caso o problema real se enquadre nas condições requeridas pela região de atuação ótima.

4.1 Rede estudada

A rede escolhida pertence a um condomínio residencial da cidade de São Carlos – SP. Esta possui 154 nós, 228 trechos de tubulação de material PVC com diâmetros conhecidos variando de 50 a 150 milímetros conforme apresentado na Figura 8. Há dois reservatórios geminados de 30,0 metros de altura em relação ao solo e com altura útil de 8,0 metros, podendo atingir 38,0 metros de altura máxima da água em relação ao solo. Os reservatórios são demonstrados na Figura 9. Não existiam, durante o período de monitoramento, infraestrutura de coleta e armazenamento de dados de vazão de saída do reservatório nem de nível d'água no mesmo. Até ao fim do período de coleta de dados existiam apenas cerca de 300 lotes com consumo regular de água. A região estudada apresenta

também uma rede independente de irrigação que, neste trabalho, foi desconsiderada para este estudo, por não estar ativa, uma vez que o período de coleta de dados coincidiu com os meses mais chuvosos do ano, em que a rede não é utilizada.

Figura 8 - Planta do condomínio residencial estudado.



FONTE: Autor (2020).

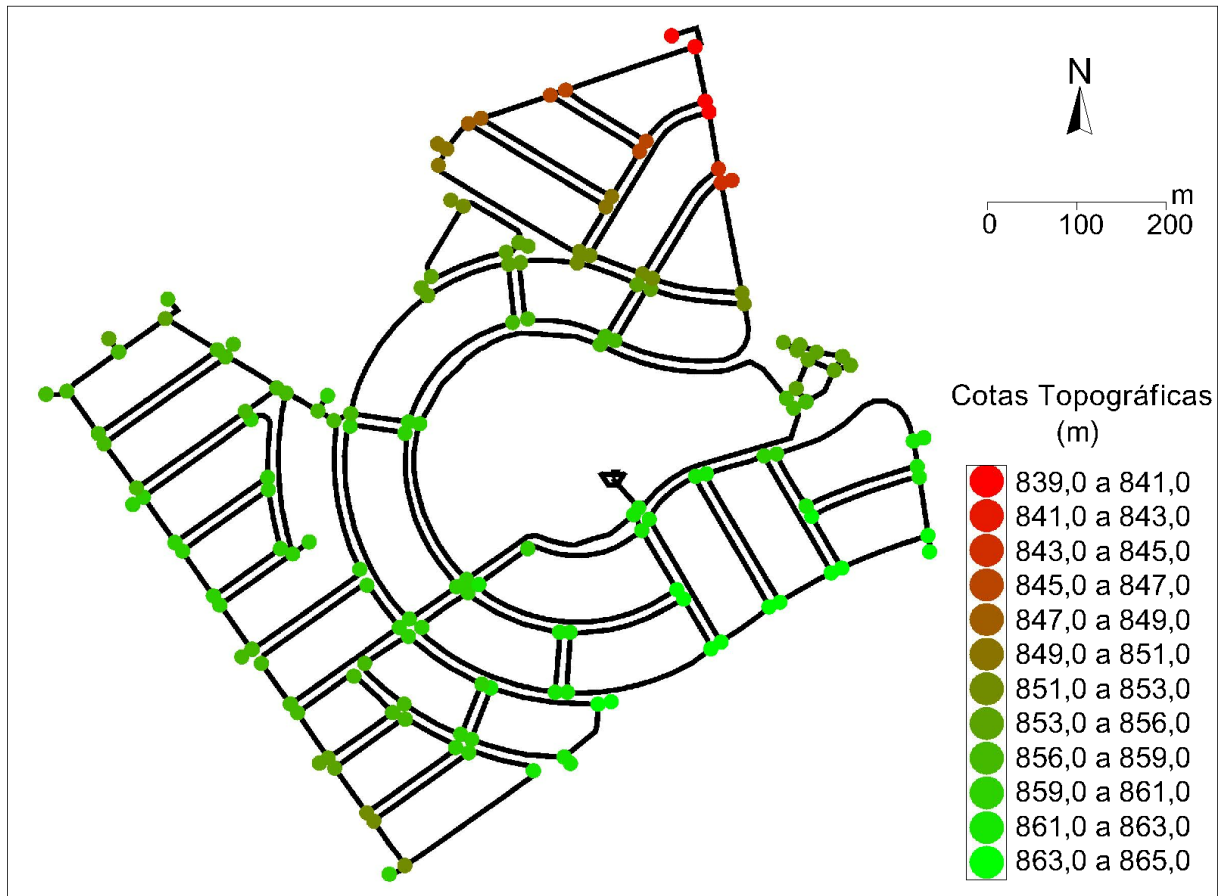
Figura 9 – Reservatórios .



FONTE: Autor (2020).

Figura 10 apresenta o valor das cotas topográficas dos nós da rede. Identificam-se os nós com menores cotas topográficas pelas cores mais quentes e a diferença de cotas topográficas entre o nó mais próximo do reservatório e do nó mais baixo é de aproximadamente 22 metros.

Figura 10 - Intervalos de cotas topográficas dos nós da rede de estudo.



FONTE: Autor (2020).

Os dois reservatórios adjacentes possibilitam eventuais manutenções sem interrupção do abastecimento. Entretanto, por simplificação, na modelagem efetuada, foi considerado apenas um reservatório com altura de 30 metros.

4.2 Projeto de Monitoramento

Para o monitoramento de uma determinada rede de distribuição de água, é necessário o estudo de quais pontos de medição compõem o melhor conjunto de dados a serem coletados e que são capazes de fornecer a melhor análise das variáveis de estado presentes em toda a rede de distribuição. Denomina-se assim o projeto de monitoramento, que é particular de cada rede, dependendo de sua topologia.

O projeto de monitoramento a ser descrito tem referência no trabalho de Gamboa-Medina (2017), assim como as considerações internas feitas para o presente trabalho. A

escolha da metodologia se justifica pela possibilidade de cooperação da autora na execução do processo de determinação do projeto de monitoramento.

A metodologia de obtenção do projeto de monitoramento leva em consideração a sensibilidade dos pontos de medição, a consistência de sensibilidade e a redundância da informação obtida, que serão explicados a seguir. Trata-se de uma metodologia proposta e avaliada como eficiente e que foi, portanto, empregada neste trabalho.

Como parte da metodologia do projeto de monitoramento proposta por Gamboa-Medina (2017), tem-se a análise de correlação. A correlação é a medida de similaridade de comportamento das pressões de nós distintos dada a ocorrência de um dado vazamento. Ou seja, nós distintos apresentam correlação alta quando suas pressões variam de mesma forma quando um dado vazamento é simulado.

Sendo assim, são simulados vários cenários da rede de distribuição estudada para a análise de correlação. Inicialmente, simula-se o cenário sem vazamento algum na rede, obtendo-se os vetores PN_n de pressão para cada hora de um dia. Assim, são obtidos 24 vetores, todos de tamanho $1 \times n$, sendo n o número de nós na rede, excluindo-se o reservatório. São simulados os cenários de ocorrência de vazamentos em cada nó separadamente para a obtenção das matrizes de pressões horárias. Dessa forma são obtidas 24 matrizes $n \times n$. Dentro de uma matriz, cada coluna é o conjunto de pressões em todos os nós da rede dada a ocorrência de vazamento no nó identificado pela posição da referida coluna. Calcula-se então a correlação entre dois nós a partir da Equação 14 e o resultado é alocado na matriz geral de correlação.

$$C_{a,b} = \sum_{h=1}^{24} CH_{a,b}^h ; CH_{a,b}^h = \frac{\sum_{l=1}^N (PL_{a,l} - \overline{PL}_a)(PL_{b,l} - \overline{PL}_b)}{\sqrt{\sum_{l=1}^N (PL_{a,l} - \overline{PL}_a)^2} \sqrt{\sum_{l=1}^N (PL_{b,l} - \overline{PL}_b)^2}}^h \quad (14)$$

Em que:

$C_{a,b}$: Matriz de correlação entre os nós a e b acumulada para o dia.

$CH_{a,b}^h$: Matriz de correlação entre os nós a e b para a hora h.

$PL_{a,l}$: Matriz de pressões na presença de vazamentos.

\overline{PL}_a : Matriz de pressões na ausência de vazamento.

Dentro da metodologia em questão, há a etapa de análise de sensibilidade. Tal grandeza representa a variação de pressão de um nó dada a ocorrência de um vazamento qualquer. De maneira direta, o cálculo da sensibilidade leva em consideração os valores de pressão em cada nó com e sem vazamentos, tem-se a Equação 15:

$$S_{n,l} = \frac{(PL_{n,l} - PN_n)^2}{PN_n} \quad (15)$$

Em que:

$S_{n,l}$: Sensibilidade do nó n a um dado vazamento no nó l.

$PL_{n,l}$: Pressão no nó n na presença de vazamentos no nó l.

PN_n : Pressão no nó n na ausência de vazamentos.

O plano de amostragem realizado para oito medidores de pressão disponíveis para uso foi implementado seguindo a metodologia proposta por Gamboa-Medina (2017). Na metodologia de referência, foram otimizadas três funções objetivo, a saber: sensibilidade da variação da pressão em um nó dada a ocorrência de um dado vazamento, entropia da distribuição da sensibilidade e correlação entre nós com comportamentos semelhantes em relação a variações de pressão devidas à ocorrência de vazamentos.

A primeira função objetivo de uma solução se relaciona com a sensibilidade de um determinado nó x_i para os vazamentos que possam ocorrer em todos os outros nós da rede. Ou seja, quanto maior a sensibilidade de um nó, maior sua variação de pressão perante a ocorrência de um vazamento qualquer. Apresenta-se a Equação 16:

$$f1x = \sum_{l=1}^N \text{máx}(S_{x_i,l}) \quad \forall x_i \in X \quad (16)$$

A segunda função objetivo deriva da entropia de Shannon. A entropia calculada é diretamente proporcional à uniformidade da distribuição da sensibilidade dos nós da solução analisada. Assim, quanto maior a entropia, maior a sensibilidade da solução para qualquer vazamento que ocorra em qualquer nó da rede. Apresenta-se a Equação 17:

$$f2x = \sum_{l=1}^N p_t \log(p_t) ; p_t = \frac{\text{máx}(S_{x_i,l})}{\sum_{l=1}^N \text{máx}(S_{x_i,l})} = \frac{\text{máx}(S_{x_i,l})}{f1x} \quad \forall x_i \in X \quad (17)$$

Finalmente, a terceira função objetivo se relaciona com a correlação entre nós de uma solução X . O objetivo é a redução da somatória das correlações entre pontos de medição, evitando assim a redundância entre dados de pressão capturados dada a ocorrência de um vazamento. Neste caso, com a disponibilidade de oito medidores de pressão o número de nós com medição foi escolhido como 8. Tem-se a Equação 18:

$$f3x = \frac{\text{mín} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{i-1} C_{x_i x_j}}{\binom{M}{2}} \quad \forall x_i \in X \quad (18)$$

O processo de otimização foi efetuado a partir da implementação do *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) (DEB *et al.*, 2002). Para o algoritmo genético foi

determinada uma população de 10 indivíduos e 30 gerações de resultados de acordo com o trabalho de referência. A seleção se deu pela formação de frentes Pareto após normalização dos resultados de cada função objetivo calculada para cada indivíduo. Ou seja, a cada iteração, após as modificações dos indivíduos, as funções objetivo foram calculadas e normalizadas. Assim, a seleção foi feita escolhendo-se os indivíduos que apresentaram menores valores do cálculo de distância euclidiana. Apresenta-se a formulação básica da distância euclidiana entre pontos A e B em um espaço n-dimensional na Equação 19 e também as equações de normalização das funções objetivo para o cálculo da pontuação final F_{i_x} , através da Equação 20:

$$D_X = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2} \quad (19)$$

$$F_{i_x} = \begin{cases} \frac{f_{i_{\max}} - f_{i_x}}{f_{i_{\max}} - f_{i_{\min}}}, & \text{para } i \in \{1,2\} \\ \frac{f_{i_x} - f_{i_{\min}}}{f_{i_{\max}} - f_{i_{\min}}}, & \text{para } i = 3 \end{cases} \quad (20)$$

Assim, conclui-se a metodologia proposta por Gamboa-Medina (2017) aplicada neste trabalho. Ao final do processo iterativo foram selecionados os três indivíduos com menor distância euclidiana à origem, representando as três escolhas de pontos de medição de pressão ótimas. Estas foram apresentadas ao responsável técnico da operação da rede estudada para que escolhesse, entre as três, aquela que mais facilmente seria implementada, com relação à infraestrutura e possibilidade de instalação dos equipamentos. Assim, a solução selecionada é apresentada na Figura 11.

Figura 11 - Planta de monitoramento de sensores de pressão.



FONTE: Autor (2020).

4.3 Algoritmo de detecção e localização de vazamentos

Como proposto anteriormente, é apresentado o algoritmo de funcionamento do *EnKF* para a localização de vazamentos. Em sequência, enumeram-se os passos que compõem o processo de detecção e localização de vazamentos na Figura 12:

Figura 12 - Algoritmo de assimilação de dados e estimativa de vazamentos com *EnKF*.

	Início
Passo 1	Estimativa inicial de parâmetros
	for t in tempo
Passo 2	X_t^p : Previsão dos estados
Passo 3	P_t : Cálculo da covariância da estimativa
Passo 4	R_t : Cálculo da matriz de medições
Passo 5	G_t : Cálculo do Ganho de Kalman
Passo 6	X_t^a : Atualização da Matriz de Estados
	Fim

FONTE: O autor (2020)

- Passo 1 - Estimativa inicial: Para a primeira iteração do algoritmo, gera-se uma estimativa inicial do vetor de estados aumentado. Isto é, estima-se qual o valor das pressões, vazões e emissores no passo de tempo inicial ($t=0$). Para isso, foi gerado um conjunto de valores com distribuição normal para os coeficientes de vazamentos (*emitters*) com média de 0,001 e desvio padrão 0,3. Em relação ao Estudo de Caso a ser abordado na seção 4.5, além dos valores de *emitters*, também fazem parte da estimativa inicial valores aleatórios de altura do reservatório. A dimensão da matriz de estimativa inicial é número de parâmetros a serem estimados *versus* NME.
- Passo 2 – Previsão dos estados: A partir da matriz de estimativa inicial de parâmetros é feita a previsão das variáveis de estado no próximo passo de tempo para cada membro do *Ensemble*. Ou seja, cada coluna da matriz de estimativa inicial corresponde a um membro do *Ensemble* e contém valores de coeficiente de vazamento de cada um dos nós da rede. As previsões dos estados foram feitas a partir das simulações de um passo de tempo do modelo em EPANET com os coeficientes de vazamento presentes em cada coluna da matriz de estimativa inicial.
Após serem realizadas as previsões das variáveis de estado do primeiro passo de tempo para cada membro, a matriz dos resultados (variáveis de estados) de cada realização é concatenada verticalmente ao final da matriz de estimativa inicial, gerando assim a matriz de estados aumentada que é utilizada nas etapas seguintes.
- Passo 3 – Cálculo da covariância da estimativa, conforme representado na Equação 12.
- Passo 4 - Medição: O vetor de medições com dados aferidos em campo é empregado no cálculo da matriz de medições. A média de cada coluna da matriz de medições é o valor do componente de mesma posição do vetor de medições, e o desvio padrão dos valores de cada coluna da matriz corresponde ao erro associado à resolução do processo de medição de pressão e vazão. Neste trabalho, a partir do considerado por Ruzza (2017) e após execução de testes de sensibilidade, foi considerado o valor de desvio padrão de 0,1.

Ressalta-se a diferença entre a implementação do Passo 3 com o Modelo Sintético e o Modelo de Estudo de Caso. No Modelo Sintético as medições realizadas não apresentaram ruídos, uma vez que não há interferência no processo de obtenção de dados de simulações. Também não foram gerados ruídos sintéticos a fim de não se apresentar outra discussão a respeito do processo de determinação dos valores destes

ruídos e sua interferência no processo de localização de vazamentos. Diferentemente, para o Modelo de Estudo de Caso, os dados naturalmente apresentam ruídos durante o processo de medição, notadamente nas medições de vazão, como é apresentado capítulo 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.

- Passo 5 - Ganho de Kalman: Representado pela Equação 8, o cálculo do ganho de Kalman é a razão entre a covariância da matriz de estados aumentada e a soma das covariâncias da matriz de estados aumentada e da matriz de medições. Como já descrito é a medida de ponderação entre as grandezas estimadas e as medidas. Ainda na Equação 8, a matriz M é a transformação linear que compatibiliza as dimensões e possibilita as operações entre as matrizes de covariância calculadas. De maneira direta, a Matriz M é esparsa, cada linha da matriz é composta de zeros e apenas um valor unitário. Em cada linha, o número um é inserido na posição correspondente ao nó onde é coletada a informação da medição
- Passo 6 – Atualização da Matriz de Estados: A equação 9 sintetiza a etapa de assimilação dos dados medidos na matriz de estados aumentada. A diferença entre os termos z^m e MX^p é chamada inovação e representa a diferença ente os dados medidos e previstos no passo de tempo analisado.

4.4 Análise de Sensibilidade - Modelo Sintético

A metodologia consiste na implementação do código de *EnKF* com vetor de estados aumentado, contendo, além de pressão e vazão, o valor dos coeficientes de vazamento do modelo e o nível do reservatório. De maneira simplificada, a cada passo de tempo da assimilação de dados, a implementação do *EnKF* fornece os valores de coeficiente de vazamento para cada nó. Apresenta-se a Matriz de estados aumentada a ser construído para a implementação da localização de vazamentos:

$$XA = [p_1, p_2, \dots, p_n, c_1, c_2, \dots, c_n, q_R, N_R]$$

Em que:

XA : Matriz de estados aumentada;
 p_n : valor da pressão do nó n ;
 c_n é o valor de coeficiente de vazamento do nó n ;
 q_R : valor da vazão de saída do reservatório;
 N_R : valor do nível do reservatório;

Pretende-se analisar a sensibilidade do *EnKF* em relação ao número de membros do *ensemble* (NME) e ao coeficiente de vazamento pontual simulado, são feitas realizações do processo de detecção de perdas para diferentes valores de NME e coeficiente de vazamento simulado. Um único modelo, chamado modelo sintético, construído tem seus parâmetros (NME e c simulado) variados para se efetuar a análise de sensibilidade.

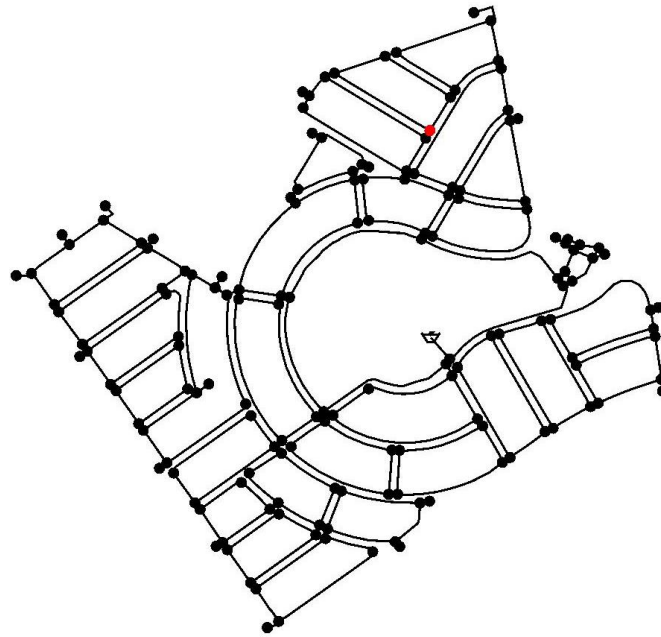
Conforme ilustrado na Figura 13, os valores de NME a serem estudados foram obtidos através do valor utilizado por Ruzza (2017). de $NME = 500$. Além disso, os valores de coeficiente de vazamento são adotados variando de $c=0,005$ até $c = 1$.

Figura 13 - Cenários de simulação para valores de NME e de coeficiente c .

		Coeficiente c					
		1	0,5	0,1	0,05	0,01	0,005
NME	50						
	100						
	200						
	300				A		
	400						
	500						

Na Figura 13 é ressaltado, por exemplo, o cenário A que representa a utilização do modelo sintético com ensemble de 300 membros e coeficiente $c = 0,05$. Para o modelo de referência, estabelece-se um nó aleatório para apresentar os vazamentos de diferentes magnitudes em cada cenário. A escolha do nó se justifica por se tratar de um nó entre o anel central e os pontos mais distantes, objetivando igualar as influências destas duas situações. Na Figura 14 é exibida a planta da rede de distribuição com a localização do nó escolhido.

Figura 14 - Localização do nó com vazamento simulado para o modelo sintético.

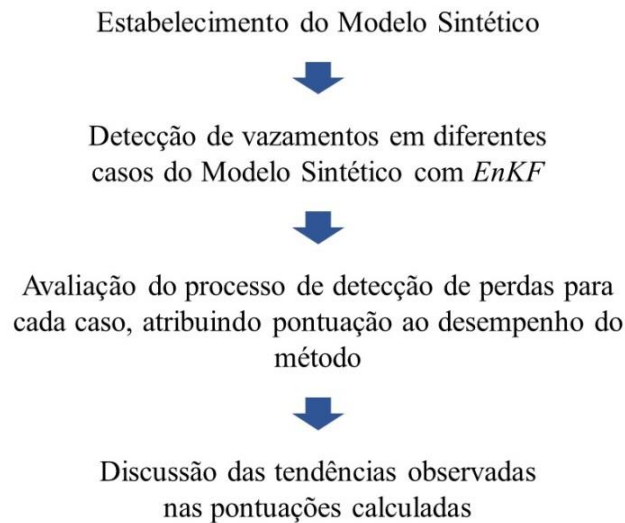


FONTE: O autor (2020)

A implementação do *EnKF* fornece soluções indicando a quantidade de nós que apresenta vazamento, bem como a magnitude dessa perda para cada nó, respeitando a conservação de massa do sistema. A matriz de estados aumentado com os coeficientes de vazamentos em todos os nós, vai sendo, a cada passo de tempo, atualizada e, ao final do processo, apresenta os valores de coeficiente de vazamento estimados pelo filtro.

A Figura 15 contém a representação do fluxo do método empregado. Efetuou-se a construção de um modelo genérico, seguida da localização de vazamentos nas variações de NME e c aplicadas ao Modelo. Finalmente, para cada caso simulado, é calculada uma pontuação de acordo com a metodologia de análise de eficiência descrita na próxima seção

Figura 15 - Diagrama de fluxo de método 1.



FONTE: Autor (2020).

4.4.1 Método de Avaliação do Desempenho do Processo de Detecção de Vazamentos

Este método de avaliação se destina a mensurar eficiência do processo em cada realização feita. Dada a variação dos parâmetros de entrada NME e ordem de grandeza do coeficiente de vazamento, cada realização produzida pode gerar um resultado diferente. A pontuação obtida para cada caso estudado é diretamente proporcional à eficiência do processo de detecção submetido às condições especificadas. Ou seja, quanto maior a pontuação obtida, mais eficiente é o caso estudado.

O nó solução dado em cada realização é considerado como sendo o nó com maior valor de coeficiente de vazamento ao final do algoritmo. A avaliação foi embasada em cinco critérios que são apresentados a seguir. Cada quesito foi adotado por representar características julgadas pertinentes ao processo de detecção de vazamentos. A seguir são apresentados cada um desse critérios:

Critério 1 - Número de iterações até resposta definitiva (NIR): Considera o número de iterações do algoritmo em que a resposta definitiva correta é dada. Resposta definitiva é o ponto a partir do qual um determinado nó tem maior valor de coeficiente de vazamento até o fim do algoritmo. Se o nó da resposta definitiva não corresponder à solução correta, a pontuação deste critério não é calculada. O valor numérico considerado para o cálculo da pontuação é a iteração em que o nó solução tem maior valor de coeficiente de vazamento. A pontuação P_{NIR} é calculada a partir do número de iterações através da Equação 21:

$$P_{NIR} = 100 - \frac{N_i}{N_{ti}} * 100 \quad 21$$

Em que:

P_{NIR} : Pontuação para o critério NIR.

N_i : Número de iterações para a ocorrência da resposta definitiva.

N_{ti} : Número total de iterações realizadas.

Critério 2 - Tempo de realização do algoritmo (TRA): Considera o tempo em minutos de duração do algoritmo, que varia de acordo com o valor da dimensão (NME) da matriz de estados aumentados. Como no algoritmo de cada realização cada iteração tem aproximadamente a mesma duração de tempo, por simplificação, adota-se o valor em minutos do tempo de duração de apenas uma iteração de cada realização. A pontuação P_{TRA} é calculada a partir da duração em minutos de uma iteração de acordo com a Equação 22:

$$P_{TRA} = 100 - \frac{T_i}{T_{ti}} * 100 \quad 22$$

Em que:

P_{TRA} : Pontuação para o critério NIR.

T_i : Tempo de duração de uma iteração (min).

T_{ti} : Tempo de duração da iteração mais duradoura (relativo aos casos com maior NME) (min).

Critério 3 - Solução correta (SC): Trata-se de um quesito de avaliação binária. Isto é, considera se ao final do algoritmo o nó solução corresponde ao nó que realmente apresenta vazamento. A pontuação obtida é $P_{SC} = 100$ se a solução final é correta ($SC = 1$), caso contrário, $P_{SC} = 0$ se a solução final é incorreta ($SC=0$).

Critério 4 - Soluções incorretas (SI): Considera quantas foram as soluções incorretas indicadas, mesmo que a solução correta seja ou não alcançada. Tem-se por solução incorreta cada nó que, ao final do processo de detecção, apresente valor de coeficiente de vazamento maior que 10% do vazamento simulado naquela realização. A pontuação P_{SI} é calculada através da Equação 23, a partir do número de soluções incorretas obtidas nSI , multiplicada por um fator de compatibilização de ordem de grandeza. O valor 10 foi adotado arbitrariamente a partir da comparação da relevância da pontuação obtida em relação aos outros critérios analisados.

$$P_{SI} = -10 * nSI \quad 23$$

Em que:

P_{SI} : Pontuação para o critério SI.

nSI : Número de soluções incorretas obtidas.

Critério 5 - Magnitude do vazamento em solução correta (MV): Considera a proporção entre coeficiente de vazamento encontrado e simulado apenas no caso de ocorrência de solução correta. Caso a solução final seja incorreta, a variável de cálculo tem valor nulo. Caso seja obtida a solução correta, a pontuação P_{MV} é calculada a partir da razão entre o valor do coeficiente de vazamento da solução encontrada e o valor do vazamento simulado de acordo com a Equação 24:

$$P_{MV} = 100 * \frac{c_e}{c_s} \quad 24$$

Em que:

P_{MV} : Pontuação para o critério MV.

c_e : Valor do coeficiente de vazamento encontrado.

c_s : Valor do coeficiente de vazamento simulado.

Para este trabalho o processo de análise de sensibilidade foi repetido duas vezes para se confirmarem os resultados obtidos. No próximo capítulo, apresentam-se os resultados obtidos a partir do processo de análise de eficiência da metodologia de detecção de vazamentos sobre os casos simulados a partir do modelo sintético. A seguir apresenta-se a metodologia da etapa de estudo de caso.

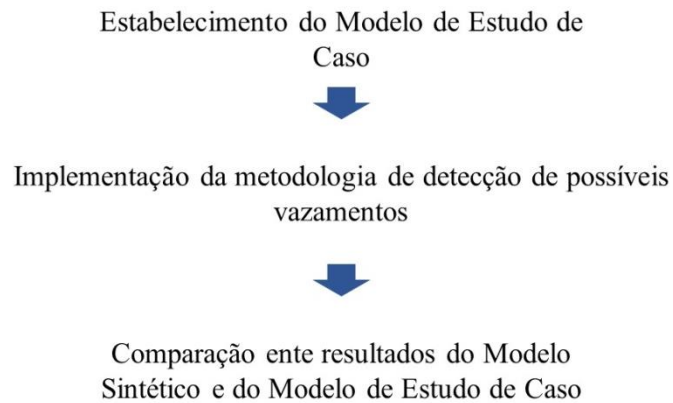
Com o intuito de se privilegiar as características relacionadas com a capacidade de se detectar corretamente o vazamento em um determinado nó, os quesitos de 3, 4 e 5 recebem maior ponderação no cálculo da pontuação final em relação aos quesitos 1 e 2 relacionados à velocidade de resposta e tempo de execução do algoritmo. Assim para o cálculo da pontuação P_f utiliza-se a Equação 25:

$$P_f = \frac{1 * \left(\frac{P_{TRA} + P_{NIR}}{2} \right) + 3 * \left(\frac{P_{SC} + P_{SI} + P_{MV}}{3} \right)}{4} = \frac{P_{TRA} + P_{NIR}}{8} + \frac{P_{SC} + P_{SI} + P_{MV}}{4} \quad (25)$$

4.5 Estudo de caso - Modelo do caso real

A metodologia apresentada anteriormente foi aplicada aos dados reais, obtidos durante o período de coleta de dados, a fim de se estimar os possíveis vazamentos existentes na rede real estudada. Para as condições reais da rede, a assimilação de dados pelo *EnKF* foi aplicada, também com o vetor de estados aumentado pelos parâmetros coeficientes de vazamento como representado na Figura 16

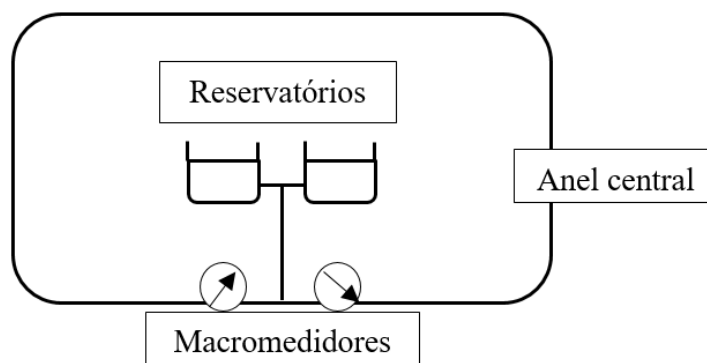
Figura 16 - Diagrama de fluxo de método 2.



FONTE: Autor (2020).

Os dados coletados em campo foram valores de pressão de oito pontos da rede, vazão de saída do reservatório e consumo médio mensal de cada residência. O porte relativamente pequeno da rede possibilitou o controle das informações de consumo para a modelagem. Sendo assim foi estimada a micromedição dos consumos de cada residência, através da leitura de hidrômetros no início e no fim da campanha de medição, obtendo-se o valor médio mensal do mês de dezembro de 2018. A Figura 17 representa o anel central da rede de distribuição, os macromedidores de vazão e os reservatórios:

Figura 17 - Representação anel central da rede estudada.



FONTE: Autor (2020).

Além disso, no anel central da rede de abastecimento há, a jusante da ligação dos reservatórios, dois macromedidores de volume que permitem a obtenção de dados para o controle de funcionamento da rede.

4.5.1 Dados de Vazão e Consumo

Os dados de vazão e consumo estão diretamente relacionados com o princípio de balanço hídrico na rede de abastecimento, garantindo a eficácia da determinação da ordem de grandeza de eventuais vazamentos. Devido à inexistência de uma infraestrutura equivalente, para a captura dos dados de vazão de saída do reservatório foram instaladas duas câmeras filmando os mostradores dos dois macromedidores em tempo contínuo durante o mês de dezembro e armazenando as imagens em um disco de memória no local. Uma vez instaladas as câmeras nos macromedidores, partiu-se para a leitura dos hidrômetros das residências.

Devido ao porte da rede estudada, foi possível realizar o acompanhamento mensal dos consumos residenciais. Isto é, para cada lote com micromedidor ativo, foram feitas duas leituras espaçadas de um mês no início e no final do período de monitoramento. Com isso, foi possível calcular consumo acumulado de água em cada residência. As planilhas utilizadas pelas equipes encontram-se no Apêndice I.

Foram necessárias quatro equipes (duplas) de medição para que o processo de leitura de todos os micromedidores não ultrapassasse um dia de duração o que iria interferir na quantificação dos consumos acumulados para cada lote, durante o período de medição. De fato, o processo de leitura durou aproximadamente duas horas, e por isso foram desconsiderados os efeitos do distanciamento temporal entre as leituras em lotes diferentes.

4.5.2 Dados de Pressão

Além dos dados de vazão, foram coletados, no mesmo intervalo de tempo de medição, dados de pressão em oito nós da rede. Enquanto as leituras eram feitas, outra equipe se prontificou a instalar os medidores de pressão previamente configurados e ativados como se ilustra na Figura 18. A escolha da quantidade de sensores utilizados respeitou a existência de equipamentos disponíveis para o uso, não sendo, portanto, realizado estudo a respeito do número de sensores suficientes para a análise. Entretanto, com base em simulações anteriores ao período de coleta de dados, notou-se que o número adotado de medidores de pressão era suficiente para detectar variações causadas pela ocorrência de vazamento em qualquer dos nós do modelo.

Figura 18- Medidor de pressão conectado ao cavalete.



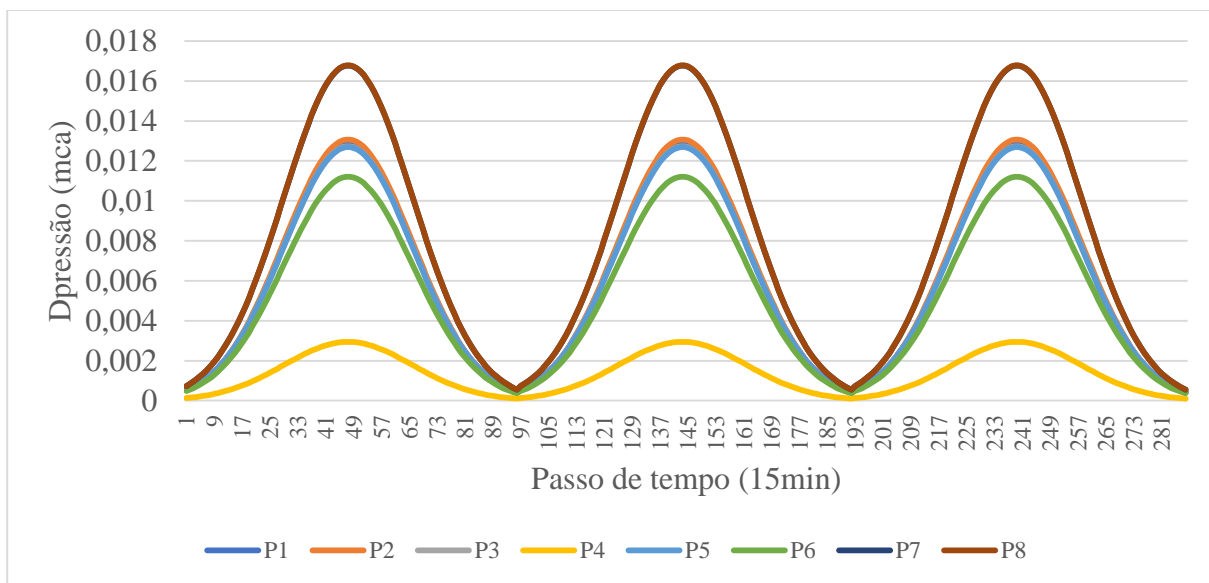
FONTE: Autor (2020).

4.5.3 Particularidades do processo de modelagem

A partir das características da rede real estudada e no intuito de simplificar a metodologia do estudo de caso avaliou-se a possibilidade de abstenção do processo de calibração de coeficientes de rugosidade. Apresenta-se na Figura 19 um estudo pontual de análise de sensibilidade das pressões nos nós selecionados após o projeto de monitoramento em relação à variação dos valores de rugosidades de todas as tubulações do modelo de estudo de caso.

Foram feitas duas simulações do modelo de estudos de caso para os dois valores extremos de rugosidade absoluta tabelados $\varepsilon = 0,0015 \text{ mm}$ e $\varepsilon = 0,01 \text{ mm}$ (PORTO, 2006) para o material da tubulação rede estudada (PVC). Para as duas simulações, foram armazenados os dados de pressão obtidos nos nós eleitos no plano de amostragem para o método de detecção de vazamentos. A diferença entre as pressões obtidas em cada nó ao longo do período de 72 horas é apresentada na Figura 19:

Figura 19 - Diferença de pressões entre simulações para $\varepsilon = 0,0015 \text{ mm}$ e $\varepsilon = 0,01 \text{ mm}$.



FONTE: Autor (2020).

Como a diferença de pressões obtidas nas simulações, considerando os dois extremos de valores de rugosidade para as tubulações de PVC, foi inferior a 0,02 mca, concluiu-se que a rugosidade influencia pouco nos resultados de pressão nos diferentes pontos da rede e a calibração deste parâmetro é desnecessária.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

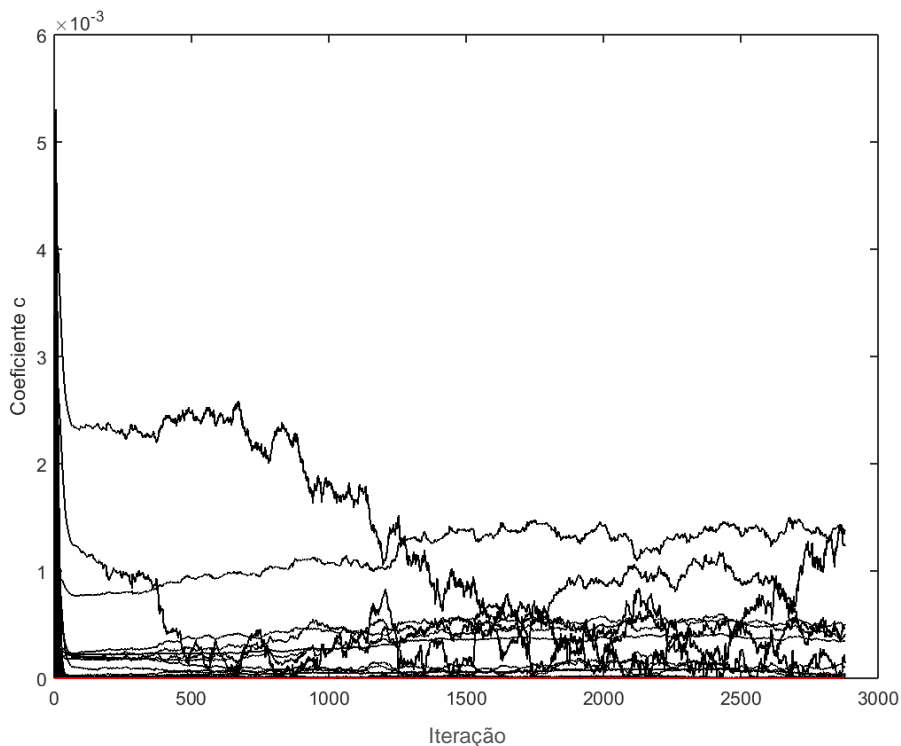
São apresentados os conjuntos de resultados e discussões a respeito das duas etapas do trabalho desenvolvido. 00,

00

5.1 Resulta0*-0/*-dos da Análise de Eficiência

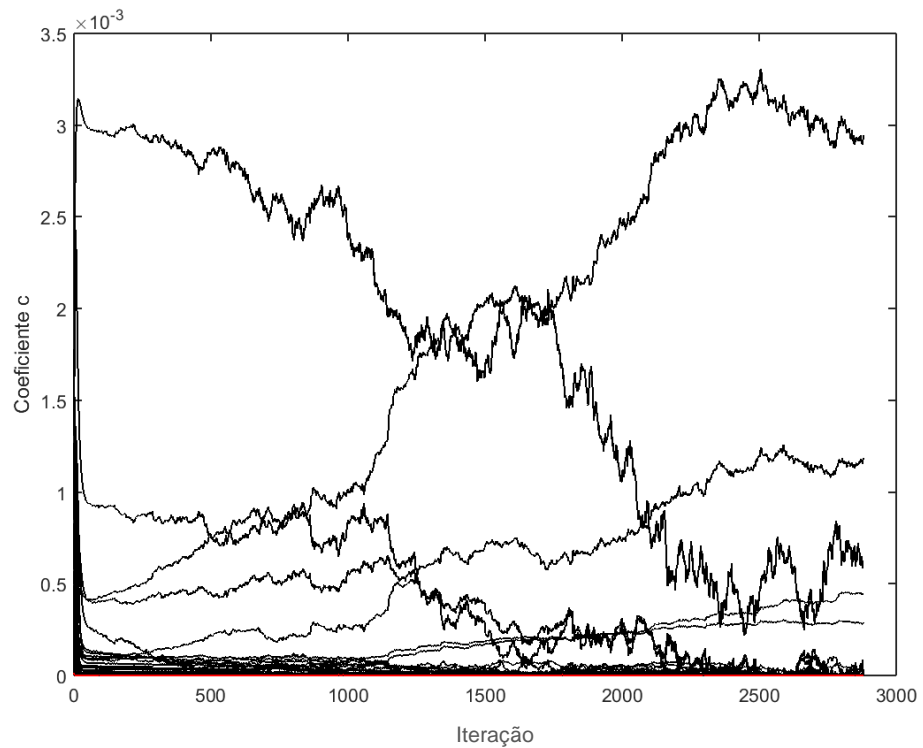
Apresentam-se os resultados obtidos em uma das duas realizações do processo de análise de sensibilidade da metodologia de detecção de vazamentos nas variações do modelo sintético em relação ao coeficiente de vazamento simulado c_s e o número de membros do *ensemble* NME nas Figuras 20 a 55. Ressalta-se que a curva correspondente ao nó que realmente apresenta vazamento simulado é destacada em vermelho e a unidade do coeficiente de vazamento c é $l.s^{-1}.mca^{-1,18}$

Figura 20 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s=0,005$ e NME = 50.



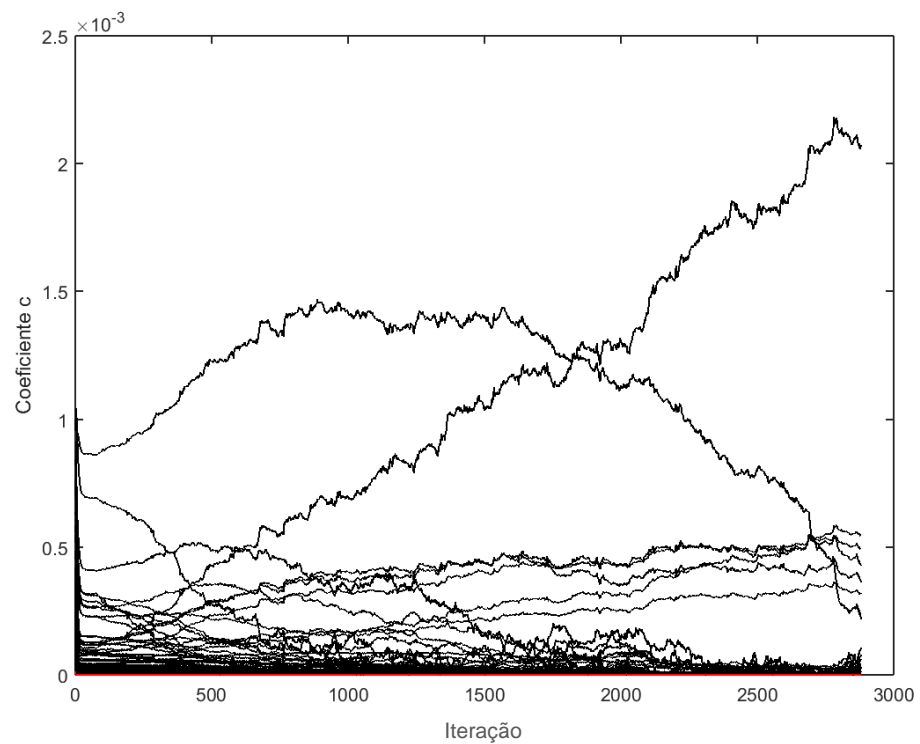
FONTE: Autor (2020).

Figura 21 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,005$ e NME = 100.

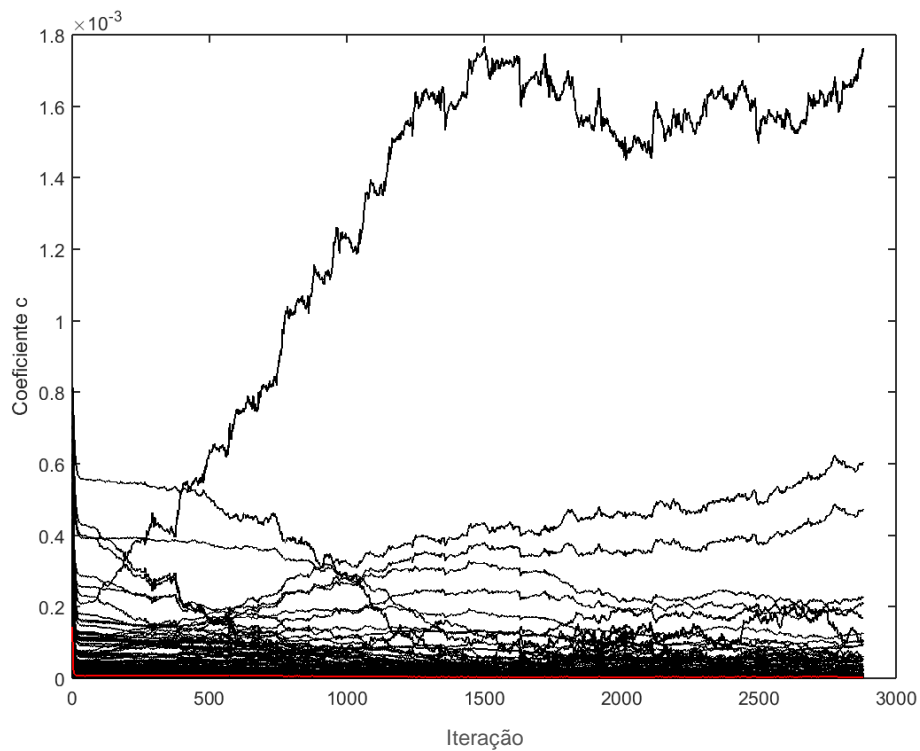


FONTE: Autor (2020).

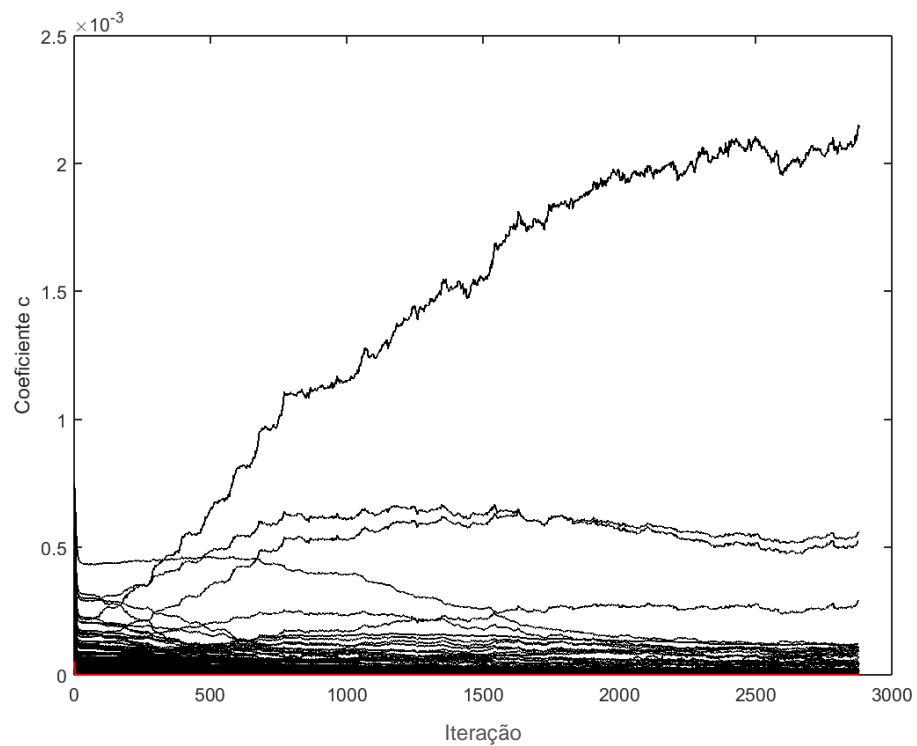
Figura 22 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,005$ e NME = 200.



FONTE: Autor (2020).

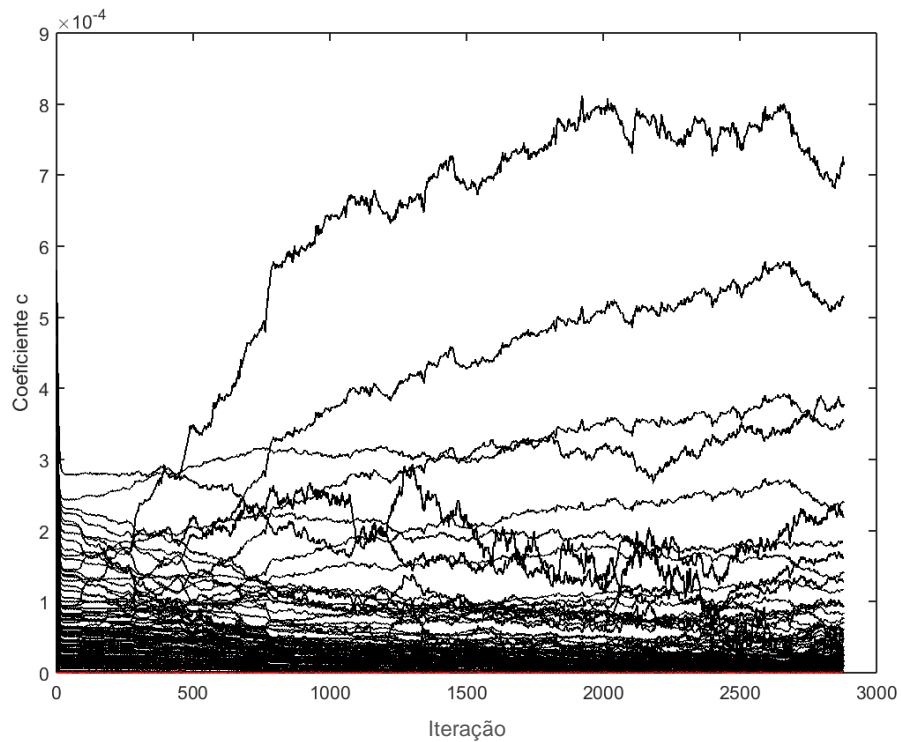
Figura 23 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,005$ e NME = 300.

FONTE: Autor (2020).

Figura 24 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,005$ e NME = 400.

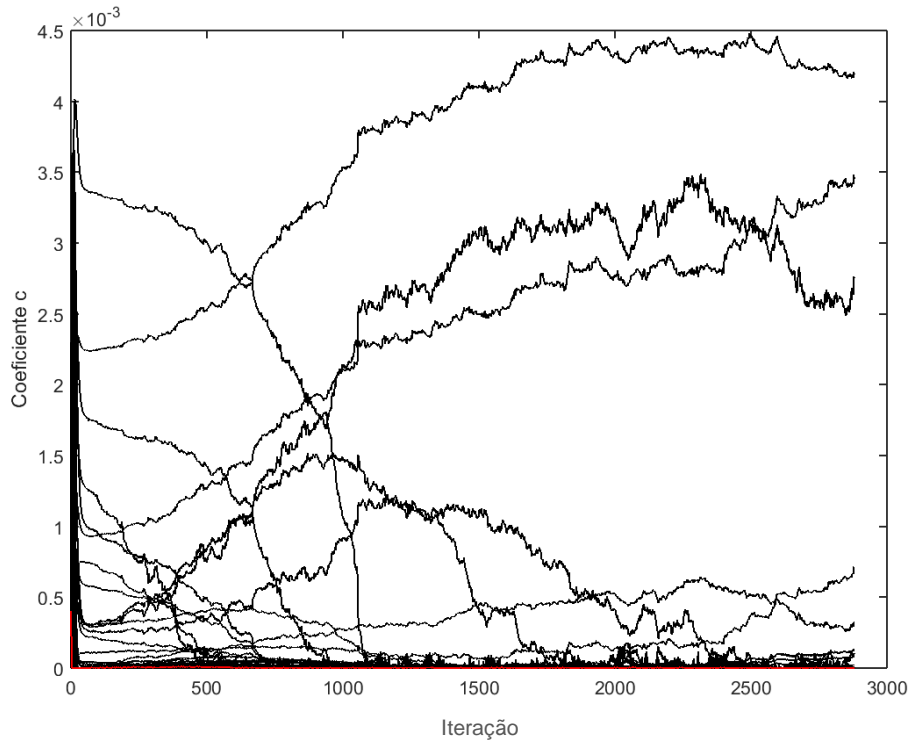
FONTE: Autor (2020).

Figura 25 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,005$ e $NME = 500$.

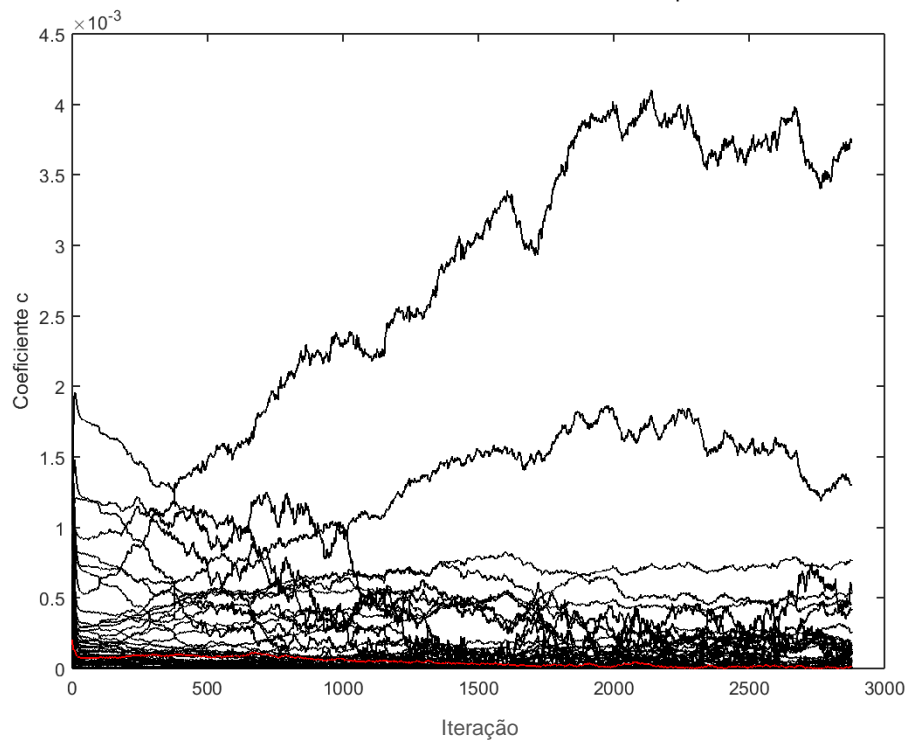


FONTE: Autor (2020).

As Figuras 20 a 25 demonstram a não ocorrência da localização correta do vazamento simulado. Deste modo, não fica claro quais valores de NME para o mesmo valor de c_s apresentam melhores resultados. Ainda, a comparação entre o maior valor encontrado de coeficiente de vazamento e o valor c_s simulado se torna incoerente pois a resposta encontrada não se trata da solução correta. Isto é, o nó com maior c obtido não é o que realmente apresenta vazamento simulado.

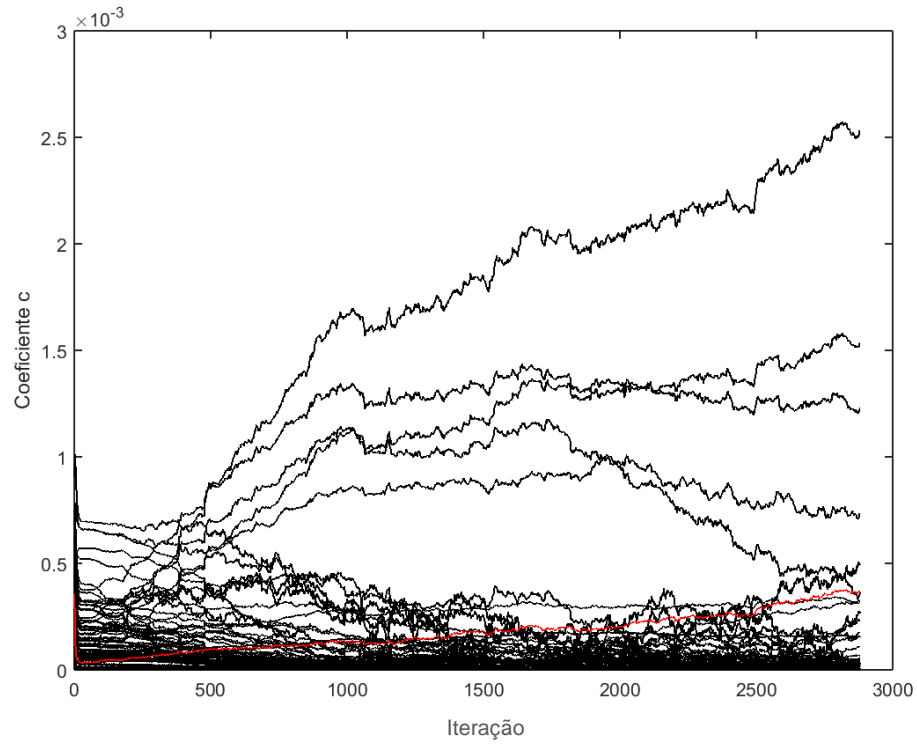
Figura 26 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,01$ e NME = 50.

FONTE: Autor (2020).

Figura 27 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,01$ e NME = 100.

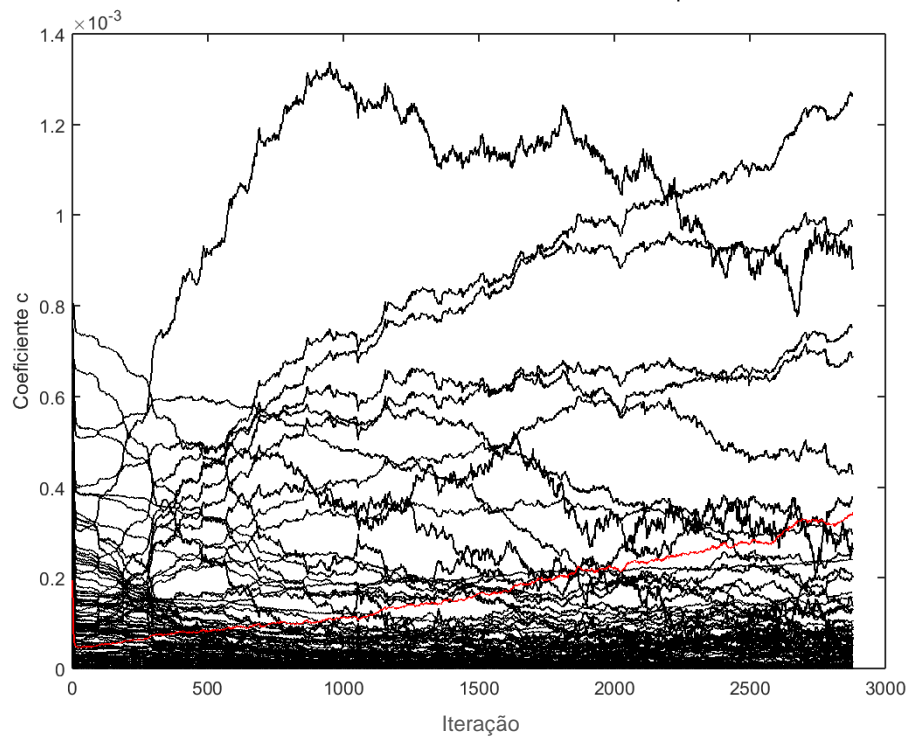
FONTE: Autor (2020).

Figura 28 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,01$ e $NME = 200$.



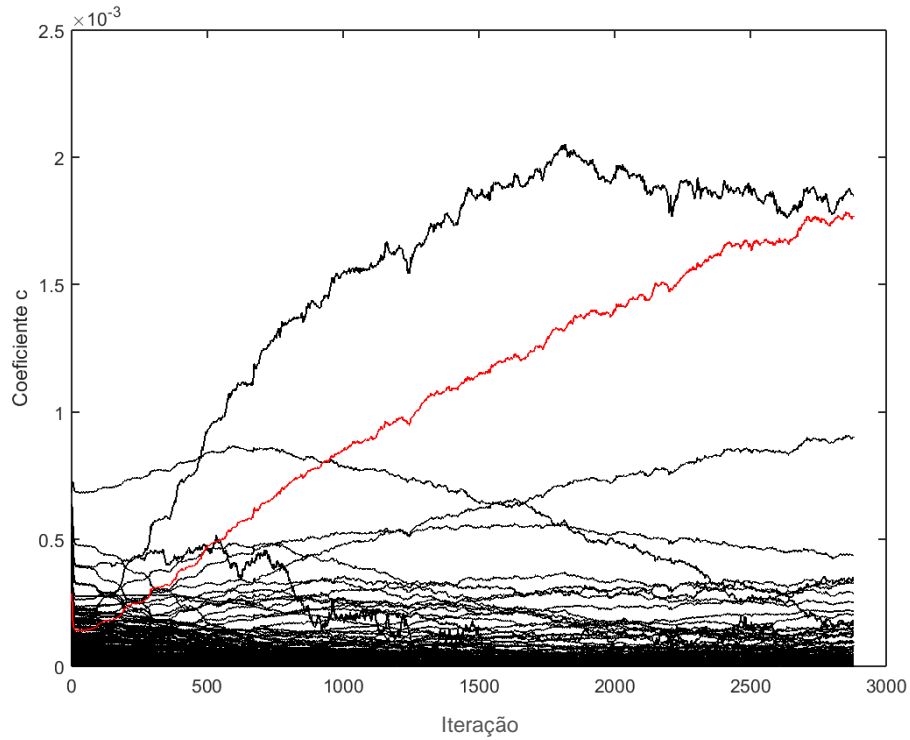
FONTE: Autor (2020).

Figura 29 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,01$ e $NME = 300$.



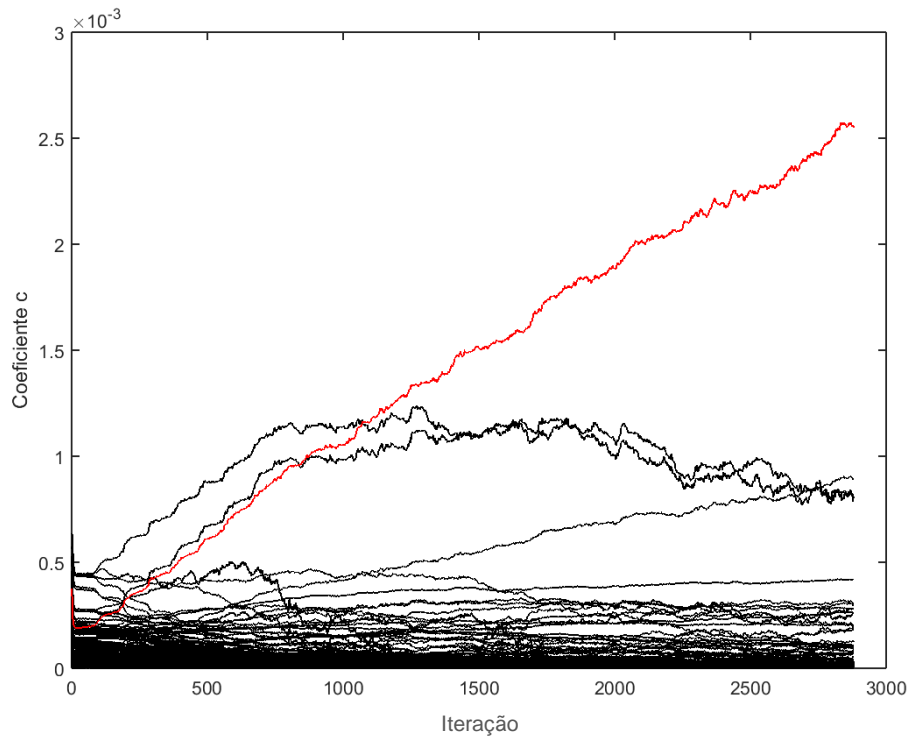
FONTE: Autor (2020).

Figura 30 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,01$ e $NME = 400$.



FONTE: Autor (2020).

Figura 31 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,01$ e $NME = 500$.

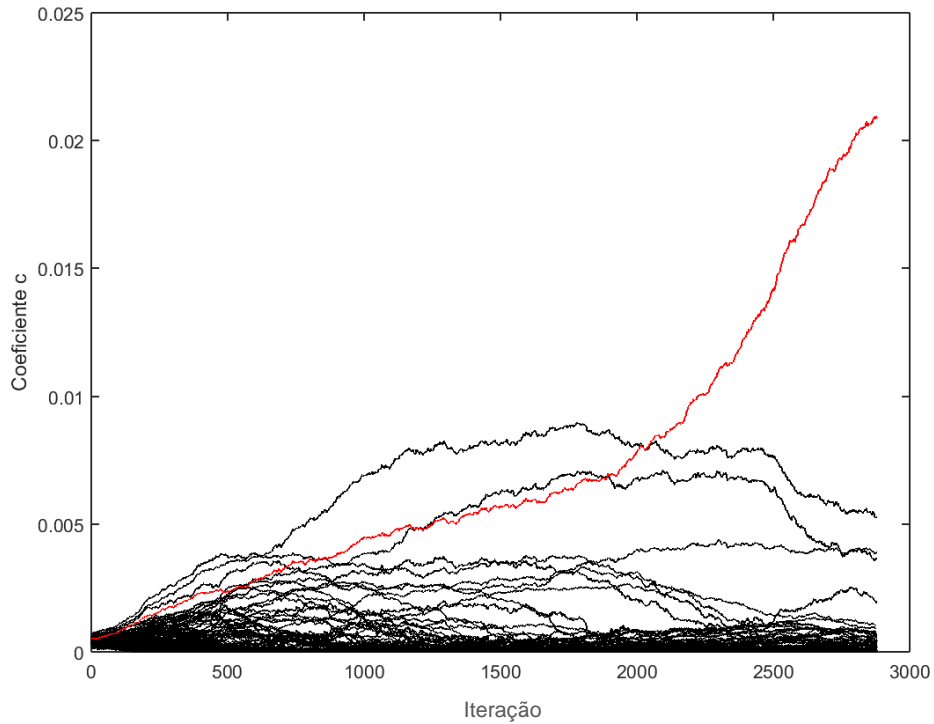


FONTE: Autor (2020).

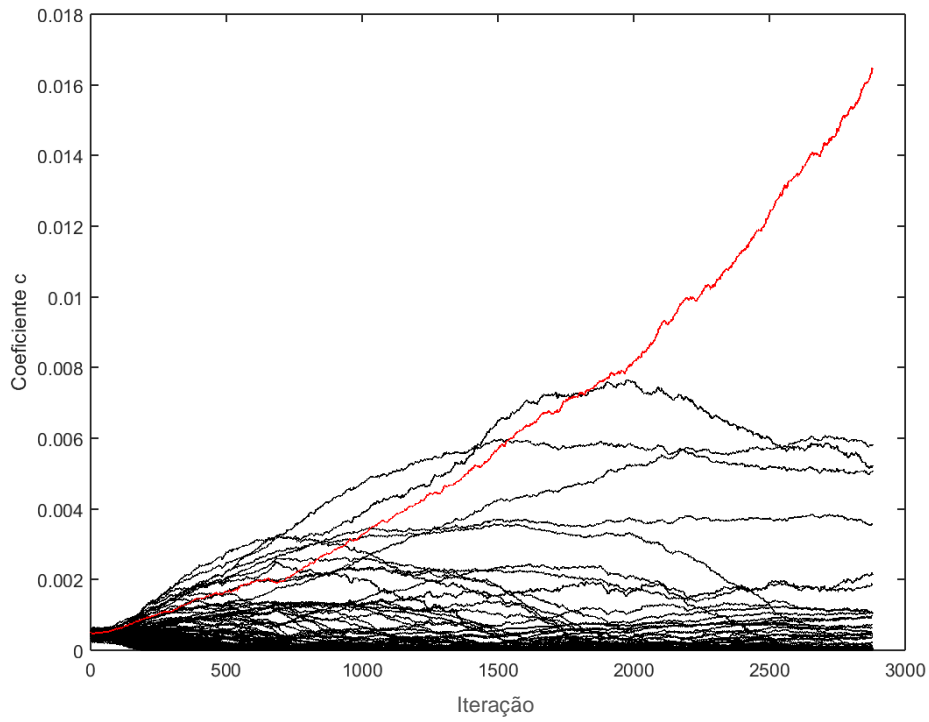
Nas Figuras 26 a 29 ainda se observa a não obtenção da solução correta. Já na Figura

30, com $NME = 400$, o resultado se aproxima da solução correta, com o nó que apresenta realmente o vazamento simulado recebendo valores próximos dos obtidos para a resposta definitiva. Na Figura 31, com $NME = 500$, foi obtida a solução correta.

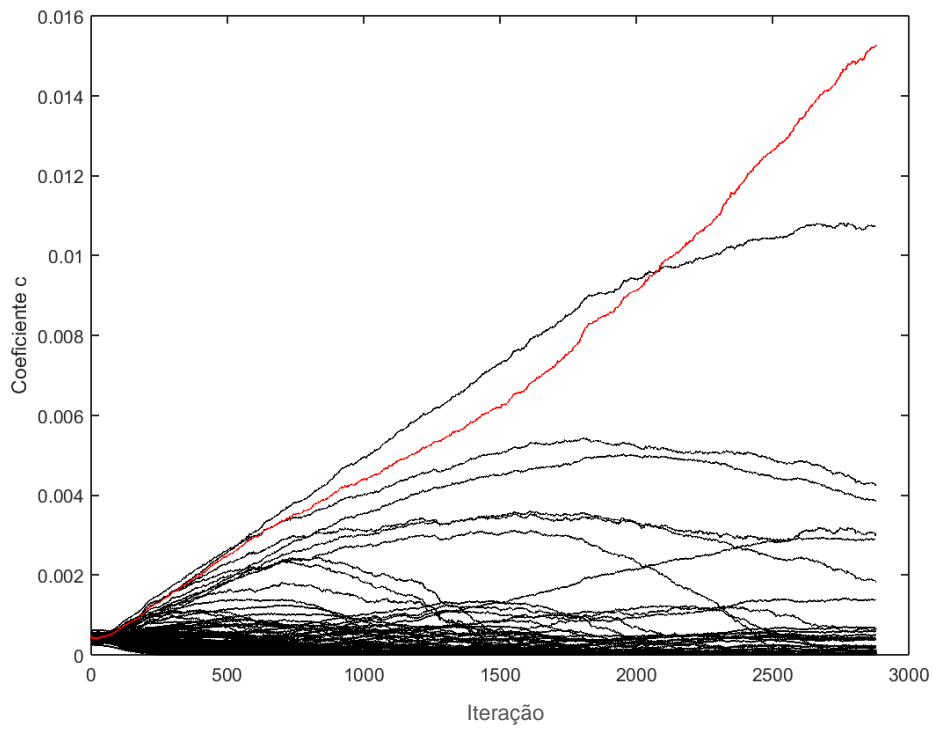
Figura 32 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,05$ e $NME = 50$.



FONTE: Autor (2020).

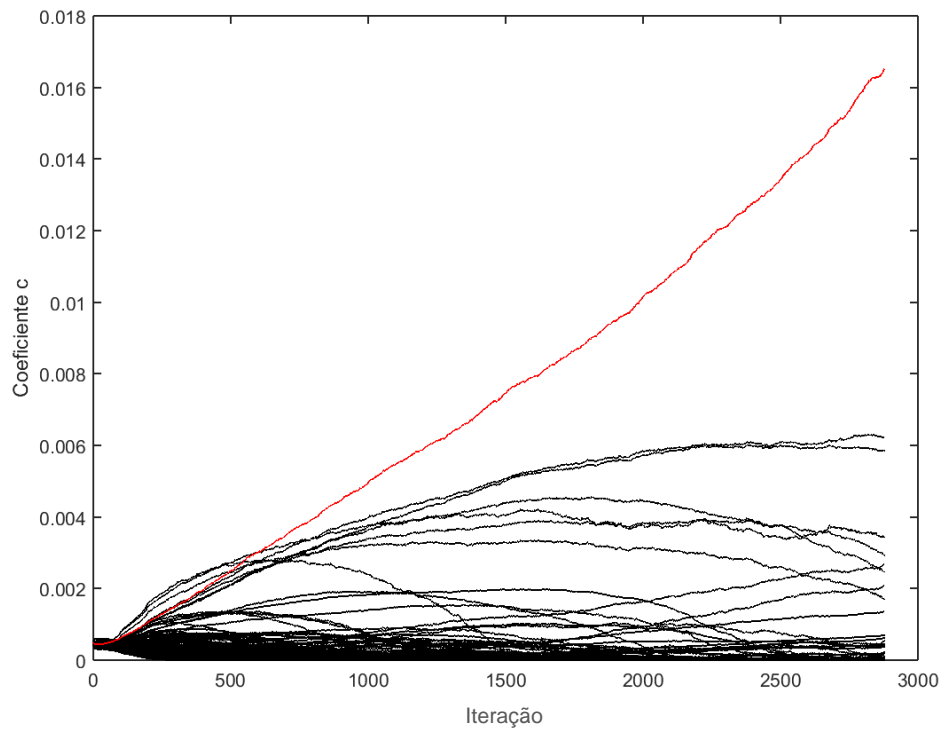
Figura 33 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,05$ e $NME = 100$.

FONTE: Autor (2020).

Figura 34 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,05$ e $NME = 200$.

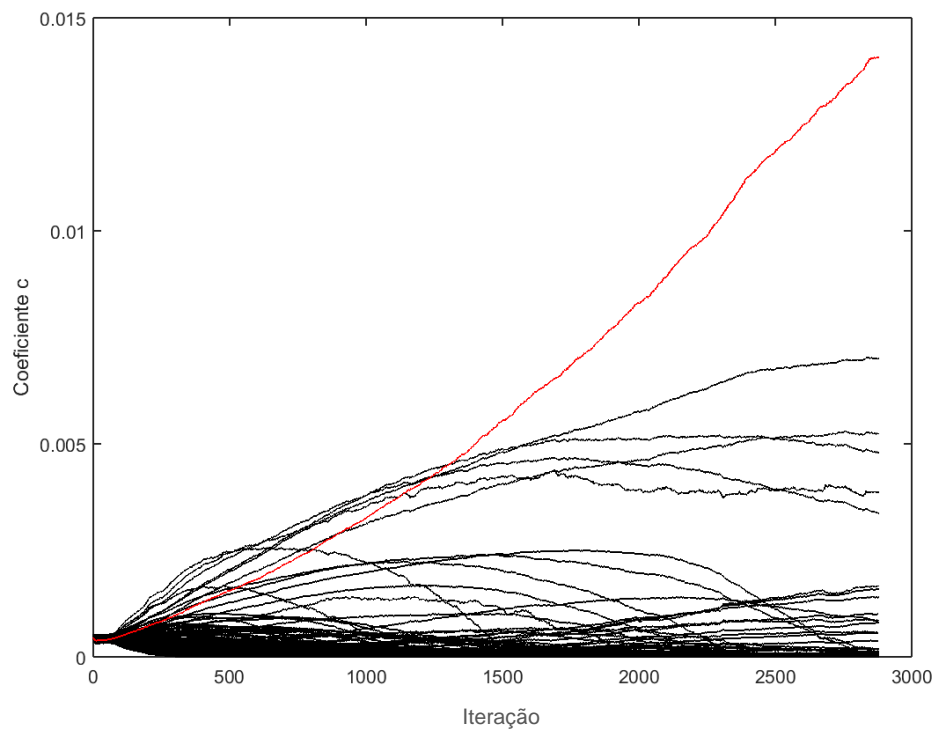
FONTE: Autor (2020).

Figura 35 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,05$ e $NME = 300$.

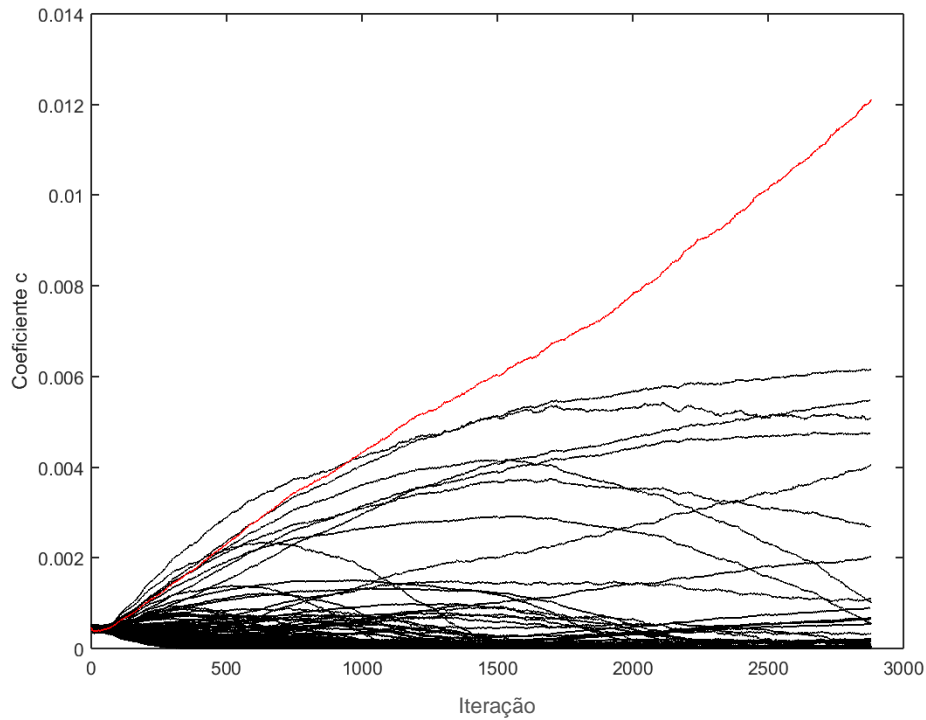


FONTE: Autor (2020).

Figura 36 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,05$ e $NME = 400$.

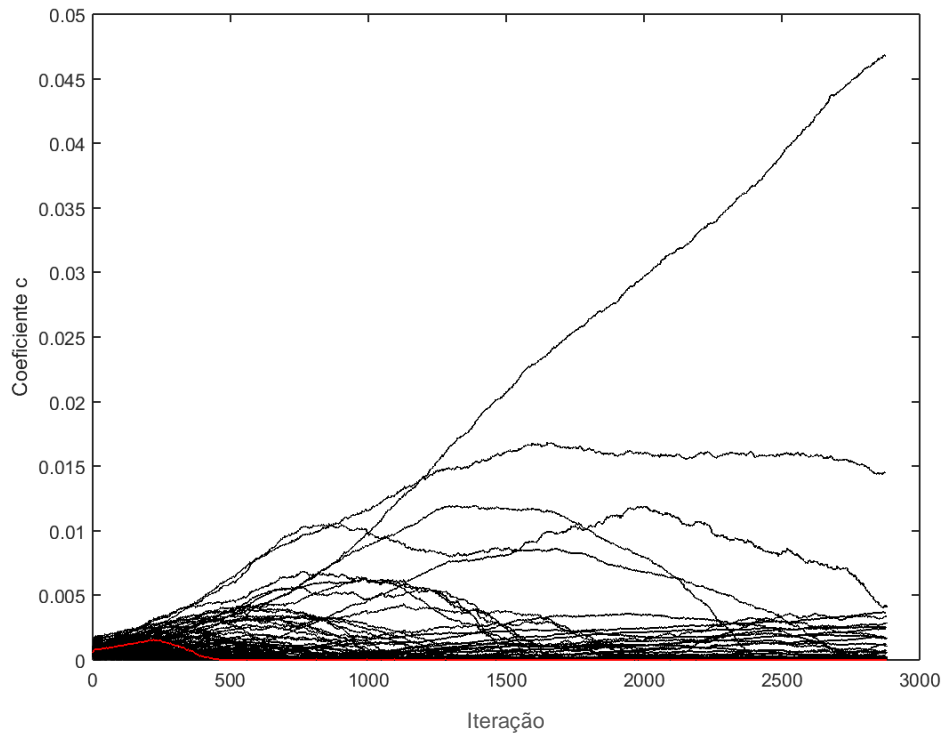


FONTE: Autor (2020).

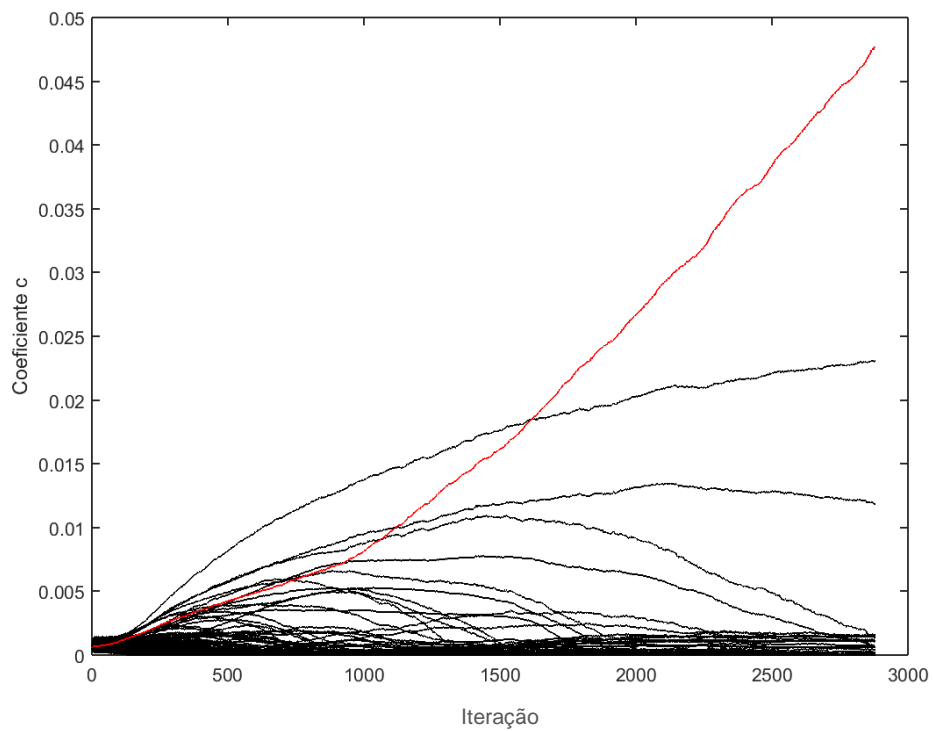
Figura 37 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,05$ e $NME = 500$.

FONTE: Autor (2020).

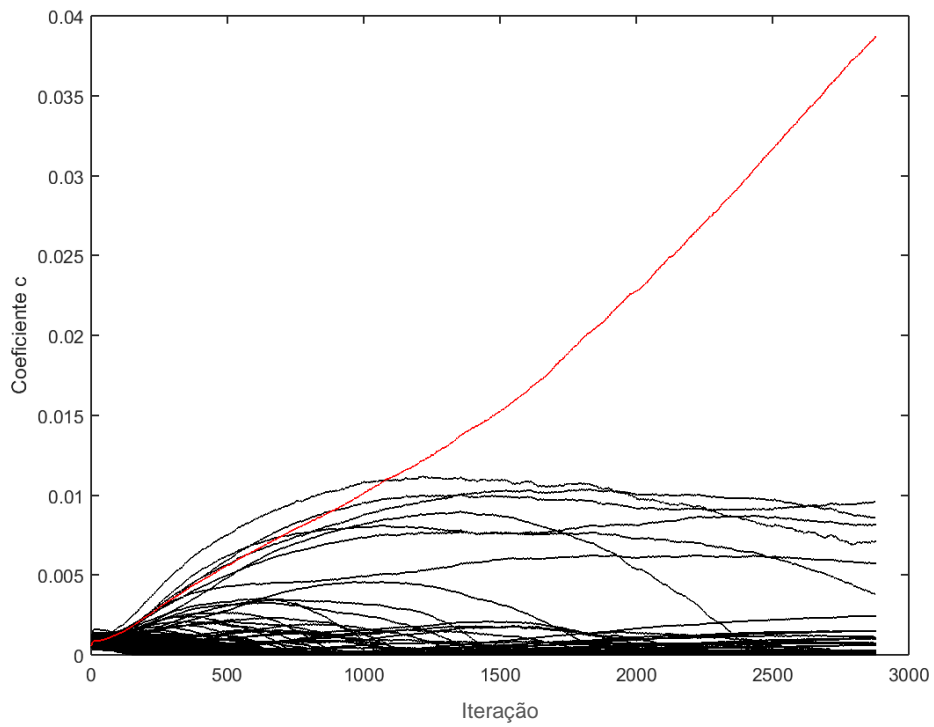
As Figuras 32 a 37 ilustram a ocorrência de determinação da solução correta para todos os valores de NME. Entretanto, não se observa a estabilização do valor de c da solução correta, nem a coincidência do valor de c da solução obtida com o valor c_s .

Figura 38 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,1$ e NME = 50.

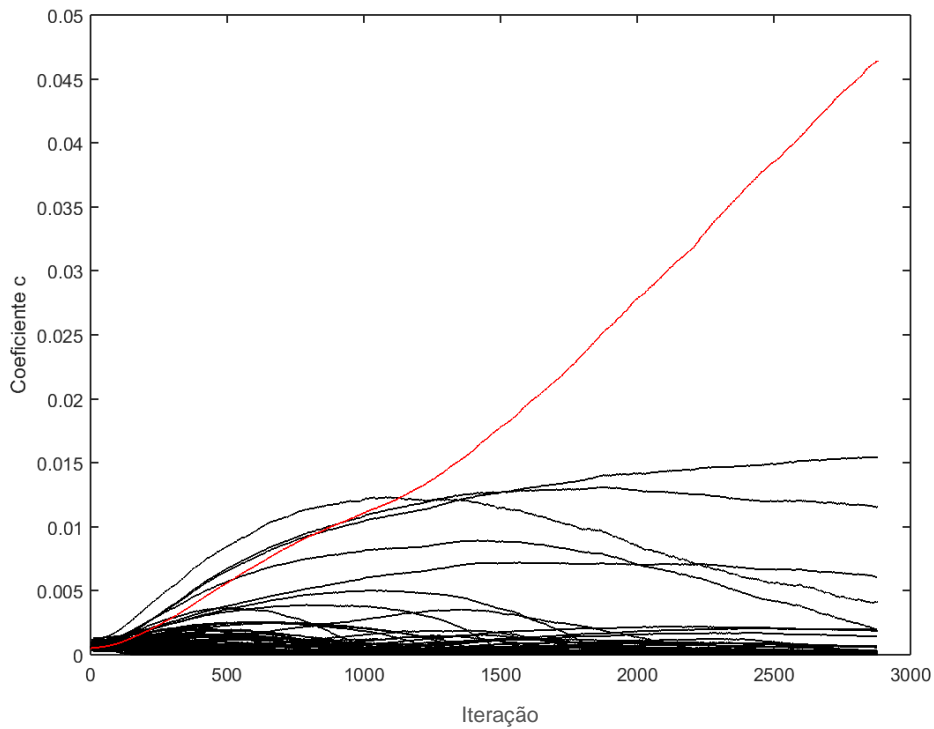
FONTE: Autor (2020).

Figura 39 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,1$ e NME = 100.

FONTE: Autor (2020).

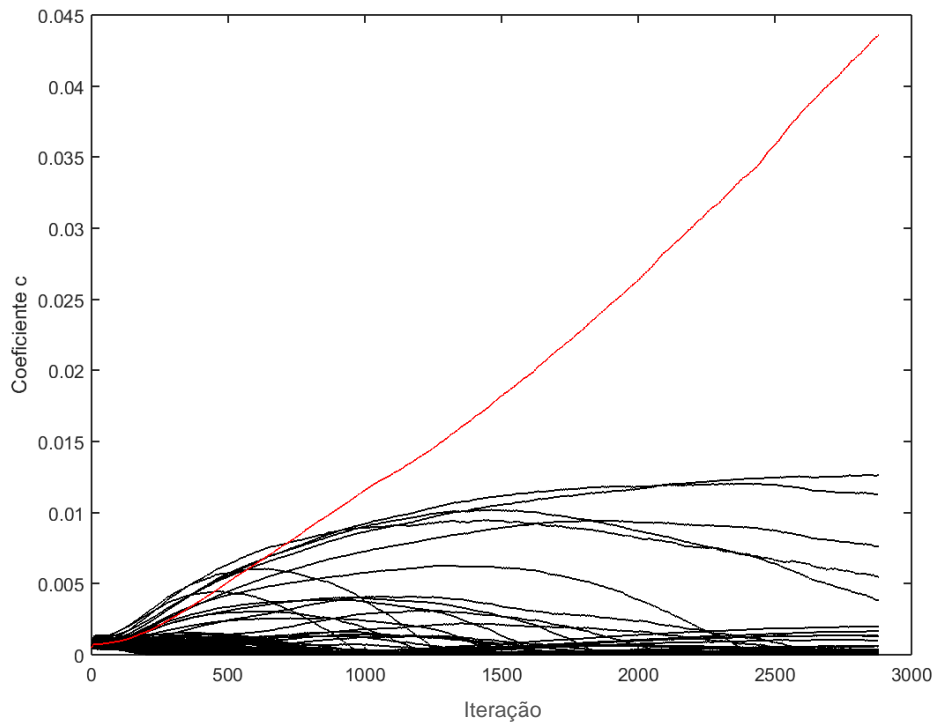
Figura 40 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,1$ e $NME = 200$.

FONTE: Autor (2020).

Figura 41 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,1$ e $NME = 300$.

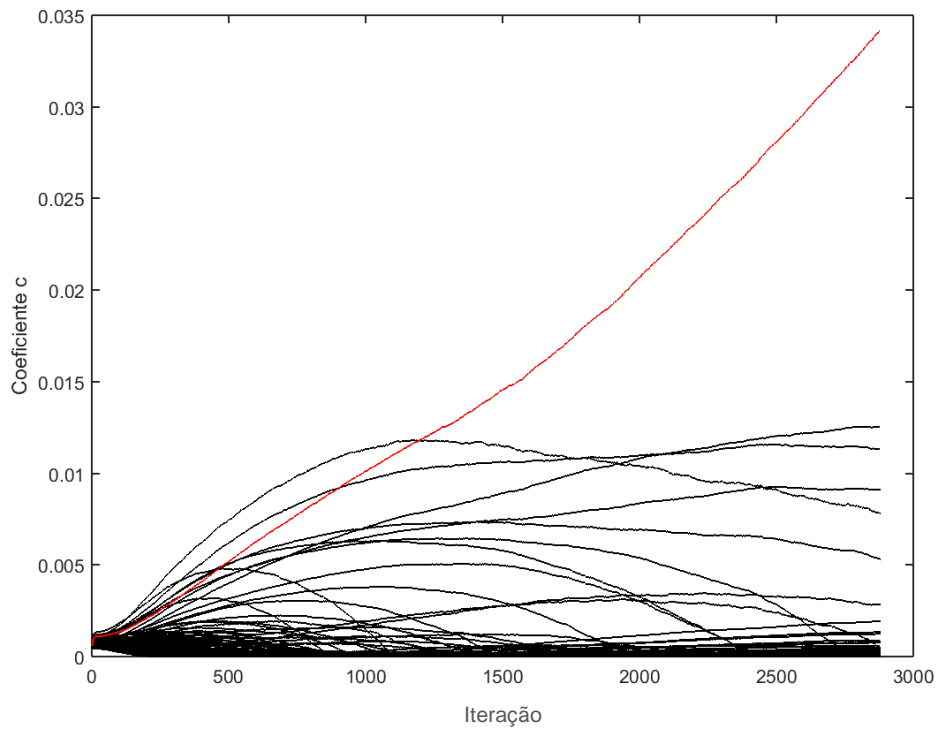
FONTE: Autor (2020).

Figura 42 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s=0,1$ e NME = 400.



FONTE: Autor (2020).

Figura 43 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s=0,1$ e NME = 500.

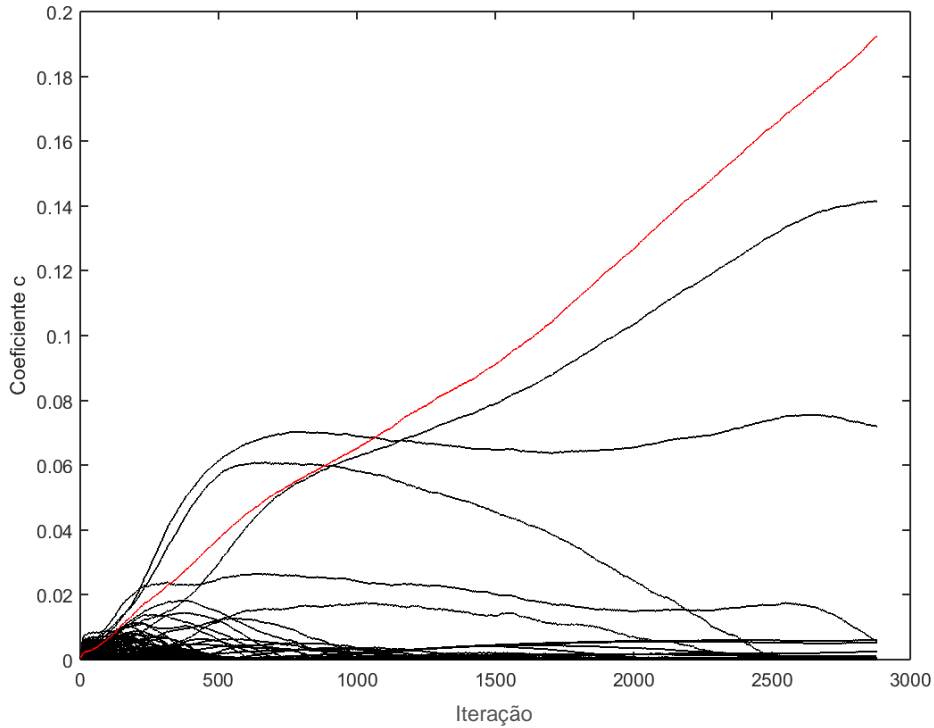


FONTE: Autor (2020).

A Figura 38 apresenta o resultado do caso com $c_s = 0,01$ e NME = 50, no qual não se

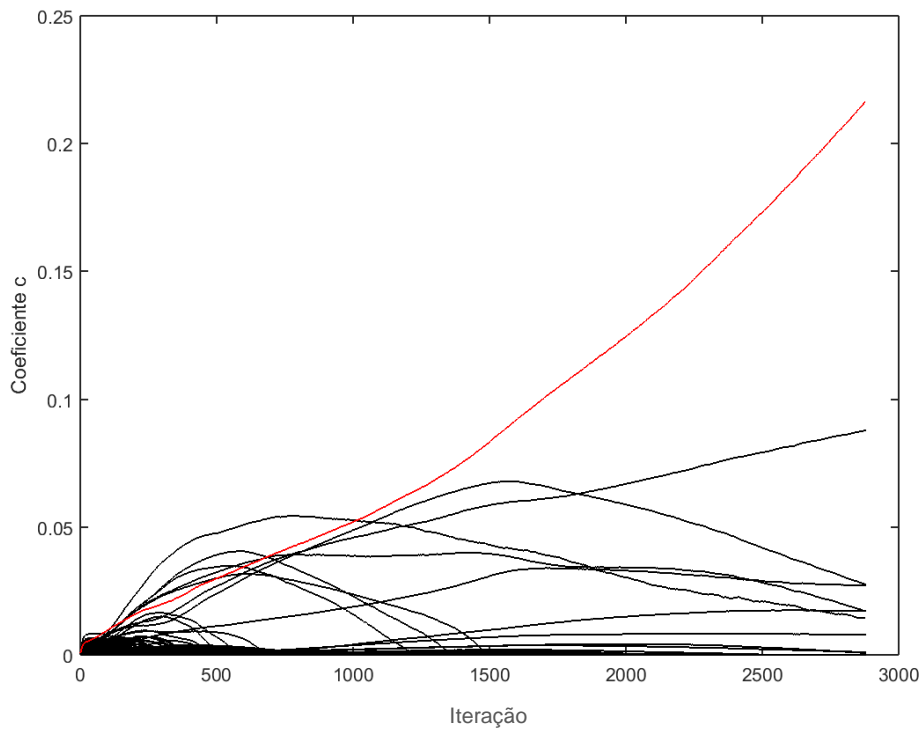
determina a solução correta, ao contrário do que ocorre com as Figuras 39 a 43, com a ocorrência da determinação da solução correta, mesmo sem a estabilização do valor c encontrado em cada caso.

Figura 44 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,5$ e $NME = 50$.



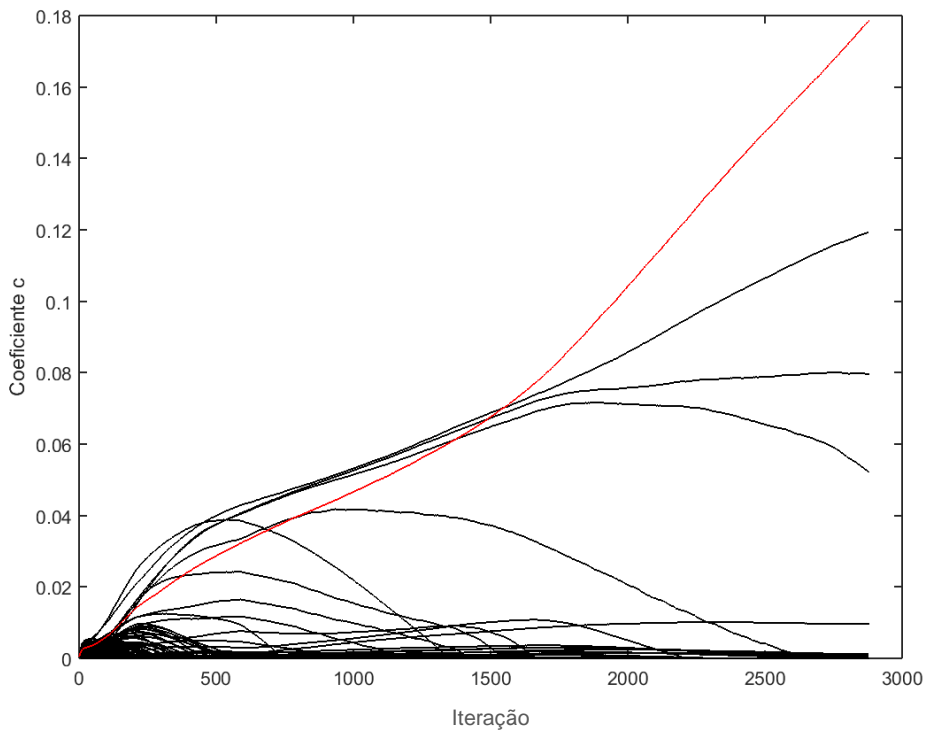
FONTE: Autor (2020).

Figura 45 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,5$ e NME = 100.

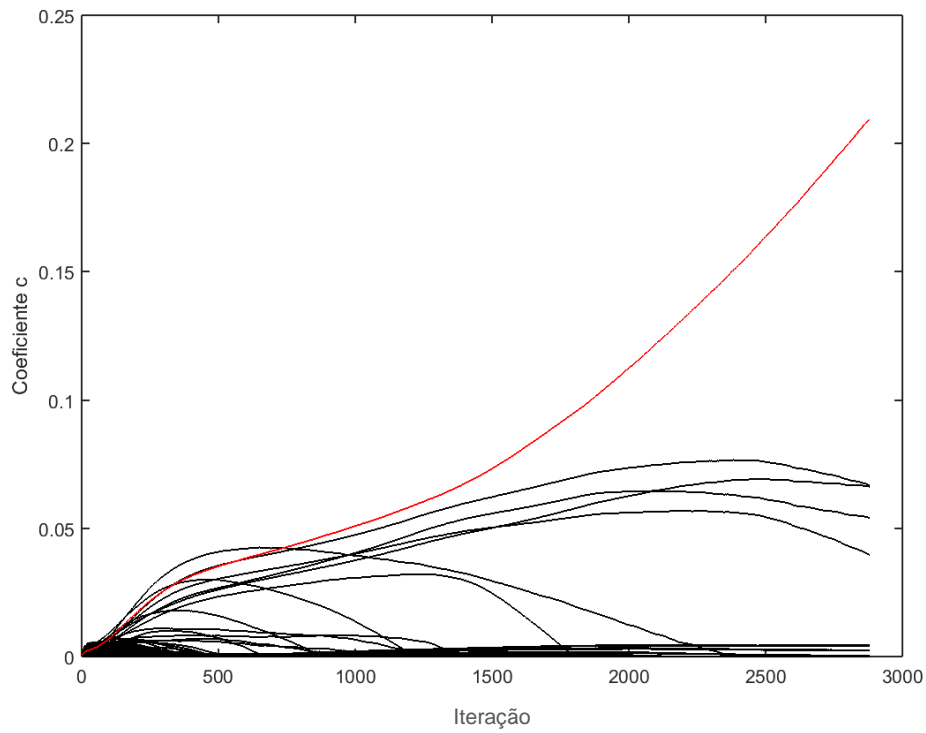


FONTE: Autor (2020).

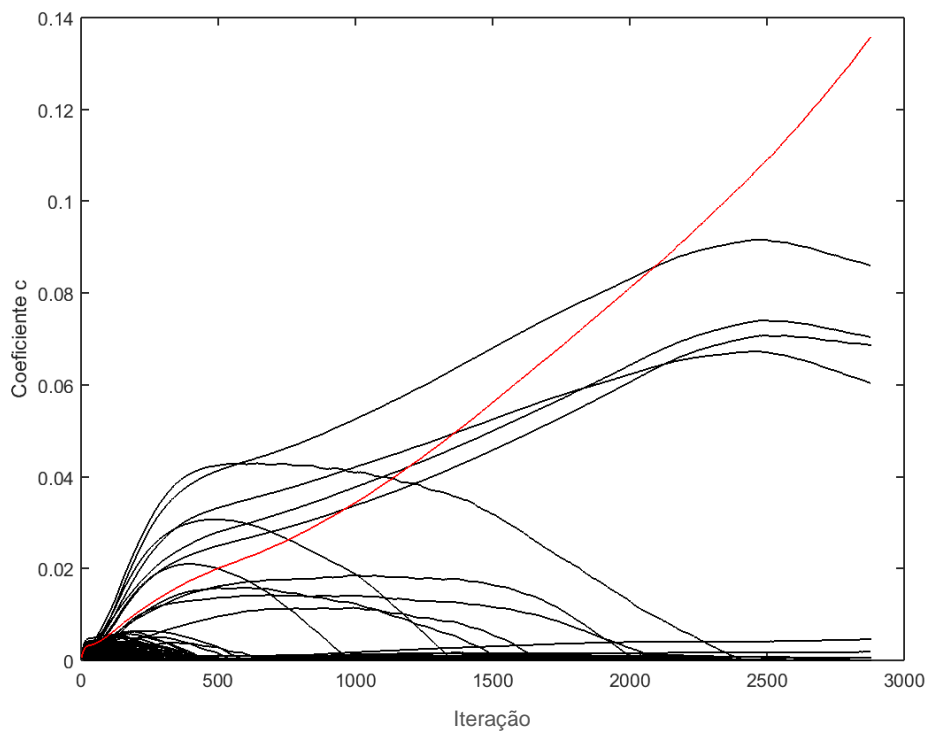
Figura 46 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,5$ e NME = 200.



FONTE: Autor (2020).

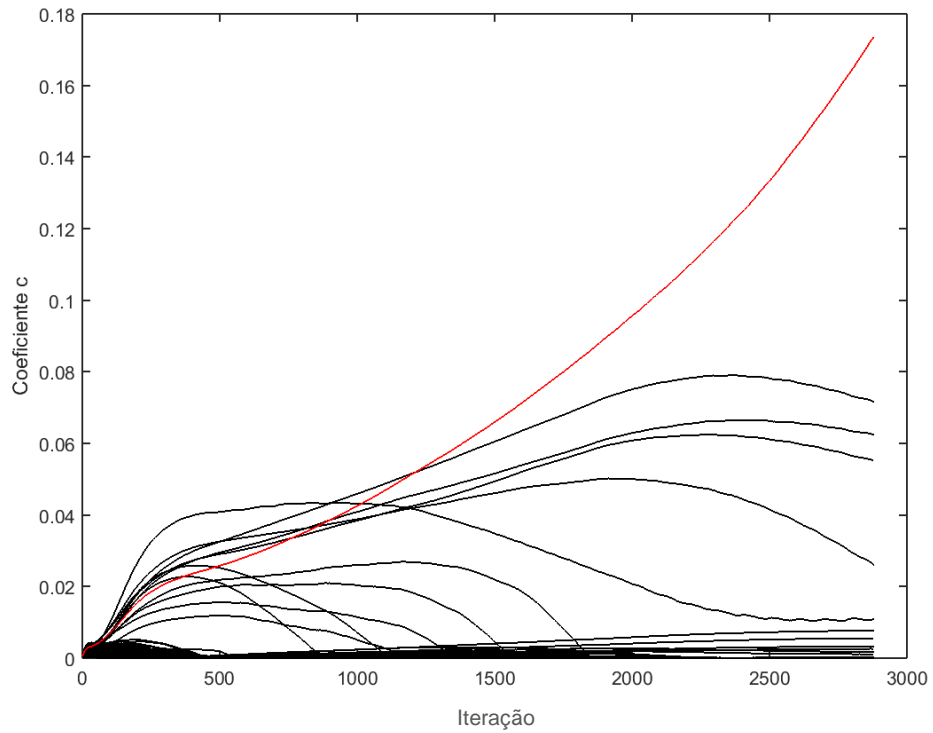
Figura 47 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,5$ e NME = 300.

FONTE: Autor (2020).

Figura 48 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 0,5$ e NME = 400.

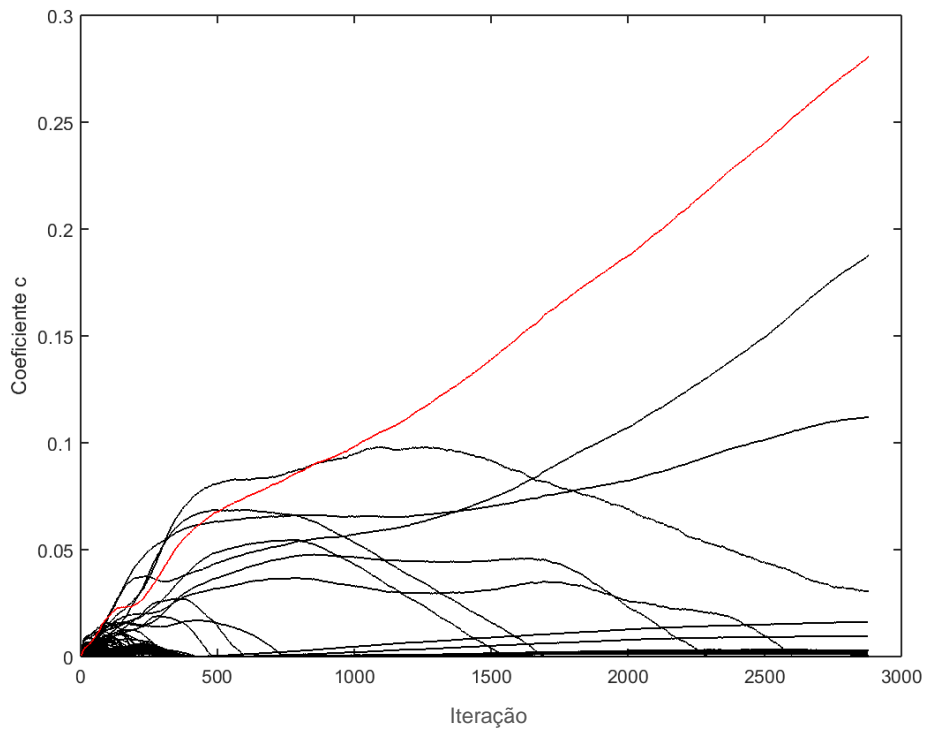
FONTE: Autor (2020).

Figura 49 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s=0,5$ e NME = 500.

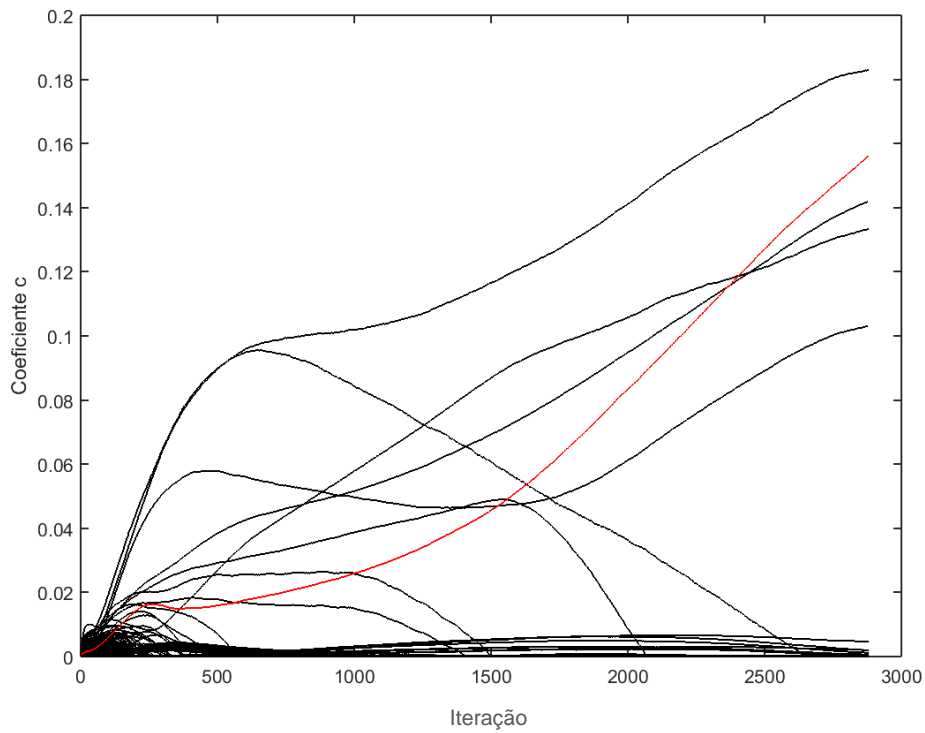


FONTE: Autor (2020).

Nas Figuras 44 a 49 observa-se a determinação da solução correta em todos os casos com os valores diferentes de NME. Também não há a estabilização do valor de c obtido nem a coincidência dos valores de c com c_s .

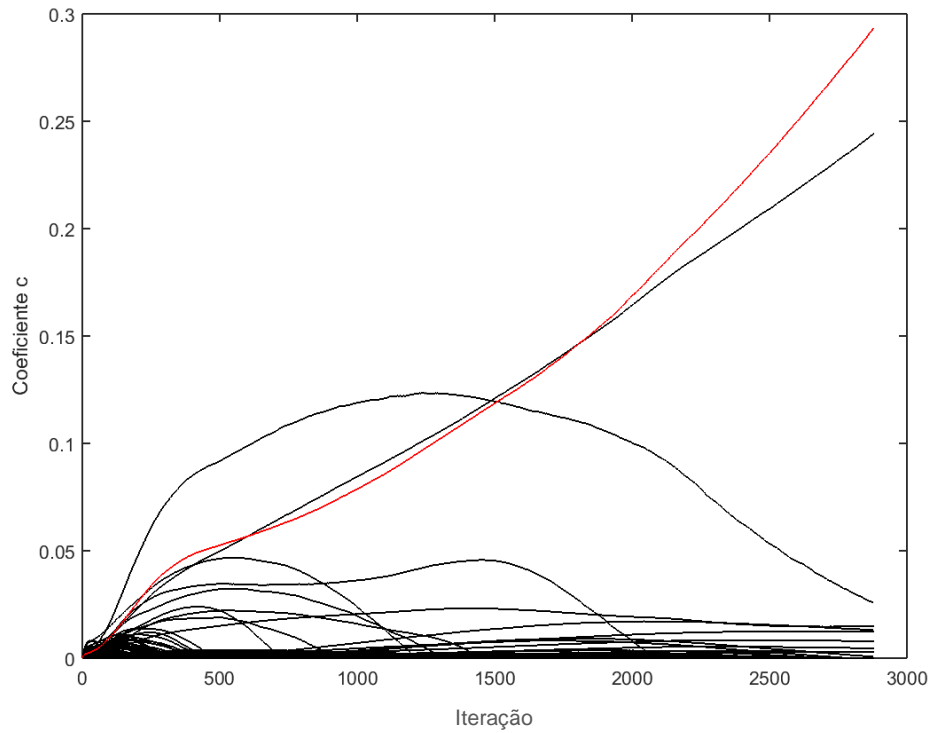
Figura 50 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 1$ e $NME = 50$.

FONTE: Autor (2020).

Figura 51 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 1$ e $NME = 100$.

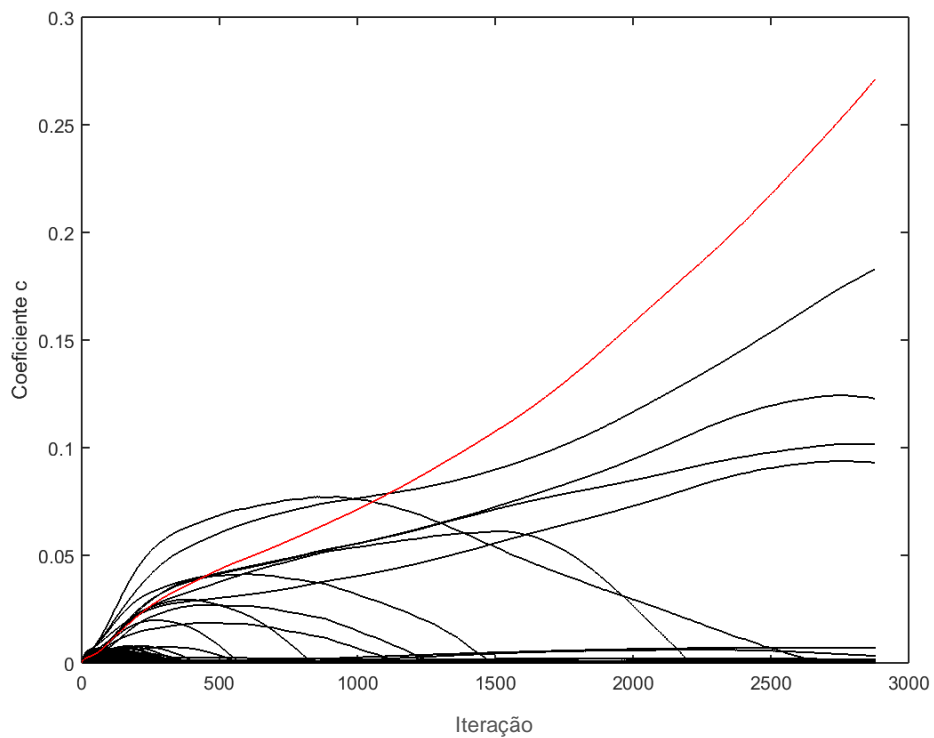
FONTE: Autor (2020).

Figura 52 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 1$ e NME = 200.



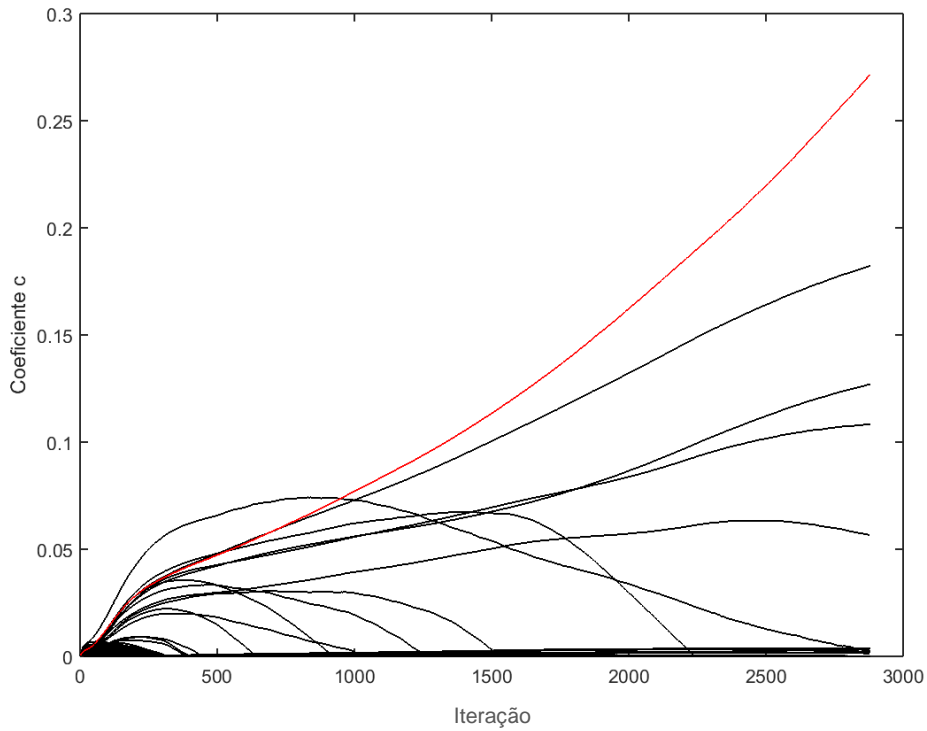
FONTE: Autor (2020).

Figura 53 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 1$ e NME = 300.



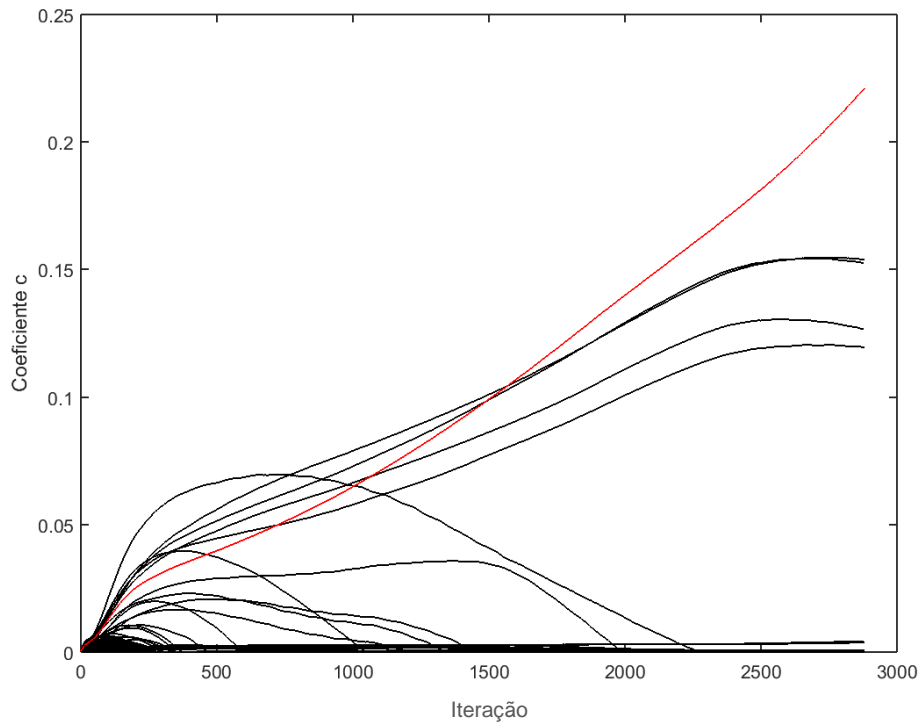
FONTE: Autor (2020).

Figura 54 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 1$ e NME = 400.



FONTE: Autor (2020).

Figura 55 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_s = 1$ e NME = 500.



FONTE: Autor (2020).

As Figuras 50 a 55 apresentam os resultados das simulações para $c_s = 1$, dentre elas,

apenas a Figura 51 representa os resultados do caso em que não se determina a solução correta. Observa-se que não se estabelece na maioria das realizações, a estabilização dos valores estimados de coeficientes de vazamento em um valor fixo como resposta final. Ou seja o processo de localização de vazamento apresenta similaridade de comportamento para as curvas de coeficiente de vazamento obtidas. Observa-se também que a suavidade das curvas apresentadas aumenta a medida que a variável NME também aumenta, suavidade que pode estar relacionada com a influência dos valores da medição no resultado da assimilação.

Para a avaliação do desempenho, são apresentadas nas Tabelas 1 a 5 as médias das pontuações das duas realizações, calculadas de acordo com o desempenho de localização para cada caso simulado, para cada um dos quesitos analisados separadamente para a observação. São destacados os maiores valores observados:

Tabela 1 - Pontuação para P_{NIR} (Número de passos para resposta definitiva).

$\begin{matrix} \text{NME} \\ c_s \end{matrix}$	50	100	200	300	400	500
0,005	0,0	0,0	0,0	0,0	46,0	0,0
0,01	0,0	0,0	0,0	45,7	0,0	30,9
0,05	54,9	50,5	37,5	61,8	49,7	70,5
0,1	22,2	47,9	56,1	65,3	66,1	60,9
0,5	30,9	61,8	44,4	69,6	41,8	56,6
1	61,8	19,6	56,6	61,8	62,7	59,2

FONTE: Autor (2020).

Na Tabela 1, a maior pontuação P_{NIR} , obtida através da Equação 22, se dá no caso $c = 0,05$ com $NME = 500$ e observa-se menores pontuações em geral para casos com $c \leq 0,01$. Isso se relaciona com a não ocorrência do cálculo da pontuação P_{NIR} nos casos em que não há determinação da solução correta. Apresenta-se a Tabela 2:

Tabela 2 - Pontuação para P_{TRA} (Tempo de compilação do algoritmo).

$\begin{matrix} \text{NME} \\ c_s \end{matrix}$	50	100	200	300	400	500
0,005	90,4	80,4	60,1	40,2	20,3	0,0
0,01	90,4	80,4	60,1	40,2	20,3	0,0
0,05	90,4	80,4	60,1	40,2	20,3	0,0
0,1	90,4	80,4	60,1	40,2	20,3	0,0
0,5	90,4	80,4	60,1	40,2	20,3	0,0
1	90,4	80,4	60,1	40,2	20,3	0,0

FONTE: Autor (2020).

A Tabela 2 apresenta valores idênticos de pontuação P_{TRA} para os casos com NME em comum com maiores pontuações para os casos com $NME = 50$. Ocorre que a pontuação,

calculada com a Equação 23, é inversamente proporcional aos tempos de realização do algoritmo submetido aos diferentes valores de NME. Ou seja, quanto menor NME, menor é o tempo de realização e maior é a pontuação obtida. Apresenta-se a Tabela 3:

Tabela 3 - Pontuação para P_{SC} (Solução correta).

NME c_s	50	100	200	300	400	500
0,005	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0	0,0
0,01	0,0	0,0	0,0	50,0	0,0	50,0
0,05	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,1	50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,5	50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1	100,0	50,0	100,0	100,0	100,0	100,0

FONTE: Autor (2020).

A Tabela 3 demonstra as pontuações P_{SC} relativas à determinação da solução correta (localização correta do vazamento simulado). $P_{SC} = 100$ se refere à localização correta do vazamento nas duas realizações do mesmo caso; $P_{SC} = 0$ significa que em nenhuma das realizações o vazamento foi localizado corretamente e $P_{SC} = 50$ significa que em apenas uma realização houve a solução correta.. Além disso observa-se pontuações nulas geralmente nos casos com $c \leq 0,01$. Possivelmente pela dificuldade de se localizar corretamente vazamentos menos expressivos com a metodologia utilizada. Observa-se também maiores pontuações obtidas no conjunto dos casos com maiores NME (300, 400 e 500). O que pode evidenciar maior capacidade de localização de vazamentos com estes valores de NME. Também, é claro o desempenho eficiente em todos os casos com $c = 0, 05$, entretanto não ficam claros os motivos deste resultado. Apresenta-se a Tabela 4:

Tabela 4 - Pontuação para P_{SI} (Soluções incorretas).

NME c_s	50	100	200	300	400	500
0,005	-35,0	-25,0	-25,0	-25,0	-20,0	-20,0
0,01	-35,0	-20,0	-30,0	-20,0	-25,0	-10,0
0,05	-5,0	-20,0	-10,0	-20,0	-30,0	-20,0
0,1	-15,0	-15,0	-10,0	-20,0	-20,0	-15,0
0,5	-30,0	-15,0	-30,0	-30,0	-30,0	-25,0
1	-20,0	-30,0	-15,0	-35,0	-35,0	-35,0

FONTE: Autor (2020).

Particularmente, a Tabela 4, é composta exclusivamente de pontuações negativas. Naturalmente, isso se relaciona à quantificação da ineficiência do processo de localização de

vazamento quando resulta em soluções incorretas. Em suma, maiores números de soluções incorretas resultam em menores pontuações. Apresenta-se a Tabela 5:

Tabela 5 - Pontuação para P_{MV} (Magnitude do vazamento em solução correta).

NME c_s	50	100	200	300	400	500
0,005	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	0,0
0,01	0,0	0,0	0,0	27,5	0,0	13,0
0,05	46,0	33,0	33,0	32,0	27,0	28,0
0,1	22,5	44,0	39,5	45,5	42,0	37,0
0,5	19,0	43,0	34,0	41,0	31,5	35,5
1	36,5	14,0	30,0	26,3	25,8	26,3

FONTE: Autor (2020).

A Tabela 5 não mostra uma tendência significativa em relação às pontuações calculadas, além daquela existente nas Tabelas 1 e 3 com cálculos de pontuação relacionados à determinação da solução correta. Isto é, observam-se, em geral, as maiores pontuações calculadas nos casos com $c \geq 0,05$. O que também se relaciona com a ocorrência da determinação da solução correta.

Apresentam-se nas Tabelas 6 a 11 os valores de variáveis da análise de eficiência obtidas em cada caso simulado, agrupadas pela variável NME. Reafirma-se que para exemplificação, apresentam-se apenas resultados de uma das duas realizações:

Tabela 6 - Variáveis de análise para NME = 50.

c_s	N_i	T_i	SC	nSI	VC_e
0,005	2800	26	0	4	0
0,01	600	26	0	3	0
0,05	2000	26	1	1	0,021
0,1	1200	26	0	2	0
0,5	1100	26	1	2	0,190
1	800	26	1	2	0

FONTE: Autor (2020).

Tabela 7 - Variáveis de análise para NME = 100.

c_s	N_i	T_i	SC	nSI	VC_e
0,005	1750	53	0	3	0
0,01	400	53	0	2	0
0,05	1850	53	1	3	0,020
0,1	1600	53	1	2	0,050
0,5	1000	53	1	1	0,220
1	600	53	0	4	0

FONTE: Autor (2020).

Tabela 8 - Variáveis de análise para NME = 200.

c_s	N_i	T_i	SC	nSI	VC_e
0,005	1900	108	0	3	0
0,01	500	108	0	3	0
0,05	2000	108	1	1	0,015
0,1	1050	108	1	0	0,039
0,5	1600	108	1	3	0,180
1	1700	108	1	1	0,3

FONTE: Autor (2020).

Tabela 9 - Variáveis de análise para NME = 300.

c_s	N_i	T_i	SC	nSI	VC_e
0,005	500	162	0	2	0
0,01	2250	162	0	1	0
0,05	600	162	1	2	0,017
0,1	1100	162	1	2	0,046
0,5	750	162	1	3	0,21
1	1100	162	1	3	0,276

FONTE: Autor (2020).

Tabela 10 - Variáveis de análise para NME = 400.

c_s	N_i	T_i	SC	nSI	VC_e
0,005	400	216	0	3	0
0,01	500	216	0	1	0
0,05	1400	216	1	2	0,014
0,1	650	216	1	2	0,044
0,5	2100	216	1	4	0,135
1	900	216	1	3	0,275

FONTE: Autor (2020).

Tabela 11 - Variáveis de análise para NME = 500.

c_s	N_i	T_i	SC	nSI	VC_e
0,005	500	271	0	2	0
0,01	1100	271	1	0	0,003
0,05	1000	271	1	3	0,012
0,1	1150	271	1	2	0,034
0,5	1250	271	1	3	0,175
1	1600	271	1	4	0,225

FONTE: Autor (2020).

De maneira geral, nem todas as variáveis de análise obtidas através da realização em

questão apresentam uma tendência clara em relação a variação da variável NME. A variável N_i , número de iterações até a obtenção da resposta definitiva, tem valores variados independentemente do acréscimo em NME. Entretanto a variável T_i , tempo de duração de uma iteração, tem valores elevados a medida que NME aumenta.

A variável SC apresenta um comportamento característico em relação ao aumento do valor de NME. Isto é, para maiores valores de NME a quantidade de soluções corretas encontrada ($SC = 1$) é maior. O mesmo ocorre com a variável VC_e , valor do coeficiente de vazamento encontrado, são obtidos maiores valores conforme NME aumenta. Isso porque a avaliação da variável VC_e está subordinada à ocorrência da solução correta ($SC = 1$). Já a variável nSI , número de soluções incorretas, também não demonstra um padrão em seus valores em relação à variável NME.

Com os valores das variáveis de análise coletados e aplicando-se as Equações 22 a 26 são obtidas as pontuações de cada caso em cada uma das duas realizações. Os dados da realização referente às variáveis demonstradas nas Tabelas 6 a 11 se apresentam nas Tabelas 12 a 17:

Tabela 12 - Pontuações calculadas para NME=50.

c_s	P_{NIR}	P_{TCA}	P_{SC}	P_{SI}	P_{MV}	P_f
0,005	0,0	90,4	0,0	-40,0	0,0	1,3
0,01	0,0	90,4	0,0	-30,0	0,0	3,8
0,05	30,6	90,4	100,0	-10,0	42,0	48,1
0,1	0,0	90,4	0,0	-20,0	0,0	6,3
0,5	61,8	90,4	100,0	-20,0	38,0	48,5
1	72,2	90,4	100,0	-20,0	28,0	47,3

FONTE: Autor (2020).

Tabela 13 - Pontuações calculadas para NME=100.

c_s	P_{NIR}	P_{TCA}	P_{SC}	P_{SI}	P_{MV}	P_f
0,005	0,0	80,4	0,0	-30,0	0,0	2,6
0,01	0,0	80,4	0,0	-20,0	0,0	5,1
0,05	35,8	80,4	100,0	-30,0	34,0	40,5
0,1	44,4	80,4	100,0	-20,0	48,0	47,6
0,5	65,3	80,4	100,0	-10,0	44,0	51,7
1	0,0	80,4	0,0	-40,0	0,0	0,1

FONTE: Autor (2020).

Tabela 14 - Pontuações calculadas para NME=200.

c_s	P_{NIR}	P_{TCA}	P_{SC}	P_{SI}	P_{MV}	P_f
-------	-----------	-----------	----------	----------	----------	-------

0,005	0,0	60,1	0,0	-30,0	0,0	0,0
0,01	0,0	60,1	0,0	-30,0	0,0	0,0
Continua						
c_s	P_{NIR}	P_{TCA}	P_{SC}	P_{SI}	P_{MV}	P_f
0,05	30,6	60,1	100,0	-10,0	30,0	41,3
0,1	63,5	60,1	100,0	0,0	39,0	50,2
0,5	44,4	60,1	100,0	-30,0	36,0	39,6
1	41,0	60,1	100,0	-10,0	30,0	42,6

FONTE: Autor (2020).

Tabela 15 - Pontuações calculadas para NME=300.

c_s	P_{NIR}	P_{TCA}	P_{SC}	P_{SI}	P_{MV}	P_f
0,005	0,0	40,2	0,0	-20,0	0,0	0,0
0,01	0,0	40,2	0,0	-10,0	0,0	2,5
0,05	79,2	40,2	100,0	-20,0	34,0	43,4
0,1	61,8	40,2	100,0	-20,0	46,0	44,3
0,5	74,0	40,2	100,0	-30,0	42,0	42,3
1	61,8	40,2	100,0	-30,0	27,6	37,2

FONTE: Autor (2020).

Tabela 16 - Pontuações calculadas para NME=400.

c_s	P_{NIR}	P_{TCA}	P_{SC}	P_{SI}	P_{MV}	P_f
0,005	0,0	20,3	0,0	-30,0	0,0	-5,0
0,01	0,0	20,3	0,0	-10,0	0,0	0,0
0,05	51,4	20,3	100,0	-20,0	28,0	36,0
0,1	77,4	20,3	100,0	-20,0	44,0	43,2
0,5	27,1	20,3	100,0	-40,0	27,0	27,7
1	68,8	20,3	100,0	-30,0	27,5	35,5

FONTE: Autor (2020).

Tabela 17 - Pontuações calculadas para NME=500.

c_s	P_{NIR}	P_{TCA}	P_{SC}	P_{SI}	P_{MV}	P_f
0,005	0,0	0,0	0,0	-20,0	0,0	-5,0
0,01	61,8	0,0	100,0	0,0	26,0	39,2
0,05	65,3	0,0	100,0	-30,0	24,0	31,7
0,1	60,1	0,0	100,0	-20,0	34,0	36,0
0,5	56,6	0,0	100,0	-30,0	35,0	33,3
1	44,4	0,0	100,0	-40,0	22,5	26,2

FONTE: Autor (2020).

De acordo com a comparação entre as pontuações de cada critério isolado, pode se afirmar que a ponderação representada pela Equação 25 se reflete nos resultados obtidos. Realmente se observa a diferença entre as pontuações obtidas nos casos em que ocorre a solução correta ($P_{SC} = 100$) e as pontuações dos casos em que a solução correta não ocorre.

Além disso destaca-se que a capacidade de localização do vazamento no nó correto (*SC*) é o critério principal no cálculo da pontuação final, uma vez que a ocorrência ou não da solução correta influencia no cálculo da pontuação P_{NIR} e P_{MV} . Isto é, se a solução correta não é encontrada não se calcula P_{NIR} nem P_{MV} . Dentre os casos que apresentam soluções corretas, observa-se a variação menos expressiva nas pontuações, o que se relaciona às pontuações obtidas nos outros quesitos analisados.

Apresenta-se o somatório das pontuações obtidas por cada um dos trinta e seis casos em cada uma das duas realizações da metodologia de avaliação nas Tabelas 18 e 19. A Tabela 18 se refere às pontuações demonstradas nas Tabelas 12 a 17. Já a Tabela 19 apresenta dados da realização que não foi exposta anteriormente.

Tabela 18 - Pontuação da primeira realização.

$\begin{matrix} \text{NME} \\ c_s \end{matrix}$	50	100	200	300	400	500
0,005	1,3	2,6	0,0	0,0	-5,0	-5,0
0,01	3,8	5,1	0,0	2,5	0,0	39,2
0,05	48,1	40,5	41,3	43,4	36,0	31,7
0,1	6,3	47,6	50,2	44,3	43,2	36,0
0,5	48,5	51,7	39,6	42,3	27,7	33,3
1	47,3	0,1	42,6	37,2	35,5	26,2

FONTE: Autor (2020).

Tabela 19 - Pontuação da segunda realização.

$\begin{matrix} \text{NME} \\ c_s \end{matrix}$	50	100	200	300	400	500
0,005	3,8	5,1	2,5	-2,5	49,0	-5,0
0,01	1,3	5,1	0,0	47,7	-7,5	-5,0
0,05	58,7	48,7	44,6	38,1	30,0	40,0
0,1	50,6	49,0	43,6	44,9	39,4	40,2
0,5	1,3	47,8	38,6	40,7	38,6	36,1
1	49,0	42,0	44,0	34,0	30,6	34,2

FONTE: Autor (2020).

A comparação das Tabelas 18 e 19 permite identificar variações do desempenho na localização de vazamento em dois casos de realização. Por exemplo, os casos $c = 0,005$ com $\text{NME} = 400$; $c = 0,01$ com $\text{NME} = 300$ e $c = 0,01$ com $\text{NME} = 500$ ou apresentam diferenças significativas de pontuações entre as Tabelas 18 e 19 com suas pontuações variando em cerca de 40 pontos. Tal fato observado é justificado pela inconstância da localização do vazamento no nó correto ao longo das duas realizações de simulações, o que se relaciona aos valores. De maneira semelhante, os casos $c = 0,1$ com $\text{NME} = 50$; $c = 0,5$ com $\text{NME} = 50$ e $c = 1$ com

NME = 100 também têm grandes variações nas pontuações obtidas nas duas realizações. O que também é causada pela mesma inconstância na localização correta do vazamento no caso estudado.

Por fim, apresenta-se a Tabela 20 que contém média das pontuações obtidas nas Tabelas 18 e 19. Também são mostrados os valores média e desvio padrão para os valores localizados na mesma coluna, considerando uma das variáveis fixada (c fixada ao longo da linha ou NME fixada ao longo da coluna).

Tabela 20 - Pontuação final.

NME c_s	50	100	200	300	400	500
0,005	2,6	3,8	1,3	-1,2	22,0	-5,0
0,01	2,6	5,1	0,0	25,1	-3,7	17,1
0,05	53,4	44,6	43,0	40,8	33,0	35,8
0,1	28,5	48,3	46,9	44,6	41,3	38,1
0,5	24,9	49,8	39,1	41,5	33,1	34,7
1	48,2	21,0	43,3	35,6	33,1	30,2
Média	26,7	28,8	28,9	31,0	26,5	25,2
DP	21,6	21,5	22,0	17,2	16,0	16,5

FONTE: Autor (2020).

Como proposto, a pontuação calculada para cada caso estudado é diretamente proporcional à eficiência do método de detecção de vazamentos com os dados de entrada característicos. Assim, é possível identificar na Tabela 20 uma região de atuação preferencial do método estudado. Ou seja, observa-se que as duas primeiras linhas da tabela, que representam os casos estudados com o coeficiente de vazamentos $c = 0,005$ e $c = 0,01$, apresentam pontuações menores em relação aos outros casos estudados. O que pode estar relacionado com uma dificuldade pela metodologia apresentada em detectar vazamentos de pequena magnitude.

Outra característica apresentada se dá pela observação das últimas quatro linhas da Tabela 20 que representam os casos estudados com c variando de 0,05 até 1. Nesta região da Tabela 20, não se observa uma tendência expressiva de variação relacionada com o coeficiente c .

Alem disso, observa-se, que a pontuação mais elevada se apresenta em um dos casos com menor NME. A razão para tal resultado pode ser atribuída à ocorrência de menos soluções incorretas. Isto é, as maiores pontuações observadas na Tabela 20 correspondem aos

menores números de soluções incorretas como se observa na Tabela 4.

Também é notável a relação entre efetividade na determinação da solução correta e o tempo de compilação do algoritmo. Isto é, menores valores de NME apresentam menos soluções corretas mesmo com menor tempo de compilação do algoritmo. Ao contrário, maiores valores de NME resultam em mais soluções corretas com maior tempo de compilação. Tal tendência se evidencia pela observação das Tabelas 2 e 3.

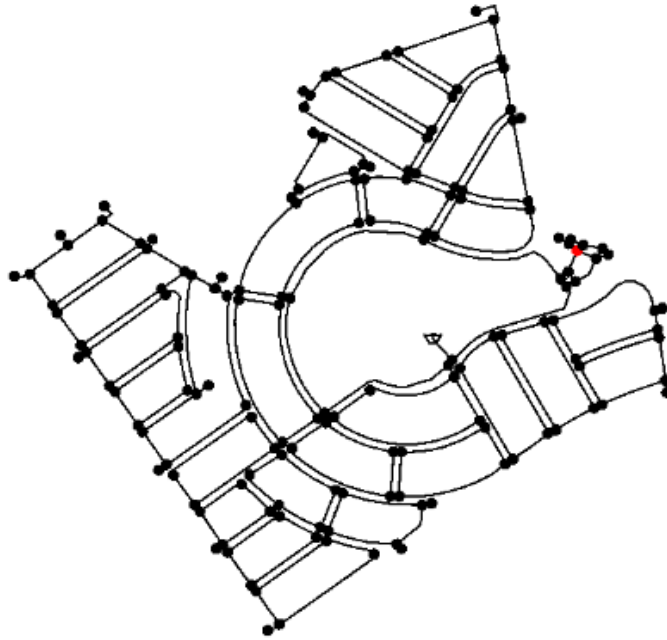
Observa-se também que, de acordo com as médias e desvios padrão de casos com mesmo NME, mesmo com os valores de médias próximos entre si, casos com maior NME apresentam menor desvio padrão e, conseqüentemente, maior confiabilidade.

Como toda a análise anterior se baseia na detecção de um vazamento simulado em um mesmo nó escolhido aleatoriamente, optou-se pela simulação de vazamentos em outras regiões da rede, com as variáveis que geram maiores pontuações. Busca-se assim a avaliação de eficiência para outros tipos nós da rede.

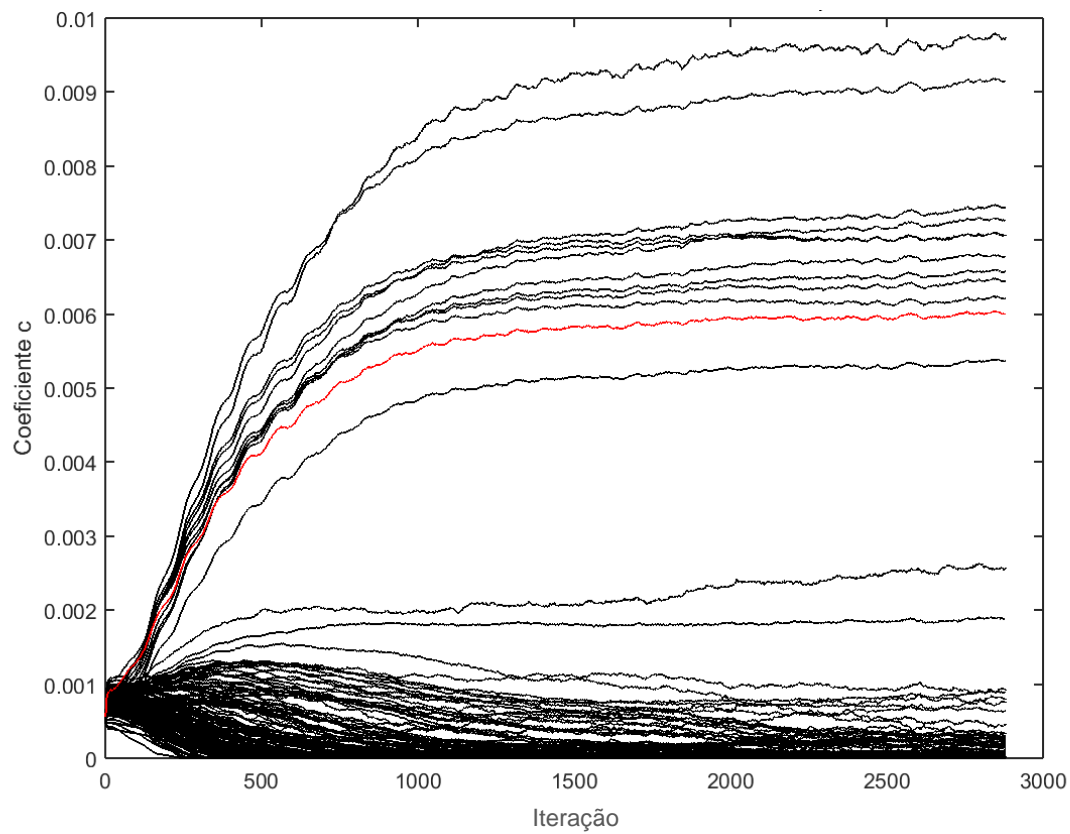
Os casos do Modelo Sintético criados para a análise de desempenho apresentada se caracterizam pela a localização do vazamento simulado no mesmo nó localizado entre o anel central e a extremidade da rede conforme a Figura 13. Para a análise de eficiência do processo de localização de vazamentos, foram propostas outras quatro localizações de vazamentos. Foi adotado $NME = 500$ por apresentar menor desvio padrão na Tabela 20 e $c = 0,05$ por apresentar todos valores $P_{SC} = 100$ na Tabela 3. Nesta etapa do trabalho, ainda se trata do modelo sintético para as análises propostas.

Os quatro nós selecionados para as quatro simulações feitas apresentam, cada um, uma das seguintes características: nó pertencente ao anel central; nó próximo ao anel central; nó na extremidade da rede e novamente um nó entre o anel central e a extremidade para validação dos resultados obtidos na análise inicial. Apresentam-se as localizações dos nós selecionados nas Figuras 56, 58, 60 e 62 e as respectivas soluções encontradas nas Figuras 57, 59, 61 e 63 :

Figura 56 - Localização do vazamento simulado – Anel central.

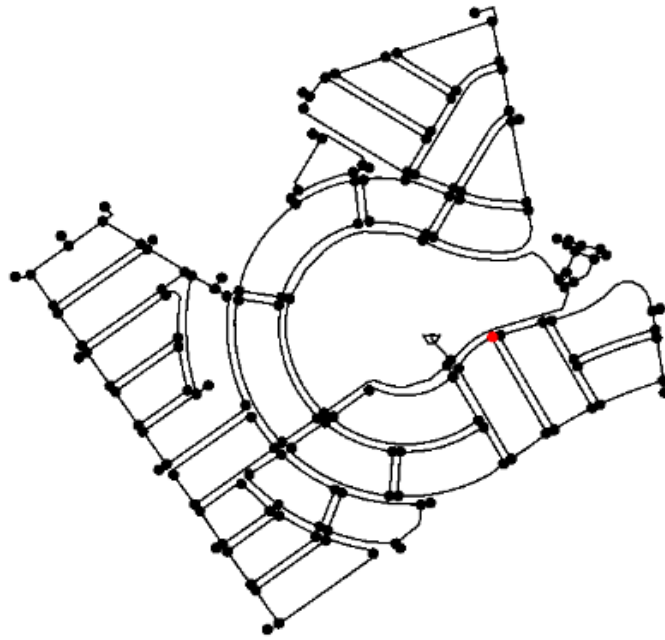


FONTE: Autor (2020).

Figura 57 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_r = 0,05$ e NME = 500.

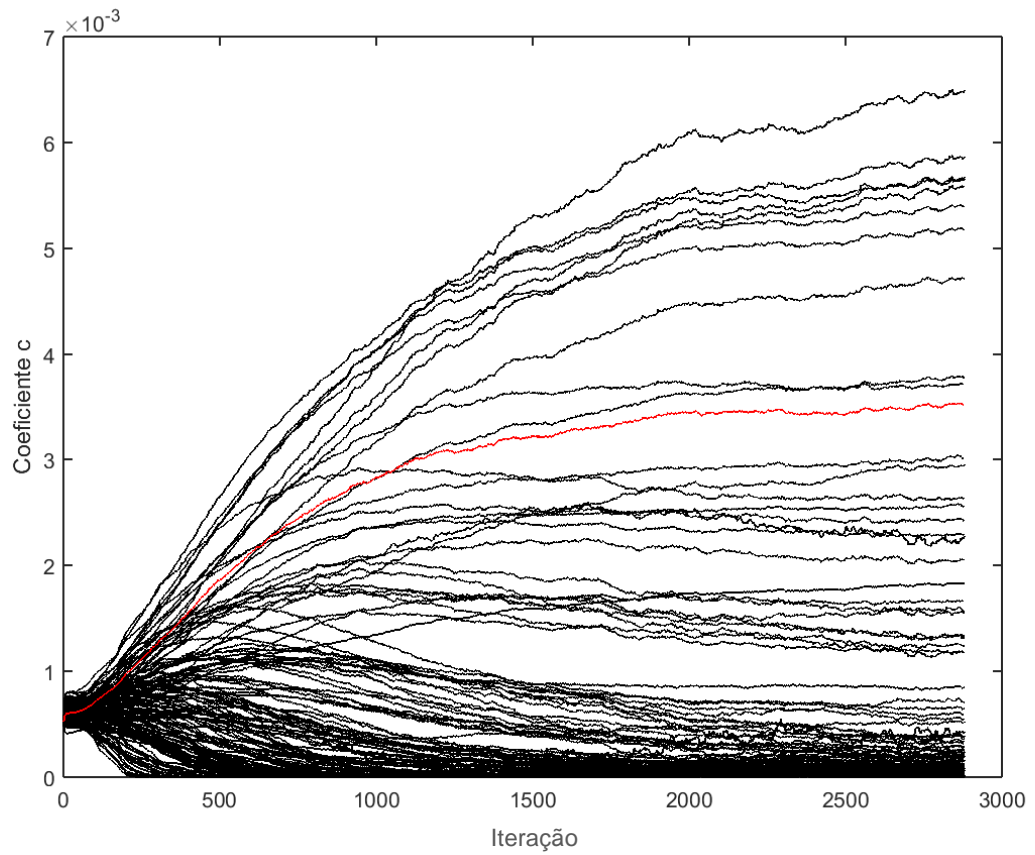
FONTE: Autor (2020).

Figura 58 - Localização do vazamento simulado- Próximo ao anel central.



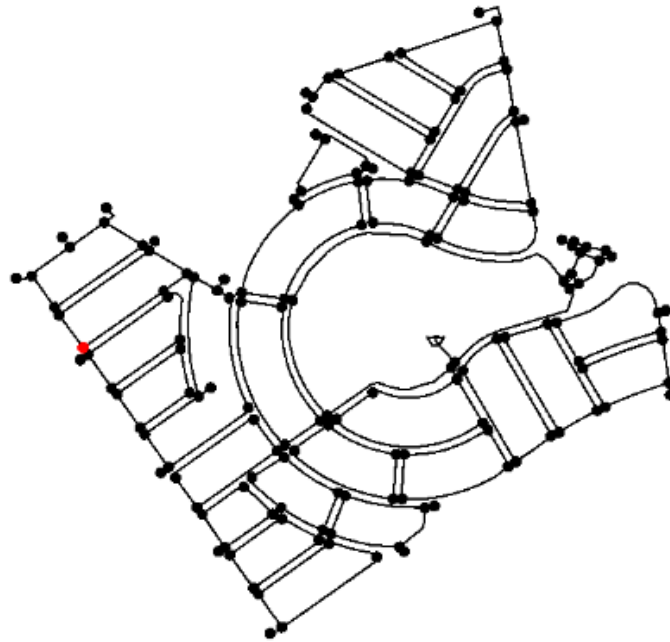
FONTE: Autor (2020).

Figura 59 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_r = 0,05$ e NME = 500.

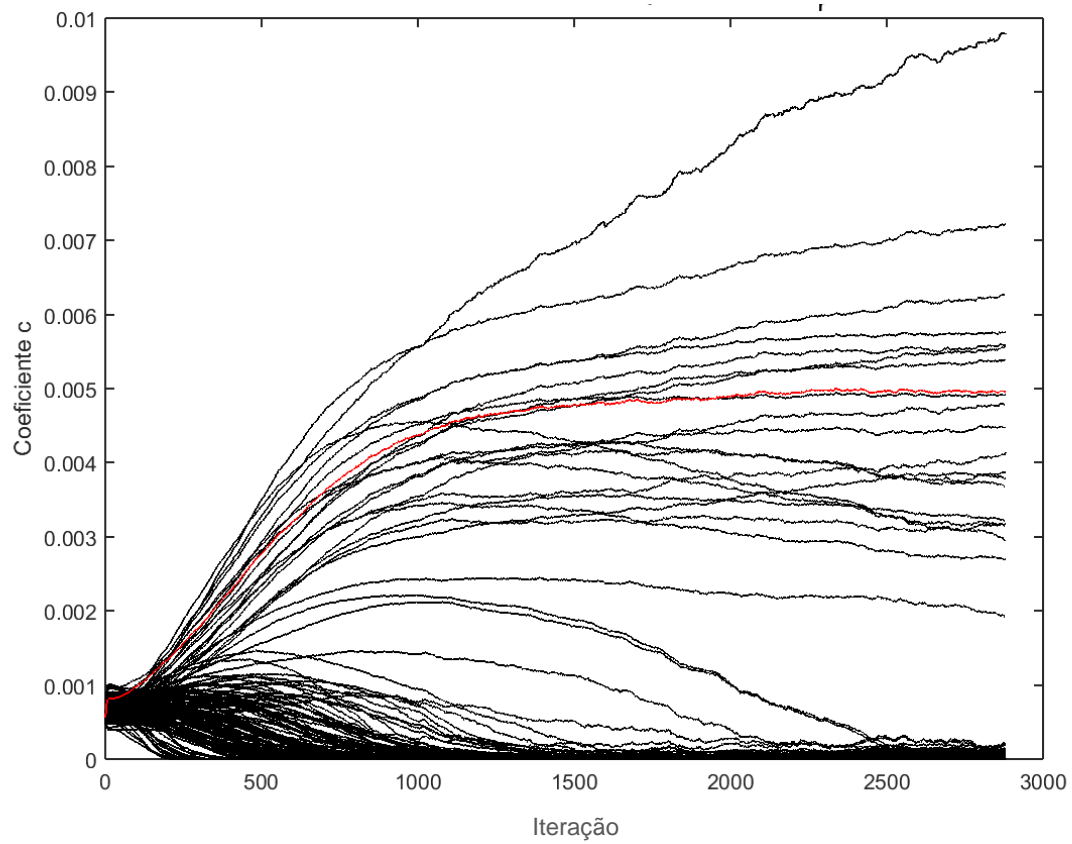


FONTE: Autor (2020).

Figura 60 - Localização do vazamento simulado- Extremidade da rede.

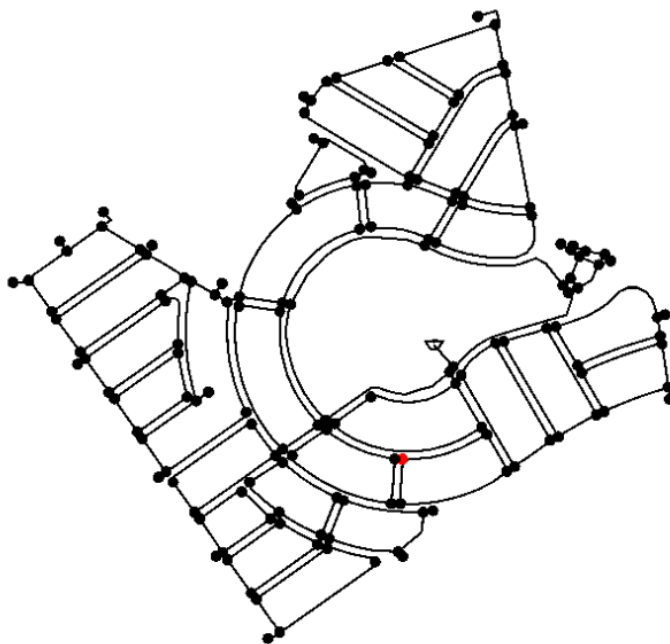


FONTE: Autor (2020).

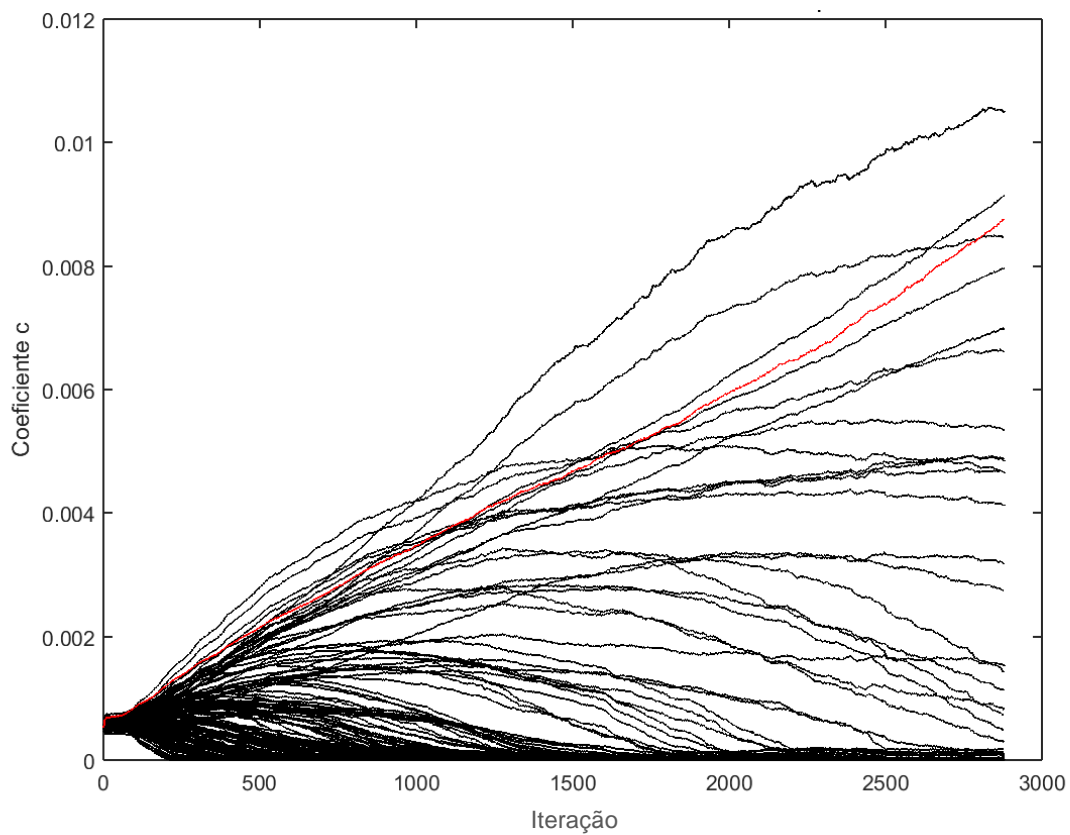
Figura 61 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_r = 0,05$ e NME = 500.

FONTE: Autor (2020).

Figura 62 - Localização do vazamento simulado – Entre anel central e extremidade.



FONTE: Autor (2020).

Figura 63 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó $c_r = 0,05$ e NME = 500.

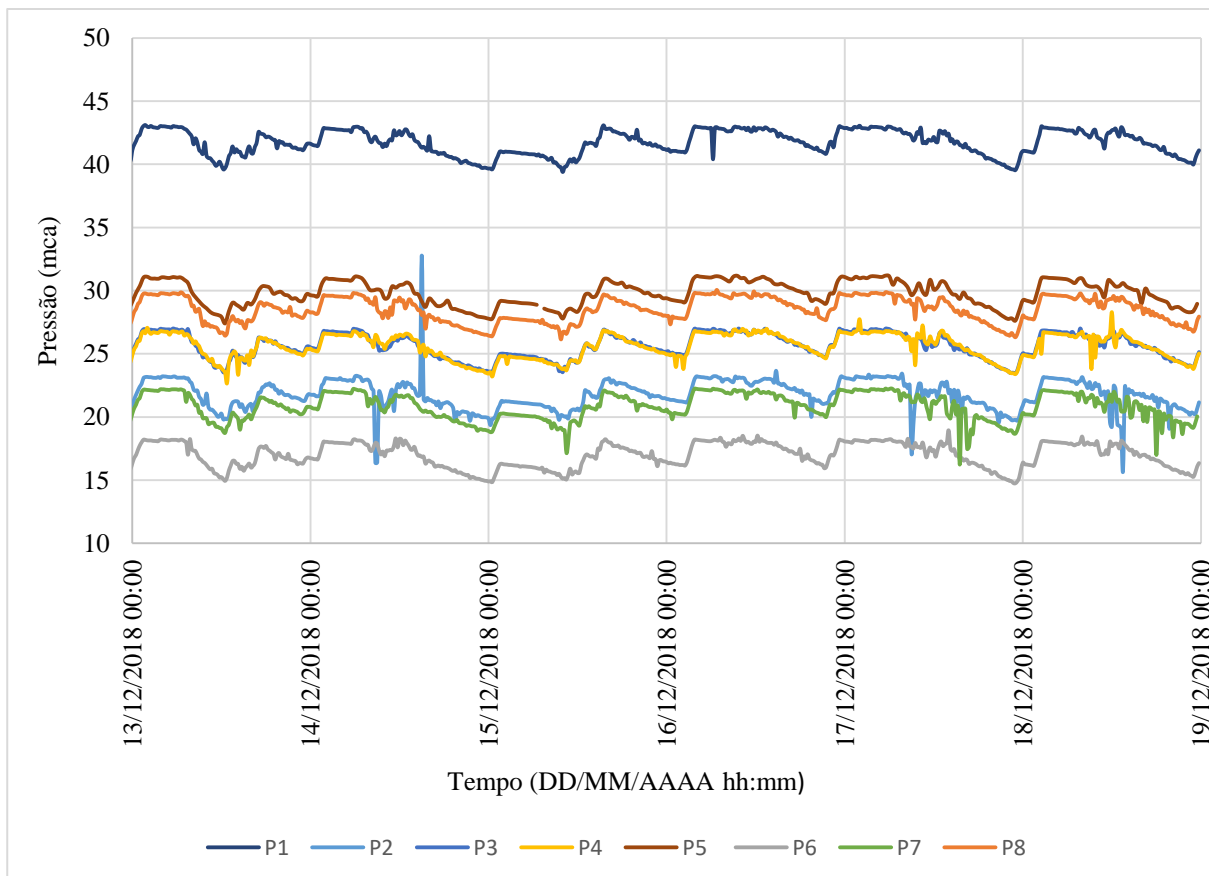
FONTE: Autor (2020).

Com a observação das Figuras 57, 59, 61 e 63 percebe-se que o desempenho do método de localização de vazamentos simulados em diferentes nós não é o mesmo em comparação com o desempenho observado para a o vazamento simulado no nó escolhido inicialmente. Sendo assim, fica clara a influência da região onde se encontra o vazamento simulado no desempenho da metodologia estudada.

5.2 Resultados do estudo de caso

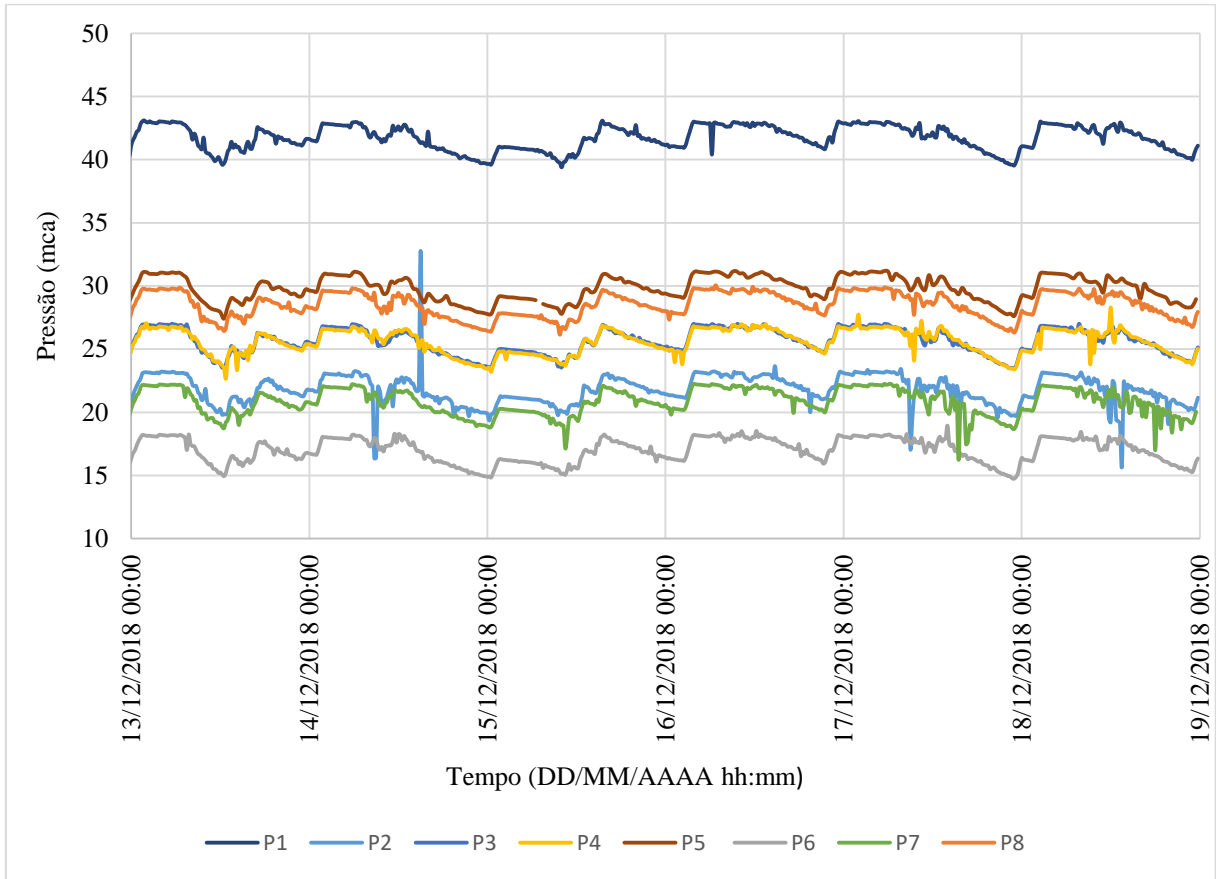
Apresentam-se os dados obtidos através das campanhas de coleta de dados a rede real. A metodologia de obtenção dos dados de vazão de saída do reservatório se encontram no Apêndice A. A Figura 64 apresenta os dados de pressão de um intervalo de seis dias e a Figura 64 mostra a identificação dos pontos de medição com a topografia dos nós da rede.

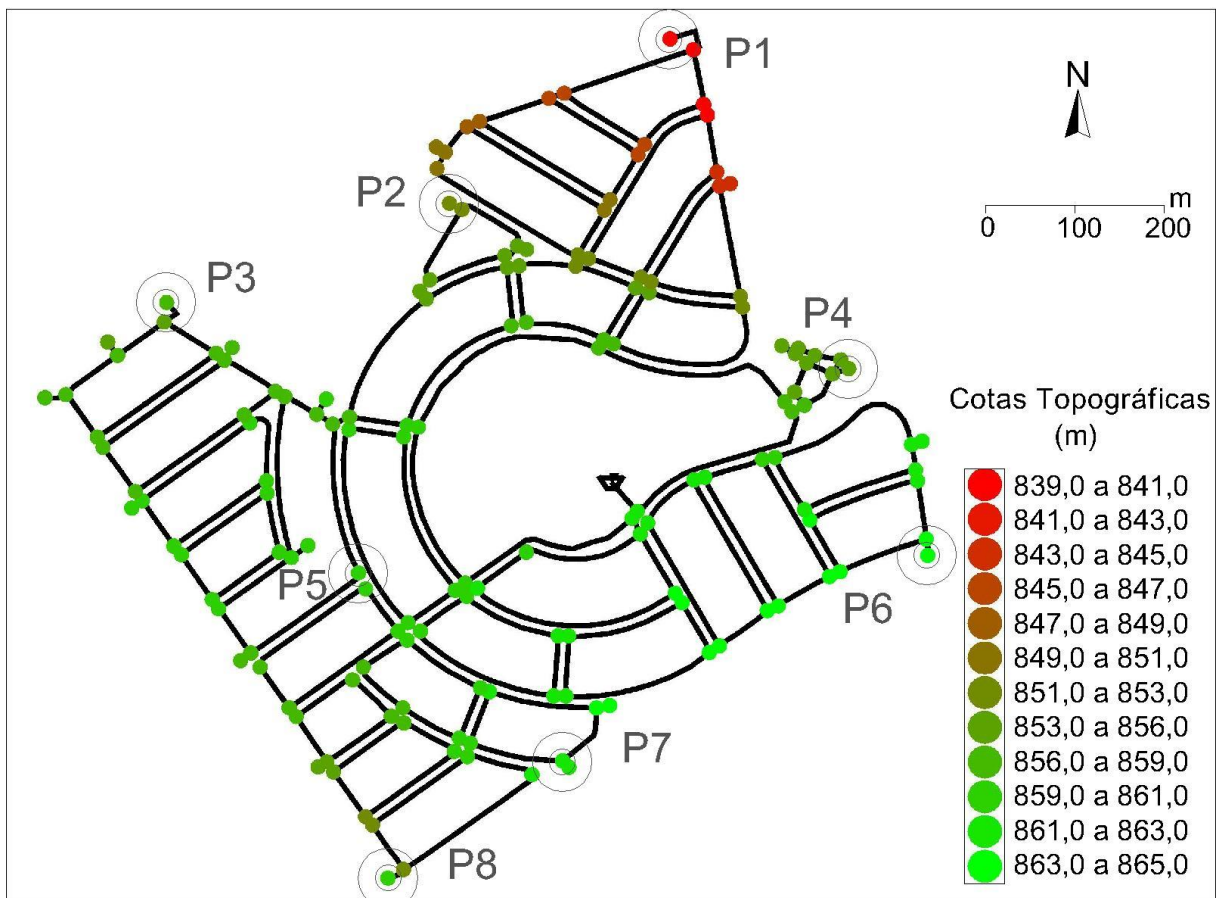
Figura 64 - Gráfico de pressões medidas ao longo do tempo.



FONTE: Autor (2020).

Figura 65 – Identificação dos pontos de medição de pressão.





FONTE: Autor (2020).

Dadas as condições do estudo de caso proposto, apresentam-se os resultados obtidos de acordo com as execuções do algoritmo de detecção e localização de vazamentos. As realizações do algoritmo demonstraram que logo nas iterações iniciais, algumas operações algébricas tiveram resultado indefinido (“*Nan*”). Isso se deu diretamente pela operação da Equação 8 relativa ao cálculo do Ganho de Kalman, que realiza operação de divisão por números muito próximos ou iguais a zero.

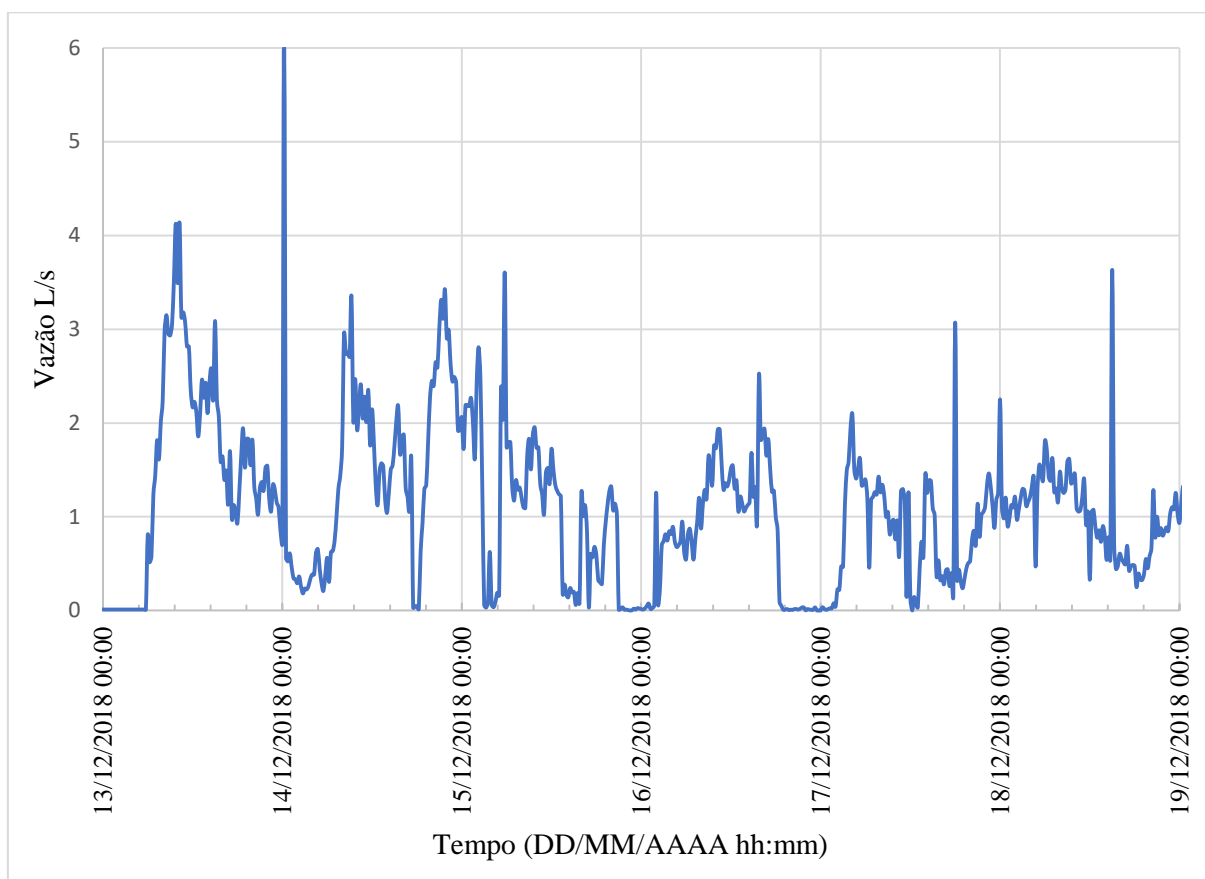
Anteriormente, a ocorrência da operação envolvendo valores nulos está relacionada com a imprecisão dos valores de vazão obtidos no processo de leitura de imagens. Os valores de vazão incoerentes com as outras variáveis de estado (pressões) ocorrem repetidamente, gerando, nas operações de cálculo, valores deturpados, próximos ou iguais a zero. Assim, tais valores na operação de divisão da equação 8 geram os resultados indefinidos (“*Nan*”).

Dada a causa dos erros especificada anteriormente, a solução buscada foi o melhoramento do processo de leitura de imagens, na etapa de captura de dados de vazão de saída do reservatório. O algoritmo de leitura das imagens teve o passo de tempo diminuído em

dez vezes, de 15 minutos para 90 segundos, o que reduziu o impacto das eventuais incoerências, citadas anteriormente, no processo de obtenção dos dados de vazão. Entretanto, esta mudança de período de amostragem foi feita apenas para a obtenção da curva de vazão de saída do reservatório. O passo de tempo das iterações envolvendo o método de localização de vazamentos ainda foi mantido em 15 minutos.

A metodologia de coleta de dados de vazão de saída do reservatório apresentou falhas durante o seu funcionamento, gerando ruídos e lacunas na curva de vazão resultante. As lacunas não foram preenchidas manualmente, sendo utilizado apenas a curva resultante do processo automático de obtenção de dados. A Figura 66 apresenta a curva de vazão resultante da somatória das duas curvas de vazão obtidas em cada um dos dois macromedidores existentes. Adota-se o mesmo intervalo de tempo da Figura 64, seis dias:

Figura 66 - Curva de vazão resultante.



FONTE: Autor (2020).

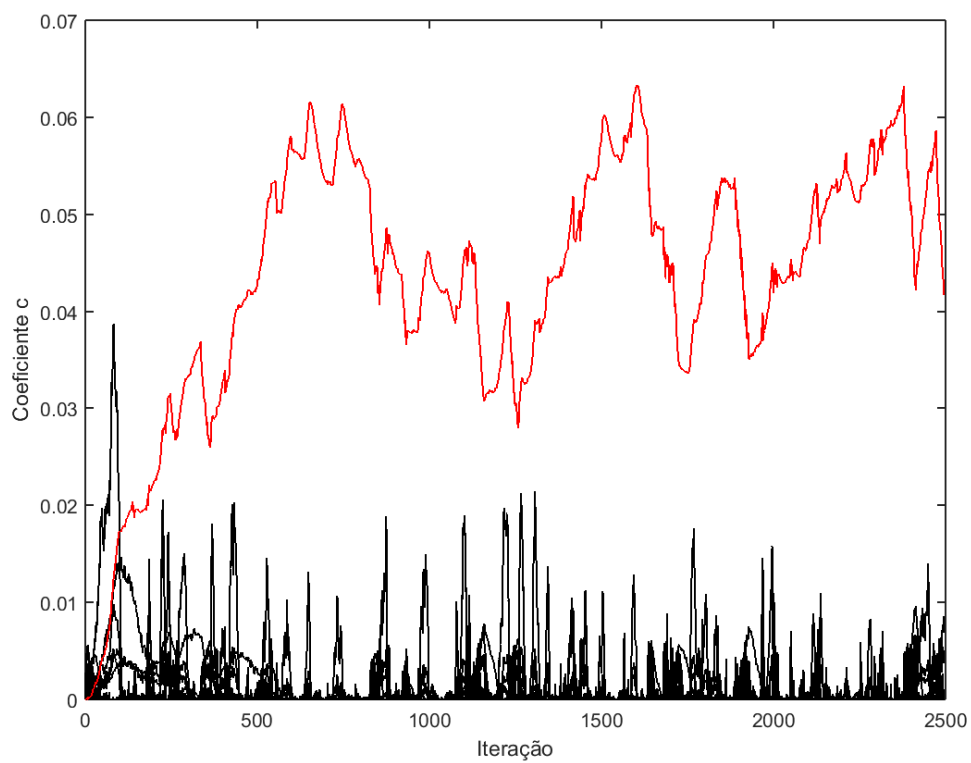
Com a curva de vazões obtida, estimou-se a curva de vazamentos, de acordo com a porcentagem de perdas medida após a comparação entre dados de consumo, obtidos com as duas campanhas de leituras de micromedidores, e os dados de vazão de saída do reservatório.

A diferença entre os dois volumes acumulados ao longo do período analisado corresponde a 4% do volume total de saída do reservatório. Assim, a curva de vazão de vazamentos estimada foi obtida com 4% do valor da curva de vazão do reservatório.

A curva de consumos também foi estimada a partir da diferença entre os volumes total e de vazamento obtidos, respeitando o balanço hídrico da rede. Ou seja, a curva de consumos em todos os nós representou 96% da curva de vazão de saída do reservatório. Não houve diferenciação de consumos entre nós diferentes, isto é, a vazão de consumo foi igualmente dividida entre todos os nós da rede.

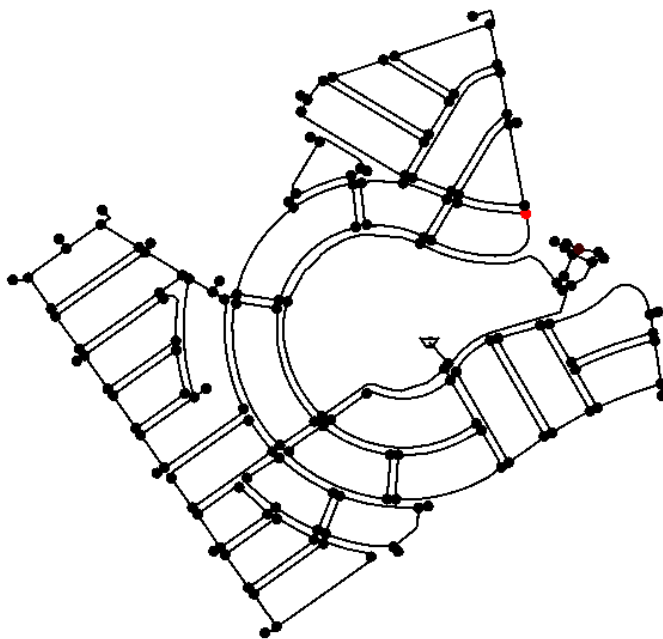
Dadas as considerações feitas, apresentam-se nas Figuras 67 até 78 os resultados das realizações do algoritmo de localização de vazamentos para os mesmos cinco valores de NME utilizados, para observação dos resultados e comparação com a análise de sensibilidade de desempenho realizada anteriormente. Nas Figuras 67,69,71,73,75 e 77, destaca-se em vermelho a curva que apresenta maior valor ao final do algoritmo. Em correspondência aos gráficos, o respectivo nó com maior vazamento estimado é destacado em vermelho nas Figuras 68, 70, 72, 74, 76 e 78.

Figura 67 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó com NME = 50.



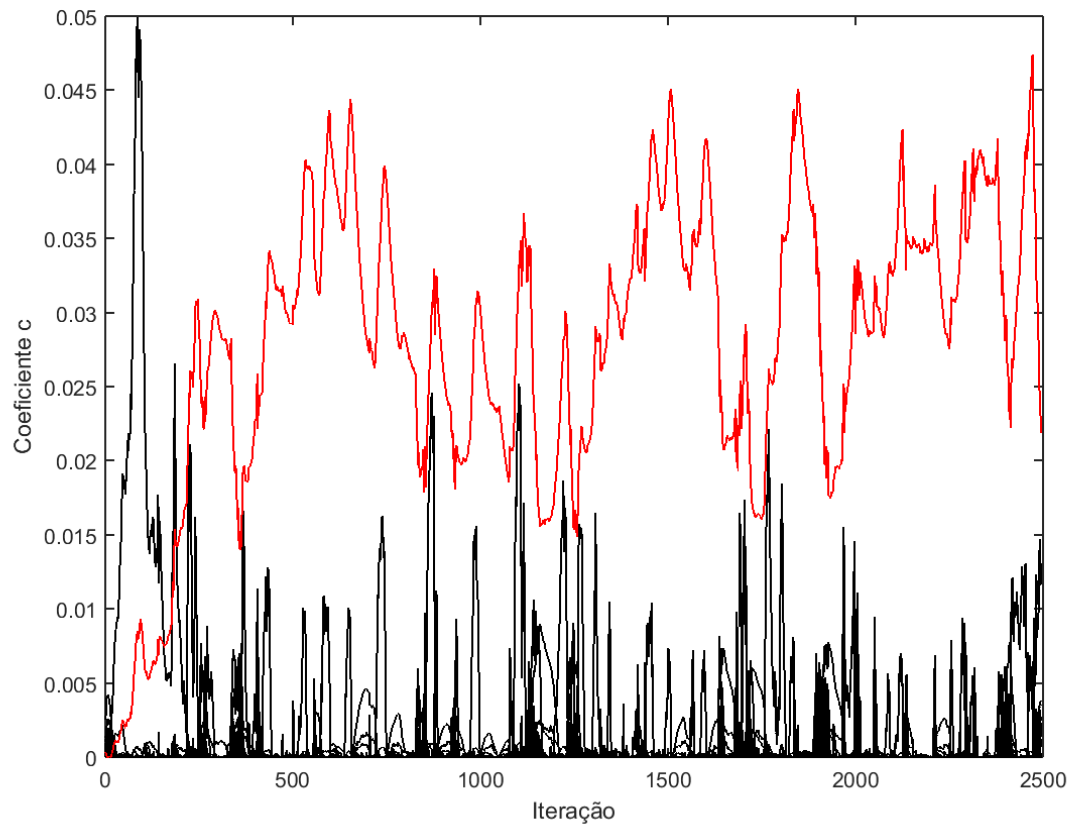
FONTE: Autor (2020).

Figura 68 - Localização do vazamento encontrado com NME = 50.



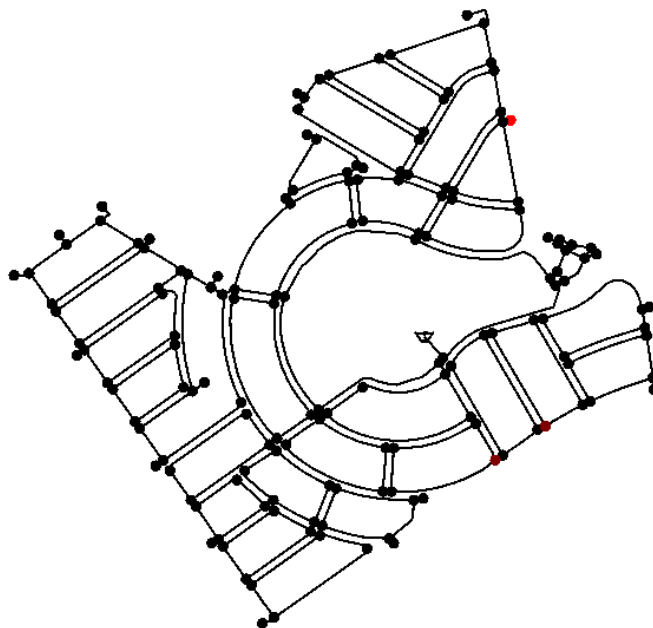
FONTE: Autor (2020).

Figura 69 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó com NME = 100.



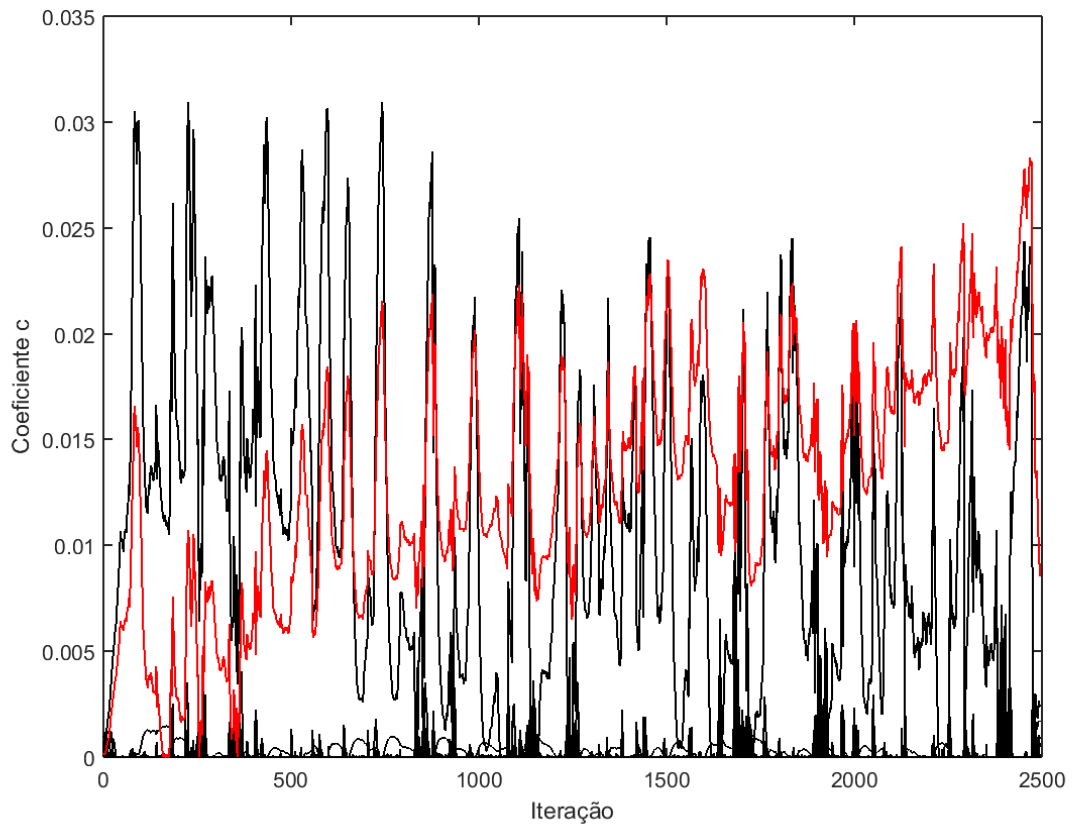
FONTE: Autor (2020).

Figura 70 - Localização do vazamento encontrado com NME = 100.



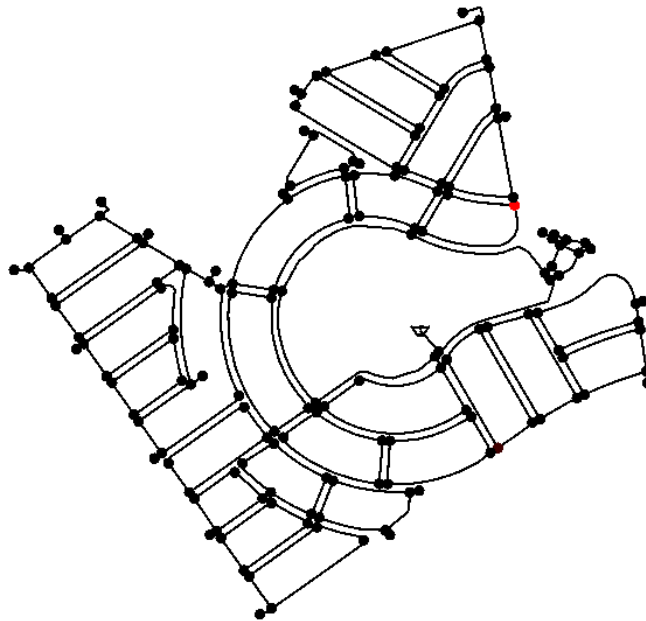
FONTE: Autor (2020).

Figura 71 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó com NME = 200.



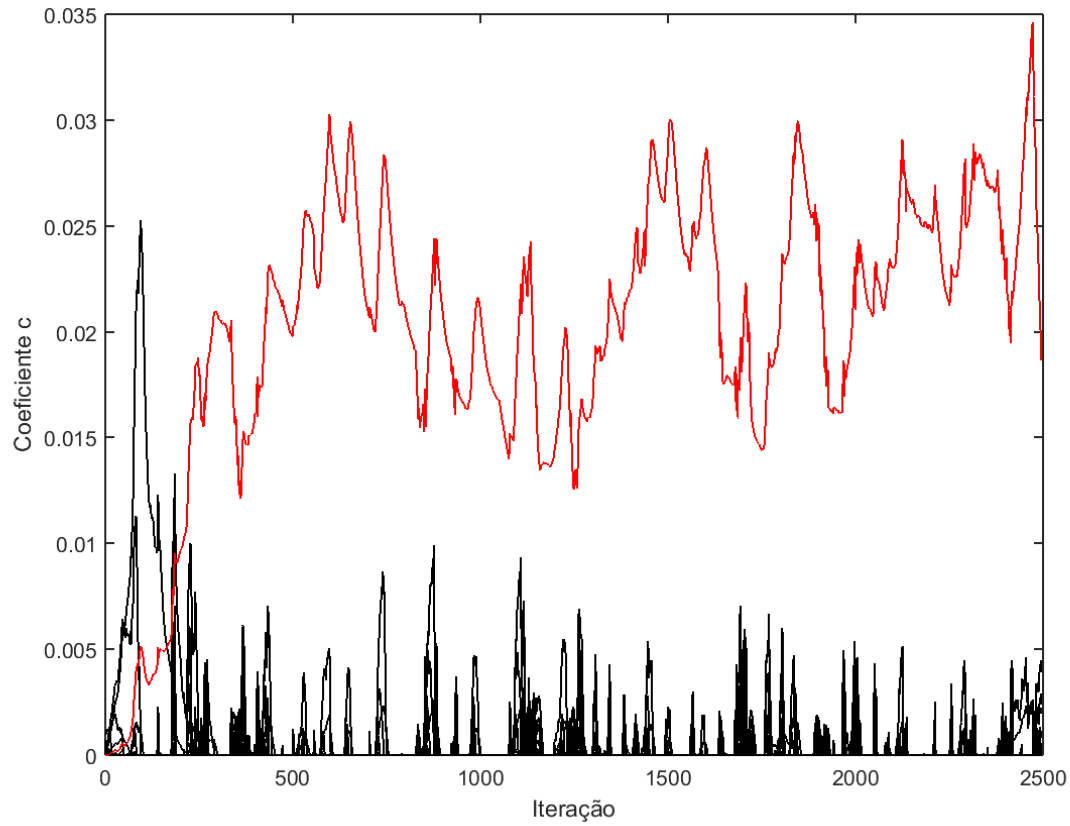
FONTE: Autor (2020).

Figura 72 - Localização do vazamento encontrado com NME = 200.



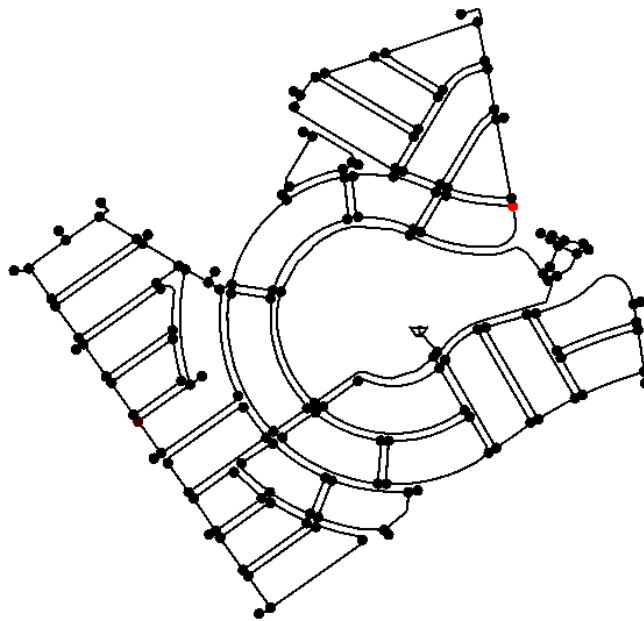
FONTE: Autor (2020).

Figura 73 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó com NME = 300.



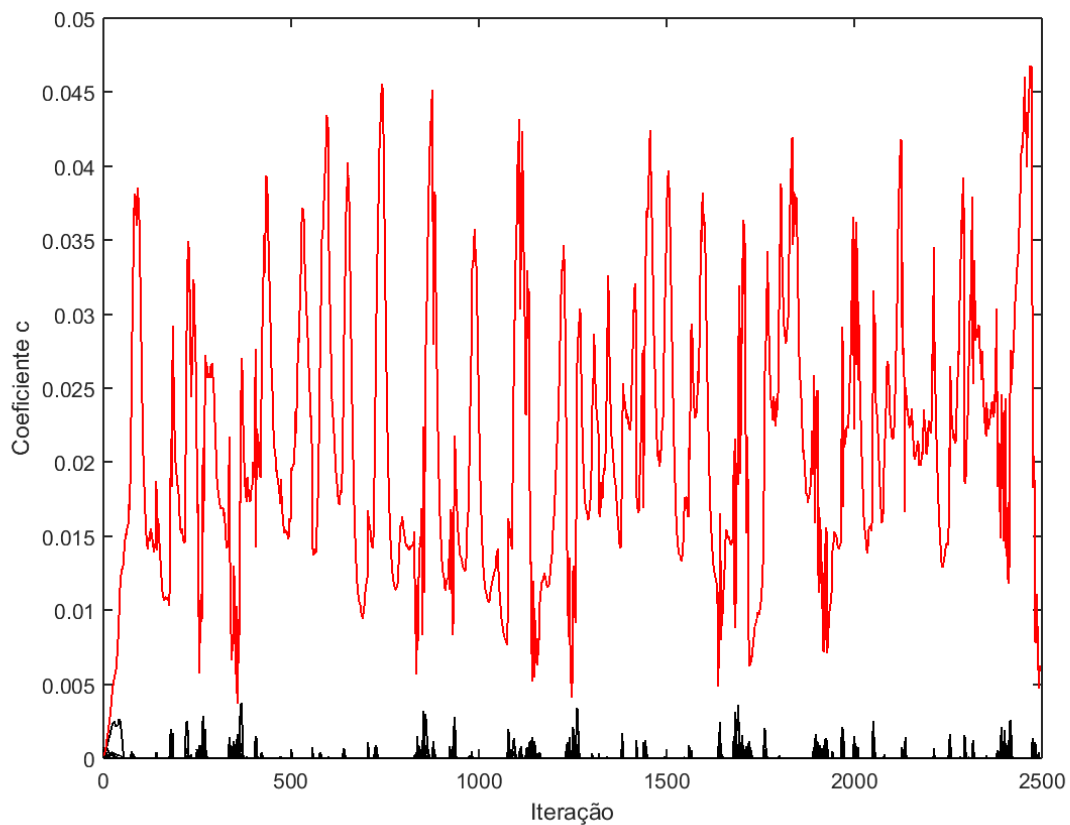
FONTE: Autor (2020).

Figura 74 - Localização do vazamento encontrado com NME = 300.



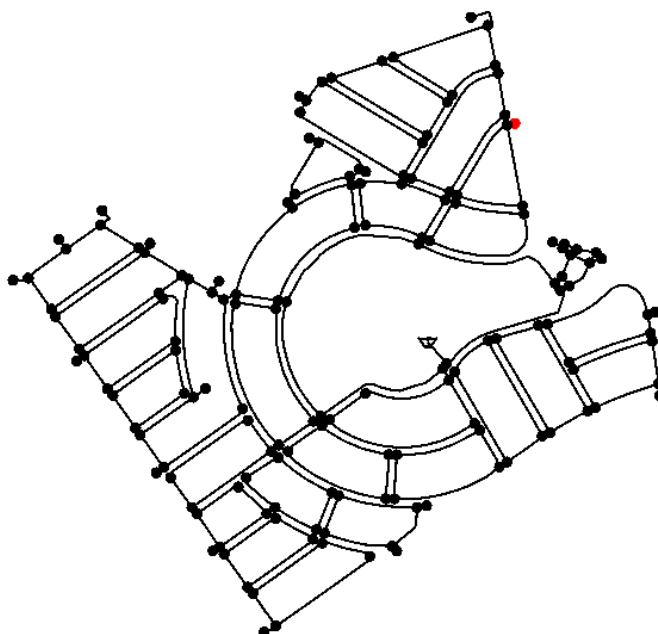
FONTE: Autor (2020).

Figura 75 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó com NME = 400.



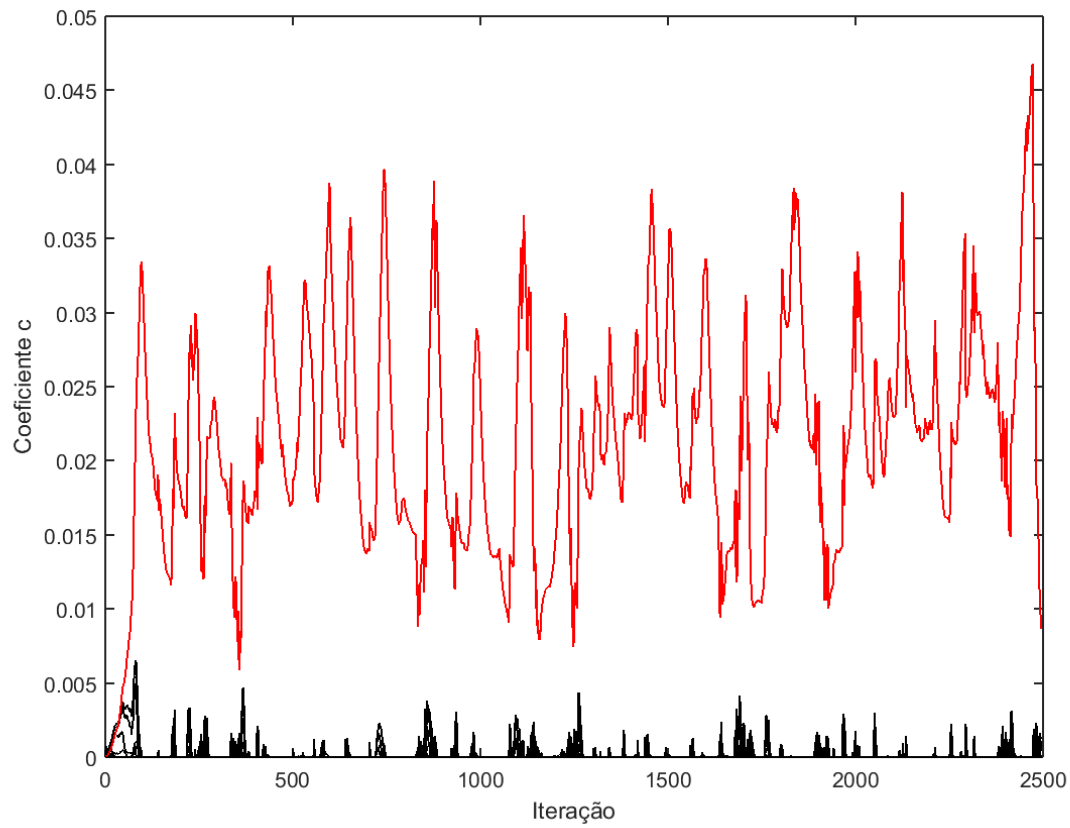
FONTE: Autor (2020).

Figura 76 - Localização do vazamento encontrado com NME = 400.



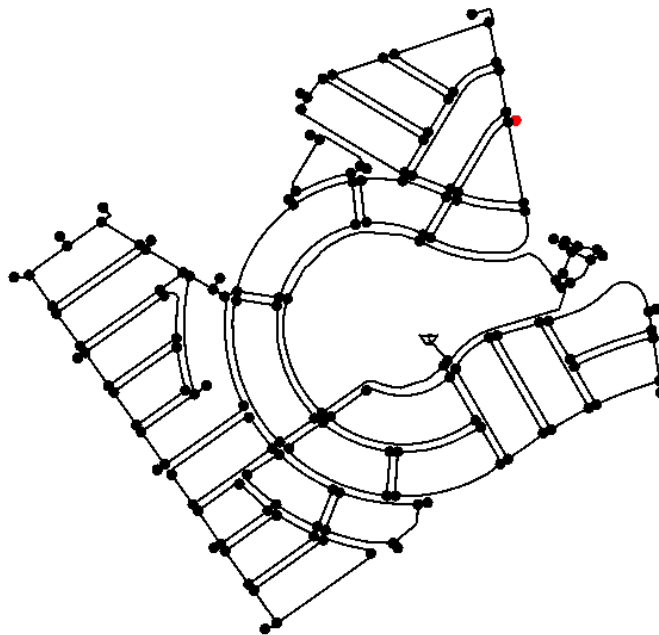
FONTE: Autor (2020).

Figura 77 - Gráfico do valor do coeficiente de vazamento para cada nó com NME = 500.



FONTE: Autor (2020).

Figura 78 - Localização do vazamento encontrado com NME = 500.

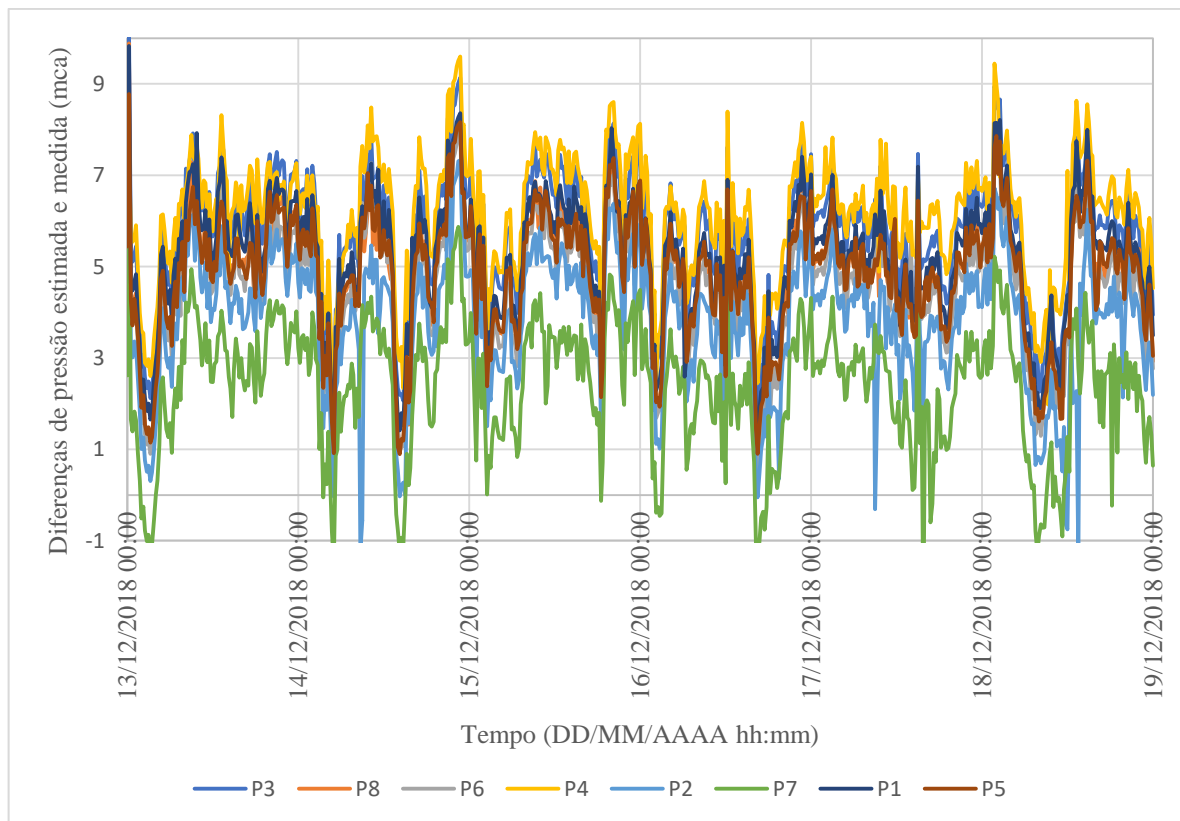


FONTE: Autor (2020).

O conjunto das soluções expostas demonstra o reflexo das limitações da configuração do estudo de caso praticado. Fatores como a falta de dados de nível de reservatório ao longo do tempo e, principalmente, a descontinuidade da curva de vazão do reservatório leva à variações bruscas na estimativa de localização de vazamento em curtos intervalos de tempo.

Outra consequência das limitações citadas é a dificuldade de calibração do modelo hidráulico do caso real. As diferenças de pressões estimadas e medidas em cada ponto de medição, para $NME = 500$, são apresentadas na Figura 79, também com período de seis dias. Fenômenos que podem se relacionar a diferença de pressões podem ser as perdas de cargas localizadas em registros e entre os reservatórios e o anel central da rede e o erro na estimativa do nível dos reservatórios.

Figura 79 – Diferenças de pressões estimadas e medidas.



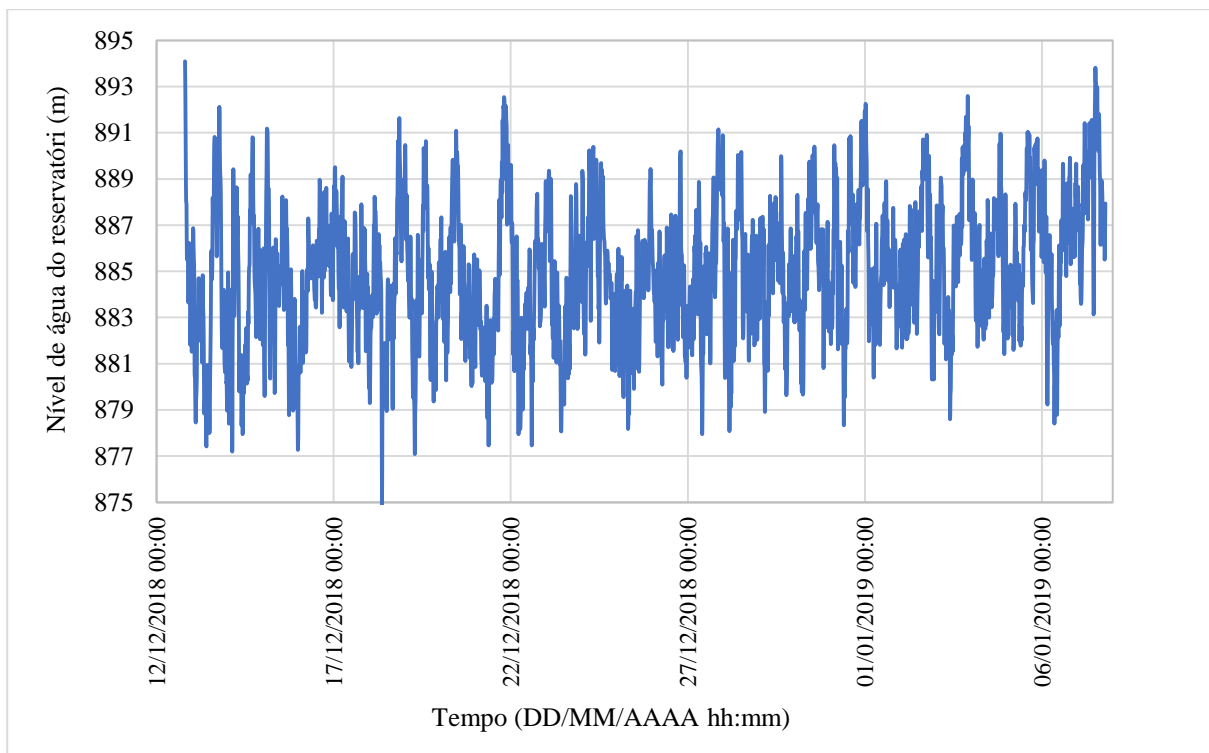
FONTE: Autor (2020).

Observa-se, também, a incongruência entre os resultados apresentados na etapa de avaliação de sensibilidade de desempenho e os resultados do modelo do caso real. Inicialmente, observa-se nos gráficos apresentados com os resultados do método de localização de vazamentos no modelo do caso real o comportamento descontínuo das curvas

para todos os números de NME utilizados, diferentemente da tendência de curvas mais suaves a medida que NME aumenta, conforme visto na etapa de simulação computacional.

Dada a ausência de dados sobre a variação do nível dos reservatórios, juntamente com a estimativa dos coeficientes de vazamento, foi estimada a altura do nível do reservatório. A curva de altura ao longo do tempo obtida para NME = 500 é apresentada na Figura 80:

Figura 80 - Curva estimada de nível do reservatório.



FONTE: Autor (2020).

Dada a cota topográfica do terreno próximo aos reservatórios de 861 m, a altura informada do reservatório de 30 m e a altura máxima do nível da água de 8 m, observam-se incoerências físicas nos resultados. A maioria dos pontos no gráfico estão abaixo do nível mínimo real do reservatório de 891 m. Pode-se atribuir a isso a ausência de calibração das perdas de carga localizadas no trecho a jusante do reservatório e ao pequeno trecho do anel central composto de ferro fundido e que contém pares de macromedidores de vazão, curvas de 90°, registros de gaveta e reduções de diâmetro, um em cada sentido do escoamento.

Vale a pena citar que durante a segunda campanha de leitura realizada, foi identificado, no cavalete de uma das residências um vazamento entre as peças de conexão na ligação entre o cavalete e a rede principal. Assim como se observa nas Figuras 81 e 82:

Figura 81 - Localização do vazamento identificado em campo.



FONTE: Autor (2020).

Figura 82 - Vazamento identificado em campo.



FONTE: Autor (2020).

Trata-se da região de maiores pressões na rede de distribuição devidas à topografia característica. O vazamento foi registrado e informado aos responsáveis para o reparo da ligação. O vazamento encontrado coincide com a região onde os resultados do algoritmo de localização de vazamentos sinalizam a ocorrência de vazamento. Mesmo que não há coincidência exata entre as respostas do algoritmo, observa-se proximidade entre as tais soluções e o vazamento encontrado durante o processo de leitura de hidrômetros. Não se afirma porém que o vazamento encontrado em campo corresponde exclusivamente ao único vazamento existente na rede, dada a possibilidade de ocorrência em pontos não visíveis das tubulações.

6 CONCLUSÃO

Seja no processo de análise de sensibilidade de desempenho empregando as variações do modelo sintético ou na localização de eventuais vazamentos através do modelo de estudo de caso, características como a localização e grandeza do vazamento simulado, a variável NME no algoritmo de localização de vazamentos, a disponibilidade de dados do nível do reservatório e a ausência de calibração das perdas de carga localizadas no anel central influenciaram nos resultados obtidos para o caso em estudo. Assim, os resultados desse trabalho indicaram a significativa dependência do desempenho do método *Ensemble Kalman Filter* com Vetor de Estados Aumentado de localização de vazamentos em relação às características intrínsecas dos casos.

Na etapa de realizações do algoritmo de localização de perdas para as variações do modelo sintético, observou-se a significativa dependência do desempenho do método em relação à grandeza do vazamento simulado, uma vez que as maiores pontuações foram obtidas nos casos em que o vazamento simulado apresentava valor igual ou superior a $c = 0,05$. Também, observou-se a diferença nos resultados obtidos ao serem simulados vazamentos em nós diferentes dos escolhidos a partir do modelo sintético, uma vez que as simulações resultaram em avaliações diferentes daquela obtida com o caso de maior pontuação.

Ainda em relação à análise com o modelo sintético, observou-se a influência do valor NME na quantidade de soluções incorretas encontradas de forma que valores menores de NME possibilitam menos números de soluções incorretas. Em contrapartida isso diminui a localização de vazamentos no nó correto. Além disso, observam-se menores valores de desvio padrão para as pontuações obtidas em casos de maior NME. Portanto, pode-se afirmar que maiores valores de NME possibilitam maior confiabilidade no resultado encontrado.

Em relação aos resultados do estudo de caso realizado, constatou-se que a ausência de dados sobre o nível do reservatório inviabilizou o processo de calibração de coeficientes de perda de carga distribuída e localizada da rede. Possivelmente, a inviabilização se deve a necessidade de se estimar o nível do reservatório no mesmo algoritmo de localização de vazamentos. Tal ausência de calibração dos coeficientes de perda de carga gerou a incompatibilidade física de resultados obtidos com a infraestrutura da rede estudada.

As falhas presentes na curva de vazão do reservatório também tiveram influência sobre os resultados obtidos. Foi possível observar a descontinuidade nas curvas de coeficiente de vazamento nas realizações do estudo de caso, mesmo nos casos de NME elevados,

diferentemente do que é observado em casos semelhantes de realização do algoritmo de localização com o modelo sintético.

Dado o exposto, fica claro que a partir dos resultados obtidos nesse trabalho não foi possível determinar com exatidão a localização de vazamentos na rede real, principalmente considerando a descoincidência das localizações de vazamento obtidas nas cinco realizações do algoritmo apresentadas. Contudo, há de fato a indicação de uma região com maior probabilidade de ocorrência do vazamento, mas não com o rigor estabelecido na análise de desempenho proposta.

Ademais, é evidente que o processo de avaliação do desempenho proposto possibilitou a visualização das diferentes tendências de comportamento do método de localização de vazamento simulado em nós diferentes.

7 REFERÊNCIAS

- BABBITT, H. E., *et al.* **The detection of leaks in underground pipes [with discussion]**. *Journal (American Water Works Association)*, vol. 7, no. 4, 1920, pp. 589–595. *JSTOR*, Disponível em: www.jstor.org/stable/41224698. Acesso em: 13 de Agosto de 2020.
- BEGOVICH, O. *et al.* **Comparison of two detection algorithms for pipeline leaks**. *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications*. 2007. 777 - 782. 10.1109/CCA.2007.4389327.
- BESANCON, G. *et al.* **Direct observer design for leak detection and estimation in pipelines**. 2007 European Control Conference, ECC 2007...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2007
- CHEN, S. Y. **Kalman Filter for Robot Vision: A Survey**. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 11, pp. 4409-4420, Nov. 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2162714.
- CHOI, D. Y. *et al.* **Adaptive Kalman filter based on adjustable sampling interval in burst detection for water distribution system**. *Water (Switzerland)*, v. 8, n. 4, 2016.
- DELGADO-AGUIÑAGA, J. A.; BEGOVICH, O. **Water leak diagnosis in pressurized pipelines: A real case study**. In: *Applied Condition Monitoring*. [s.l.] Springer, 2017. v. 7p. 235–262.
- DELGADO-AGUIÑAGA, J. A.; BESANÇON, G. **EKF-based leak diagnosis schemes for pipeline networks**. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 24, p. 723–729, 1 jan. 2018.
- EMARA-SHABAIK, H. E.; KHULIEF, Y. A.; HUSSAINI, I. **A non-linear multiple-model state estimation scheme for pipeline leak detection and isolation**. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, v. 216, n. 6, p. 497–512, 5 set. 2002.
- EVENSEN G **The ensemble Kalman filter: theoretical formulation and practical implementation**. *Ocean Dyn*, 2003. 53:343–367
- EVENSEN G. **Sequential data assimilation with a non-linear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics**. *J Geophys*, 1994. Res 99(C5):10143–10162
- GAMBOA-MEDINA, M. M. **Detecção de vazamentos e alterações em redes de distribuição de água para abastecimento, durante a operação, usando sinais de pressão**. 2017. 130 p. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.
- GUILLEN, M. *et al.* **Leak detection and location based on improved pipe model and nonlinear observer**. 2014 European Control Conference, ECC 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014.
- HIDE, C.; MOORE, T.; SMITH, M. **Adaptive Kalman Filtering for Low-cost**

- INS/GPS.** Journal of Navigation, 2003. 56(1), 143-152. doi:10.1017/S0373463302002151
- JALALKAMALI, A.; EFTEKHARI, M. **Estimating water losses in water distribution networks using a hybrid of GA and Neuro-Fuzzy models.** World Applied Sciences Journal. 2012
- JAZWINSKI A. H. **Stochastic processes and filtering theory.** Academic Press, New York, 1970.
- JUNG, D.; LANSEY, K., **Burst Detection in Water Distribution System using the Extended Kalman Filter,** Bari, Italy, 2013.
- KHALILABAD, N. M. *et al.* **Leak detection in water distribution system using non-linear kalman filterinternational.** Journal of optimization in civil engineering **Int. J. Optim. Civil Eng.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://ijoce.iust.ac.ir/article-1-336-en.pdf>>. Acesso em: 1 nov. 2019.
- LI, H. *et al.* **Leakage detection of HVAC pipeline network based on pressure signal diagnosis.** Building Simulation, v. 12, n. 4, p. 617–628, 2019.
- LIU, P.; LI, S.; WANG, Z. **Multi-leak diagnosis and isolation in oil pipelines based on Unscented Kalman filter.** Proceedings of the 30th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 6 jul. 2018
- MISIUNAS, D. **Failure Monitoring and Asset Condition Assessment in Water Supply Systems.** Tese de Doutorado. Universidade de Lund, Suécia. 2005.
- NAVARRO, A. *et al.* **Real-Time Leak Isolation Based on State Estimation with Fitting Loss Coefficient Calibration in a Plastic Pipeline.** Asian Journal of Control, v. 19, n. 1, p. 255–265, 1 jan. 2017.
- NAVARRO, A.; BEGOVICH, O.; BESANÇON, G. **Calibration of fitting loss coefficients for modelling purpose of a plastic pipeline.** IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA. 2011.
- OKEYA, I *et al.* **Online modelling of water distribution system using data assimilation.** Procedia Engineering, 2014. 70:1261–1270.
- PADILLA, E. A.; BEGOVICH, O. **Real-time leak isolation based on a fault model approach algorithm in a water pipeline prototype.** IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). IFAC Secretariat, 2012.
- PIZANO-MORENO, A.; BEGOVICH, O. **Leak isolation with temperature compensation in pipelines.** CCE 2012 - 2012 9th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control. 2012
- PORTO, R. M. **Hidráulica básica.** 4 ed. São Carlos: EESC – USP, 2006.
- ROSSMAN, L. A. *et al.* **Epanet 2: users manual.** U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/R-00/057, 2000. Disponível em: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=95662. Acesso em 17 mar.

2020.

RUZZA, V. **Data assimilation techniques for leakage detection in water distribution systems**. Tese (Doutorado) Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, University of Padova, 2017. Disponível em: <http://paduaresearch.cab.unipd.it/10015/> acesso em: 20 mar. 2019.

SANTOS-RUIZ, I. *et al.* **Online leak diagnosis in pipelines using an EKF-based and steady-state mixed approach**. *Control Engineering Practice*, v. 81, p. 55–64, 1 dez. 2018.

SHAO, Y. *et al.* **Time-Series-Based Leakage Detection Using Multiple Pressure Sensors in Water Distribution Systems**. *Sensors*, v. 19, n. 14, p. 3070, 2019.

SNIS - Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos 20016**. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos>. Acesso em: 20 fev. 2020. 2016.

TAO, L. W.; FANG, C. Z. **Robust observer design for a fluid pipeline**. *International Journal of Control*, v. 47, n. 2, p. 601–613, 1988.

TIAN, J.; WANG, S. Q. **Design and realization of the kalman filter based on LabVIEW**. *Applied Mechanics and Materials*. 2014

TORRES L. *et al.* **Kalman Filters for Leak Diagnosis in Pipelines: Brief History and Future Research**. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020; 8(3):173.

TORRES, L.; BESANÇON, G.; GEORGES, D. **A collocation model for water-hammer dynamics with application to leak detection**. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*. 2008

TORRES, L.; BESANCON, G.; GEORGES, D. **Collocation modeling with experimental validation for pipeline dynamics and application to transient data**. *European Control Conference, ECC 2009*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014

VERDE, C. Minimal order nonlinear observer for leak detection. **Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME**, v. 126, n. 3, p. 467–472, 2004.

VERDE, C. **Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines**. *Control Engineering Practice*, v. 9, n. 6, p. 673–682, 2001.

VERDE, C.; VISAIRO, N. **Identifiability of multi-leaks in a pipeline**. *Proceedings of the American Control Conference*. .IEEE, 2004, Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1383997/>>. Acesso em: 31 out. 2019

WANG, X.-J.*et al.* **Leak detection in pipeline systems using the damping of fluid transients**, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 2002. 128(7): 697–711.

YE, G.; FENNER, R. **Kalman filtering of hydraulic measurements for burst detection in water distribution systems**. *Pipeline Systems Engineering and Practice (ASCE)*, pp. 14-22, 2011.

APÊNDICE A – METODOLOGIA DE COLETA E ASSIMILAÇÃO DE DADOS DE CAMPO

Apresenta-se a metodologia de coleta de dados de macromedição da vazão de saída do reservatório. Por não existir na rede estudada um instrumento de coleta de dados de vazão, foi desenvolvida uma estrutura para tal fim através da integração da infraestrutura de monitoramento local com equipamentos de coleta e transmissão de vídeo.

Ressalta-se a existência de dois medidores de volume localizados na saída dos reservatórios que se conectam ao anel central da rede. A Figura 83 demonstra a ligação da tubulação de saída dos reservatórios (à direita da ligação) com o anel central de distribuição da rede, além dos dois medidores de volume (em azul).

Figura 83 - Ligação Anel Central – Reservatórios.



FONTE: Autor (2020).

A Figura 84 mostra a estrutura utilizada para o posicionamento da câmera de vídeo em um dos medidores de vazão do anel central. Naturalmente, ambos os medidores foram filmados ao mesmo tempo, gerando assim duas imagens a serem analisadas posteriormente. As câmeras utilizadas tinham função de gravação de vídeo em infravermelho pois o local de filmagem se encontrava totalmente fechado, sem a presença de luz natural. Assim as imagens geradas são resultado do posicionamento próximo das câmeras aos mostradores dos macromedidores de volume.

Figura 84 - Estrutura de filmagem do medidor de volume.

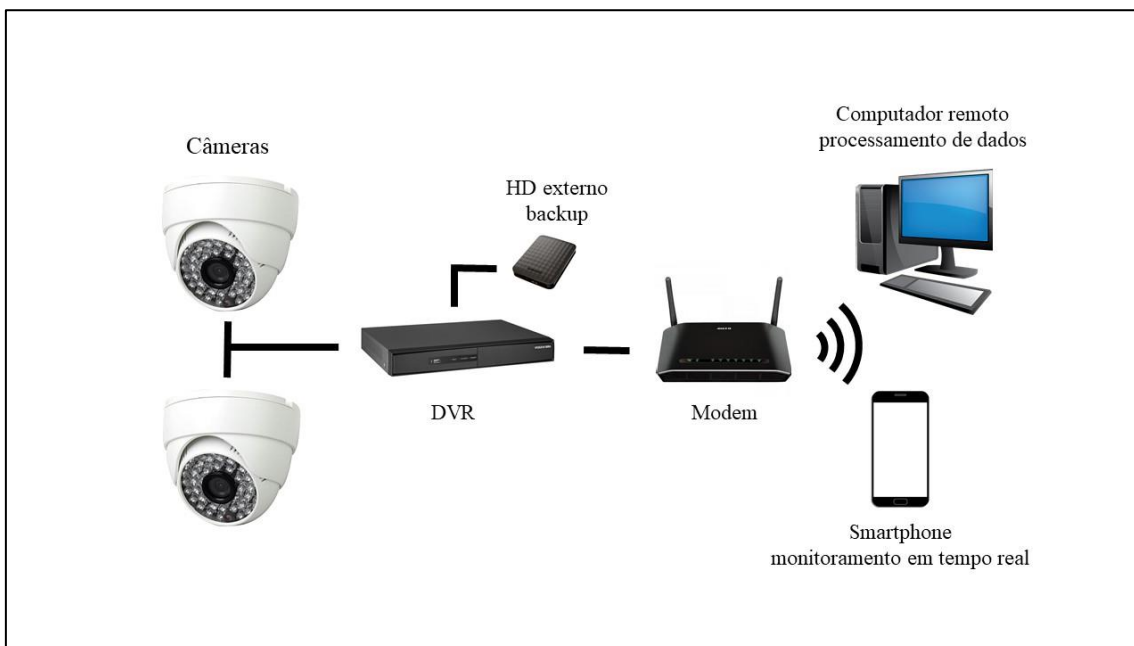


FONTE: Autor (2020).

Os dois vídeos capturados ao longo da etapa de medição foram armazenados em mídia física (HD externo) localizada em campo, com função de *backup* e os dados foram coletados ao final do período de medição, passando para a etapa de processamento.

Juntamente com as câmeras instaladas no local de medição, foi utilizado um dispositivo eletrônico chamado DVR (*Digital Video Recorder*) para o armazenamento das imagens gravadas pelas câmeras em uma mídia física. As redes de energia elétrica e de conexão via internet do local foram utilizadas para o funcionamento e a transmissão remota do monitoramento das medições em tempo real. Esse monitoramento em tempo real permitia que fossem feitas intervenções para remediação de qualquer problema antes que o período de medição terminasse. Segue a Figura 84 com o esquema dos materiais usados na macromedição de vazão.

Figura 85 - Esquema do sistema de captura de imagem.

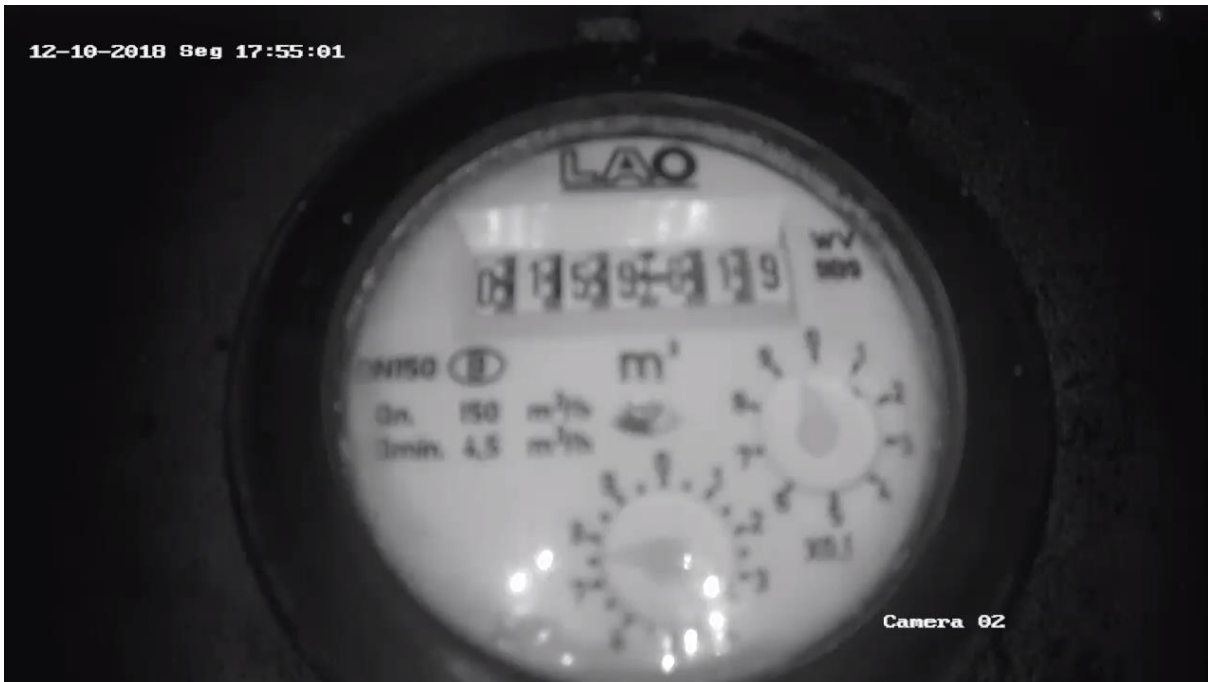


FONTE: Autor (2020).

Apresentam-se imagens geradas a partir da gravação feita em cada um dos medidores de volume Figura 86. As imagens não apresentam, nesta etapa, nenhum tipo de processamento, sendo apresentadas nas condições originais de gravação.

Figura 86 -1 Imagens dos medidores.





FONTE: Autor (2020).

Como o objetivo da captura das imagens era a obtenção de dados de vazão, surgiram duas alternativas para o processamento das imagens coletadas, transformando-as em dados de vazão a serem utilizados na modelagem para detecção de vazamentos. Isso porque o mostrador do medidor de volume oferece duas fontes de informação e leitura dos dados conforme se apresenta na Figura 87:

Figura 87 - Composição da leitura do macromedidor de volume.



FONTE: Autor (2020).

As duas alternativas possíveis para a leitura dos dados foram a leitura do indicador numérico, que apresenta sensibilidade de um metro cúbico e a leitura dos indicadores de

ponteiro que, combinados apresentam sensibilidade máxima de um centésimo de metro cúbico (dez litros). A escolha do indicador a ser lido foi feita com base na sensibilidade de leitura e também na simplicidade de execução computacional do processo automático de leitura, que será descrito adiante.

Assim, optou-se por realizar a leitura dos dados através de um dos indicadores ponteiro, utilizando entre eles aquele com melhores condições de nitidez da imagem. Isso porque, dado o posicionamento de cada câmera e a incidência de luz infravermelho, algumas regiões do visor do medidor ficaram ofuscadas por reflexo da luz, o que impossibilita o funcionamento do algoritmo de processamento de imagem. Ou seja, foram utilizados os indicadores de ponteiro que eram visíveis.

É demonstrado de maneira conceitual, na Figura 88, o algoritmo de processamento das imagens, leitura e assimilação dos dados. Destaca-se que o intervalo de tempo entre os frames foi de noventa segundos, o suficiente para garantir a sensibilidade do algoritmo de leitura durante o período de maior vazão:

Figura 88 – Algoritmo de processamento da imagem e leitura de dados.

-
- 1: **Início**
 - 2: **for t in tempo**
 - 3: Captura imagem do *frame "t"*
 - 4: Ajuste de perspectiva da imagem
 - 5: Extração do retângulo que contém o ponteiro
 - 6: Aplicação de uma moldura circular, isolando o ponteiro
 - 7: Conversão da imagem de *BGR* em *gray scale*.
 - 8: Equalização da imagem em *gray scale*
 - 9: Definição do limiar de regiões a partir de valor de pixel
 - 10: Definição do contorno a partir do limiar criado
 - 11: Checagem do contorno criado a partir da concavidade
 - 12: Detecção do ponto mais distante do centro da imagem
 - 13: Criação de um vetor com o centro e o ponto mais distante
 - 14: Verificação da orientação do vetor (de 0° a 360°)
 - 15: Cálculo da indicação do vetor na escala do indicador real (de 0 a 10)
 - 16: Retorno do valor da leitura do ponteiro
 - 17: **Fim**
-

FONTE: Autor (2020).

A seguir são apresentadas as fichas para registros (Figuras 89 e 90) e as representações esquemáticas das áreas de leitura (Figuras 91, 92, 93 e 94) usados na etapa de micromedição dos consumos em cada lote da área do caso de estudo.

Figura 89 - Ficha para registro da primeira leitura.

1ª Leitura	Quadra: __	Quadra: __	Quadra: __	Quadra: __	Quadra: __	Quadra: __	Quadra: __	Quadra: __	Quadra: __
Lote 1									
Lote 2									
Lote 3									
Lote 4									
Lote 5									
Lote 6									
Lote 7									
Lote 8									
Lote 9									
Lote 10									
Lote 11									
Lote 12									
Lote 13									
Lote 14									
Lote 15									
Lote 16									
Lote 17									
Lote 18									
Lote 19									
Lote 20									
Lote 21									
Lote 22									
Lote 23									
Lote 24									
Lote 25									

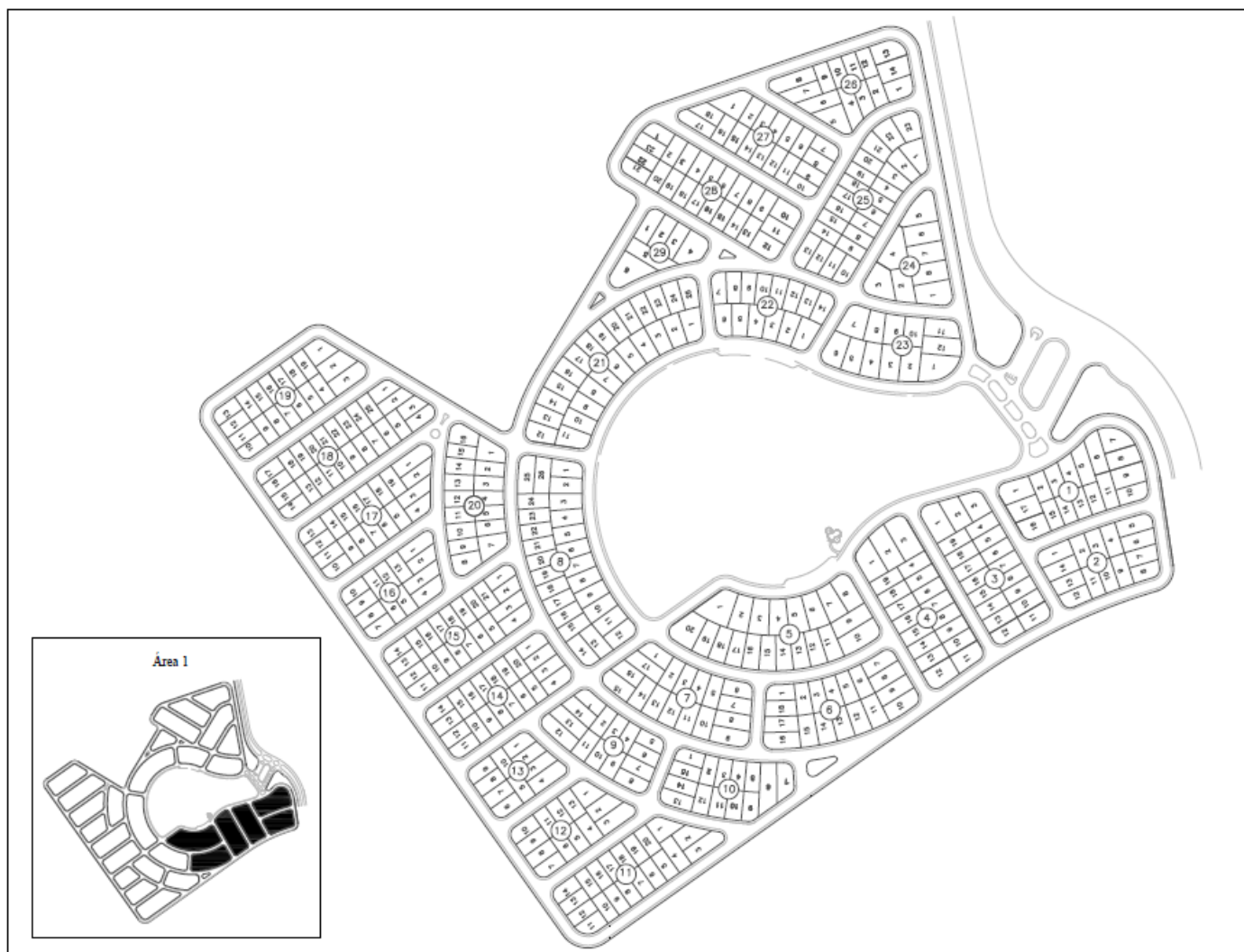
FONTE: Autor (2020).

Figura 90 - Ficha de registro para segunda leitura.

2ª Coleta	Quadra: __	Quadra: __	Quadra: __	Quadra: __	Quadra: __	Quadra: __	Quadra: __	Quadra: __	Quadra: __
Lote 1									
Lote 2									
Lote 3									
Lote 4									
Lote 5									
Lote 6									
Lote 7									
Lote 8									
Lote 9									
Lote 10									
Lote 11									
Lote 12									
Lote 13									
Lote 14									
Lote 15									
Lote 16									
Lote 17									
Lote 18									
Lote 19									
Lote 20									
Lote 21									
Lote 22									
Lote 23									
Lote 24									
Lote 25									

FONTE: Autor (2020).

Figura 91 - Representação esquemática das áreas de leitura – Área 1.



FONTE: Autor (2020).

Figura 92 - Representação esquemática das áreas de leitura – Área 2.



FONTE: Autor (2020).

Figura 93 - Representação esquemática das áreas de leitura – Área 3.



FONTE: Autor (2020).

Figura 94 - Representação esquemática das áreas de leitura – Área 4.



FONTE: Autor (2020).