

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL

DOUTORADO EM ENGENHARIA CIVIL – RECURSOS HÍDRICOS

FELIPE FERNANDES VIANA DE ARAÚJO

MODELO HIDRÁULICO BASEADO NO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS
E ALGORITMOS GENÉTICOS PARA OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE
REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E DE ESTAÇÕES DE
BOMBEAMENTO

FORTALEZA - CE

2010

FELIPE FERNANDES VIANA DE ARAÚJO

MODELO HIDRÁULICO BASEADO NO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS
E ALGORITMOS GENÉTICOS PARA OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE
REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E DE ESTAÇÕES DE
BOMBEAMENTO

Tese submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Recursos Hídricos, da Universidade Federal do Ceará, como requisito para a obtenção do grau de Doutor.

Orientador: Marco Aurélio Holanda de Castro

FORTALEZA - CE

2010

Esta tese foi apresentada como parte integrante dos requisitos necessários ao grau de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração em Recursos Hídricos, outorgado pela Universidade Federal do Ceará.

Candidato: Felipe Fernandes Viana de Araújo

Aprovada em 14 de maio de 2010

BANCA EXAMINADORA:

*Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro (orientador), PhD
Universidade Federal do Ceará – UFC*

*Prof. Antônio Marozzi Righetto, Doutor
Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN*

*Prof. John Kenedy de Araújo, Doutor
Universidade Federal do Ceará – UFC*

*Prof. Francisco de Assis de Souza Filho, Doutor
Universidade Federal do Ceará – UFC*

*Prof. Rogério Campos, PhD
Universidade de Fortaleza, UNIFOR*

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Paulo e Noemi.

Aos meus filhos, Vítor, Paula e Taís.

À minha esposa, Carla.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo financiamento dos estudos.

Ao meu orientar prof. Marco Aurélio e aos demais membros da banca prof. Righetto, prof. Kenedy de Araújo, prof. Assis de Souza Filho e prof. Rogério Campos por terem colaborado para aprimorar meu trabalho.

Aos professores e aos meus colegas de turma por terem compartilhado conhecimentos e ensinamentos ao longo das disciplinas que formam parte dos requisitos necessários à conclusão do doutorado.

Aos meus pais e familiares, que são os principais responsáveis pela minha educação, e à minha esposa Carla, pelo suporte nos momentos de necessidade.

RESUMO

Foi desenvolvido um modelo hidráulico, implementado na linguagem de programação Delphi, para simulação de redes de abastecimento de água, que utiliza o Método das Características (MOC), introduzindo novas capacidades ao modelo CALHIDREDMT de Righetto (1994). O modelo se baseia no conceito de pseudo-transiente, utilizando um valor fictício para a celeridade da onda no MOC. Foram realizadas simulações em redes equipadas com reservatórios de nível fixo e variável (tanques), estações elevatórias e boosters, considerando situações estáticas e de período estendido (24 horas), para casos reais e exemplos genéricos de redes. Os resultados do modelo desenvolvido foram comparados às simulações realizadas no modelo EPANET e com dados de pressão medidos em manômetro instalado para experimento de campo. Foram avaliados aspectos de convergência do MOC nos elementos de fronteira e o desempenho dessa técnica de solução para diferentes configurações de rede. Além disso, o modelo hidráulico foi acoplado a uma rotina de otimização baseada em Algoritmos Genéticos (AG). A rotina de otimização apresenta uma função objetivo formulada para minimização dos custos energéticos nas estações elevatórias, considerando a penalização de aspectos indesejados da operação, como pressões e velocidades elevadas, excesso de manobras nas bombas e violação de limites em tanques. Foram realizadas análises quanto às formas de tarifação e variação dos parâmetros do AG, avaliando a influência desses aspectos sobre o valor da função objetivo e o tempo de processamento. Foi possível concluir que o modelo apresenta desempenho satisfatório e bastante flexibilidade, tendo potencial para aplicações em operação de redes pressurizadas de distribuição em tempo real.

Palavras-chave: modelagem hidráulica, método das características, Algoritmos Genéticos, operação de redes.

ABSTRACT

A hydraulic model was developed for simulation of water supply networks using the Method of Characteristics (MOC), introducing new features to the CALHIDREDMT model, proposed by Righetto (1994). The model uses the concept of pseudo-transient, using a fictitious value for the wave celerity. Simulations were performed in networks equipped with reservoirs, tanks, pump stations and boosters, considering both steady-state situations, as well as extended-periods (24 hours), including real cases and generic examples. The obtained results were compared to simulations performed in the model EPANET and to field experiments (pressure data measured with a manometer). Convergence issues and the performance of the solution technique were analyzed in the boundary elements for different network configurations. In addition, the hydraulic model was coupled into a Genetic Algorithms (GA) routine. The Genetic Algorithm routine presents an objective function that considers the minimization of the energetic costs associated with pump stations and it includes ways to penalize undesired issues in the operation, like high values of pressure and velocity, surplus of pump station maneuvers and violation of tank capacity limits. Analyses were performed considering variations in the taxation formulas, penalization criterions and GA parameters to evaluate the influence of these issues in the objective function and the routine processing time. The model presented a satisfactory performance and flexibility. It can be used as an analytical tool for applications involving water distribution networks in real time.

Keywords: hydraulic modeling, characteristic method, Genetic Algorithm, network operation.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1. Análise Hidráulica em Redes Pressurizadas	24
3.2. Algoritmos Genéticos.....	30
3.3. MOC Pseudo-Transiente Aplicado a Escoamento Permanente	35
4. METODOLOGIA.....	46
4.1. Minimização dos Custos de Bombeamento em AG.....	46
4.2. Custos de Bombeamento em Redes de Abastecimento	52
4.3. Interface Gráfica do Modelo	56
5. ESTUDOS DE CASO PARA VERIFICAÇÃO/VALIDAÇÃO DO MODELO.....	64
5.1. Modelagem de RNF.....	65
5.2. Modelagem de EE	74
5.3. Modelagem de Booster.....	80
5.4. Modelagem de RNV	84
5.5. Modelagem de Caso Real 1	91
5.6. Modelagem de Caso Real 2	107
5.7. Otimizando a Operação de EE com AG	116
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	128
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132

ANEXOS	138
Anexo A – Arquivo de Entrada da Modelagem de RNF.....	139
Anexo B – Arquivo de Entrada da Modelagem de EE	140
Anexo C – Arquivo de Entrada da Modelagem de Booster	141
Anexo D – Arquivo de Entrada da Modelagem de RNV	142
Anexo E – Arquivo de Entrada da Modelagem de Caso Real 1 no MOC.....	143
Anexo F – Arquivo de Entrada da Modelagem de Caso Real 2 no MOC	148
Anexo G – Arquivo de Saída da Modelagem de RNF	150
Anexo H – Arquivo de Saída da modelagem de EE	151
Anexo I – Arquivo de Saída da Modelagem de Booster	160
Anexo J – Arquivo de Saída da Modelagem de RNV	166
Anexo K – Arquivo de Saída da Modelagem de Caso Real 1 no MOC (Formatado em Excel)	175
Anexo L – Arquivo de Saída da Modelagem de Caso Real 2 no MOC.....	180
Anexo M – Arquivo de Entrada da Otimização (Dados hidráulicos)	181
Anexo N – Arquivo de Saída da Otimização na Tarifa Convencional A (Formatado em Excel).....	183
Anexo O – Arquivo de Saída da Otimização na Tarifa Horo-Sazonal Verde (Formatado em Excel).....	184
Anexo P – Arquivo de Saída da Otimização na Tarifa Horo-Sazonal Azul (Formatado em Excel).....	185
Anexo Q – Formulações do MOC para Elementos Nós e Trechos	186

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Tarifas associadas aos custos energéticos de bombeamento (Fonte: CAERN em 12/08/09)	55
Tabela 5.1. Comparação MOC e EPANET para RNF	66
Tabela 5.2. Comparação MOC e EPANET para RNF considerando diferentes valores de celeridade	68
Tabela 5.3. Comparação MOC e EPANET para RNF, com variação no comprimento	72
Tabela 5.4. Resultados de pressão do MOC e do EPANET na modelagem da EE 76	
Tabela 5.5. Resultados de vazão do MOC e do EPANET na modelagem da EE ...	77
Tabela 5.6. Resultados de pressão do MOC e do EPANET na modelagem de booster	81
Tabela 5.7. Resultados de vazão do MOC e do EPANET na modelagem de booster	82
Tabela 5.8. Resultados de pressão do MOC e do EPANET na modelagem de RNV	86
Tabela 5.9. Resultados de vazão do MOC e do EPANET na modelagem de RNV	87
Tabela 5.10. Dados relativos aos nós da rede de abastecimento de água modelada do município de Natal	95
Tabela 5.11. Dados relativos aos trechos da rede de abastecimento de água modelada do município de Natal	96
Tabela 5.12. Dados relativos à EE da rede de abastecimento de água modelada do município de Natal (Fonte: CAERN)	97
Tabela 5.13. Dados relativos aos padrões de consumo da rede de abastecimento	

de água modelada do município de Natal (Fonte: CAERN).....	97
Tabela 5.14. Resultados das Simulações (pressões nodais na primeira hora da simulação) no EPANET e no MOC considerando diferentes valores de celeridade.....	99
Tabela 5.15. Dados e resultados das simulações dos nós	110
Tabela 5.16. Dados e resultados das simulações dos trechos	111
Tabela 5.17. Configuração do AG para avaliar diferentes critérios de tarifação das EE.....	118
Tabela 5.18. Resultados obtidos para a operação ótima das EEs considerando a tarifação convencional A.....	118
Tabela 5.19. Resultados obtidos para a operação ótima das EEs considerando a tarifação horo-sazonal verde	119
Tabela 5.20. Resultados obtidos para a operação ótima das EEs considerando a tarifação horo-sazonal azul.....	120
Tabela 5.21. Configurações do AG para verificar a influência de parâmetros no seu desempenho	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Estrutura de um algoritmo genético padrão	32
Figura 3.2. Malha de cálculo para resolução do problema em uma tubulação comum (x, t).....	37
Figura 3.3. Fluxograma do processo de cálculo.....	45
Figura 4.1. Matriz bidimensional binária representativa de uma regra operacional de um sistema com “N” estações elevatórias e um ciclo de operação de “M” intervalos de tempo.....	46
Figura 4.2. Exemplo da arquitetura de um cruzamento entre duas regras operacionais	51
Figura 4.3. Exemplo da mutação em uma regra operacional.....	52
Figura 4.4. Fluxograma dos módulos desenvolvidos para o modelo computacional	57
Figura 4.5. Formulário principal indicando os dados de entrada e resultados da simulação no MOC	58
Figura 4.6. Formulário principal no painel que permite visualizar o mapa da rede .	59
Figura 4.7. Formulário auxiliar referente aos dados do projeto	60
Figura 4.8. Formulário auxiliar para visualizar os padrões de demanda da simulação.....	61
Figura 4.9. Formulário auxiliar para visualizar o controle das bombas.....	61
Figura 4.10. Formulário auxiliar para entrada de dados da otimização em AG.....	63
Figura 4.11. Formulário auxiliar para mostrar os resultados da otimização em AG	63
Figura 5.1. Configuração da rede para modelagem de RNF.....	65
Figura 5.2. Resultados das simulações considerando diferentes celeridades (1.000	

m/s, 500 m/s e 1.500 m/s)	67
Figura 5.3. Resultados das simulações considerando diferentes celeridades (25 m/s, 20 m/s e 15m/s)	69
Figura 5.4. Resultados das simulações considerando variação gradual do consumo nodais	70
Figura 5.5. Resultados de simulações considerando variação dos comprimentos dos trechos	72
Figura 5.6. Configuração da rede para modelagem de EE	75
Figura 5.7. Processo de convergência do MOC, primeiro hora de simulação (EE)	78
Figura 5.8. Processo de convergência do MOC, segunda hora de simulação (EE)	79
Figura 5.9. Configuração da rede para modelagem de Booster.....	80
Figura 5.10. Processo de convergência do MOC, primeiro hora de simulação (booster)	83
Figura 5.11. Configuração da rede para modelagem de RNV	84
Figura 5.12. Série temporal de pressões do Nó 09, simulação do RNV	89
Figura 5.13. Processo de convergência do MOC, primeiro hora de simulação (RNV)	90
Figura 5.14. Esquema de nós e trechos da rede de abastecimento de água modelada do município de Natal (Página 1 de 3).....	92
Figura 5.14. Esquema de nós e trechos da rede de abastecimento de água modelada do município de Natal (Página 2 de 3).....	93
Figura 5.14. Esquema de nós e trechos da rede de abastecimento de água modelada do município de Natal (Página 3 de 3).....	94
Figura 5.15. Série temporal dos valores de pressão no Nó 49	100

Figura 5.16. Série temporal dos valores de pressão no Nó 38	101
Figura 5.17. Série temporal dos valores de vazão no trecho 46	101
Figura 5.18. Série temporal dos valores de vazão no trecho 88	102
Figura 5.19. Convergência do MOC durante a primeira hora de simulação para o valor de pressão do Nó 49.....	103
Figura 5.20. Convergência do MOC durante a primeira hora de simulação para o valor de pressão do Nó 38.....	104
Figura 5.21. Convergência do MOC durante a primeira hora de simulação para o valor de vazão do Trecho 46	105
Figura 5.22. Convergência do MOC durante a primeira hora de simulação para o valor de vazão do Trecho 88	106
Figura 5.23. Configuração da adutora entre o poço BAN-I e o reservatório de 1.000 m ³	109
Figura 5.24. Dados da estação elevatória do poço BAN-I.....	110
Figura 5.25. Gráfico da Linha Piezométrica na Adutora BAN-I (Nó 02 a Nó 16)...	111
Figura 5.26. Cabeça do Poço e tubulação de ferro fundido no início da adutora..	112
Figura 5.27. Medidor de pressão em três momentos: 1) com a bomba desligada (pressão nula); 2) durante o enchimento da adutora (pressão 8 kgf/cm ²) e 3) durante o enchimento do reservatório, quando a pressão se estabilizou em 11 kgf/cm ²	113
Figura 5.28. Final da adutora de ferro fundido, chegando à torre de resfriamento	114
Figura 5.29. Torre de Resfriamento e Reservatório de 1.000 m ³	114
Figura 5.30. Adutora de PEAD no trecho gravitário a jusante do Reservatório.....	115
Figura 5.31. Configuração da rede utilizada para aplicação do algoritmo de otimização.....	117

Figura 5.32. Valor da função objetivo ao final de cada geração durante o processo evolutivo do AG	121
Figura 5.33. Seqüência de operação das EE sem e com a penalização por manobra.....	122
Figura 5.34. Tempo de processamento e o valor da função objetivo ao final de cada geração considerando a variação do tamanho das populações	124
Figura 5.35. Tempo de processamento e o valor da função objetivo ao final de cada geração considerando a variação da taxa de mutação	125
Figura 5.36. Tempo de processamento e o valor da função objetivo ao final de cada geração considerando a variação do número de gerações	126

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto romano (ou latino)

- a velocidade de propagação da onda de pressão (celeridade)
- a^* celeridade da onda informada pelo usuário ao modelo, utilizada como parâmetro numérico para cálculo do passo de tempo da simulação hidráulica (celeridade padrão)
- A área da seção transversal do tubo
- A_{BO} parâmetro da curva característica do booster
- A_{EE} parâmetro da curva característica da estação elevatória
- A_{RNV} área da seção transversal de reservatório de nível variável
- B_{BO} parâmetro da curva característica do booster
- B_{EE} parâmetro da curva característica da estação elevatória
- C_{BO} parâmetro da curva característica do booster
- C_{EE} parâmetro da curva característica da estação elevatória
- Cst custo unitário da tarifação de energia elétrica
- D diâmetro interno da tubulação
- EE_uH_v variável binária que indica se determinada estação elevatória está ligada ou desligada em determinado horário da simulação (gene)
- f fator de atrito de Darcy-Weisbach
- F fator de demanda máxima
- g aceleração da gravidade
- G número total de gerações populacionais, que determina o critério de parada

no Algoritmo Genético

H	carga hidráulica (cota piezométrica)
H_R	nível d'água de reservatório de nível constante
L_i	comprimento da tubulação de um trecho da rede
[L]	dimensão de espaço
M	número total de sub-períodos da simulação (normalmente é adotado o padrão de 24 horas nas simulações)
[M]	dimensão de massa
n	número total de tubulações da rede
N	número total de estações elevatórias da rede
NR	total de trechos a montante de um determinado nó
NS	total de trechos a jusante de um determinado nó
P_{nl}	custo associado à violação de restrições operacionais (penalidade)
q	demanda nodal
Q	vazão
Re	número de Reynolds
S	número total de indivíduos em cada geração, que determina o tamanho da população no Algoritmo Genético
t	tempo
T	duração de cada sub-período do tempo total da simulação (normalmente é adotado o padrão horário nas simulações)
[T]	dimensão de tempo

TF	tarifa do fator de demanda máxima
V	velocidade do fluido
x	distância
Z	cota em relação a um referencial adotado

Alfabeto grego

σ	indivíduo ou cromossomo do Algoritmo Genético, representado por um código binário matricial (seqüência de genes)
γ	peso específico da água
η	rendimento do conjunto motor-bomba
$\vec{\sigma}$	vetor que representa uma população formada por um conjunto de indivíduos ou cromossomos no Algoritmo Genético
$\vec{\gamma}$	vetor que representa um conjunto de gerações populacionais no Algoritmo Genético

Subscritos e Sobrescritos

i	índice que se refere aos nós da rede
k	índice que se refere aos trechos da rede
t	índice que se refere ao tempo na simulação
u	índice que se refere a cada estação de bombeamento no Algoritmo Genético
v	índice que se refere a cada horário da simulação no Algoritmo Genético

1. INTRODUÇÃO

Segundo Azevedo Netto *et al.* (1998) as obras hidráulicas remontam à Antiguidade. O primeiro sistema público de abastecimento de água potável conhecido é o aqueduto de Jerwan, construído na Assíria, em 691 a.C, embora canais de irrigação e coletores de esgotos já tivessem sido implantados anteriormente na Mesopotâmia e Babilônia. Mas foi realmente a partir do século XIX, com o desenvolvimento da produção de tubos de ferro fundido, capazes de resistir a pressões internas relativamente elevadas, com o crescimento das cidades e o emprego crescente de novas máquinas hidráulicas que houve evolução mais significativa dos sistemas hídricos.

É possível definir sistema de abastecimento de água como o conjunto de obras, equipamentos e serviços destinados ao suprimento de água potável a uma comunidade para fins de consumo doméstico, serviços públicos, consumo industrial e outros usos, devendo esta água ser fornecida em quantidade suficiente e qualidade satisfatória do ponto de vista físico, químico e bacteriológico (Azevedo Netto *et al.*, 1998).

Um sistema de abastecimento de água caracteriza-se pela retirada da água da natureza, adequação de sua qualidade, transporte até os aglomerados humanos e fornecimento à população em quantidade compatível com suas necessidades. Um sistema de abastecimento de água pode ser concebido para atender a pequenos povoados ou a grandes cidades, variando nas características e no porte de suas instalações.

Amado & Marques (2004) destacam a importância de garantir a adequada concepção e funcionalidade dos sistemas de distribuição e utilização de água, de forma a viabilizar a sua exploração segura e eficaz, sob o risco de ser colocada em causa a eficiência dos diferentes usos públicos ou privados da água, com conseqüências nefastas para a saúde pública, qualidade de vida e segurança das comunidades.

A operação de sistemas de distribuição de água é uma tarefa complexa, sendo necessário garantir confiabilidade no atendimento das demandas, fornecendo água com pressões adequadas nos pontos de consumo, além da utilização dos recursos do sistema de forma racional, visando economizar os gastos com a energia elétrica necessária ao funcionamento da rede.

Durante a operação desses sistemas, o seu comportamento hidráulico é influenciado pela mudança dos padrões temporais de consumo, variação dos níveis de tanques, acionamento e desligamento de bombas, abertura e fechamento de válvulas, etc, que resultam na oscilação das pressões e velocidades nos escoamentos.

A modelação computacional, associada a uma adequada percepção física dos sistemas e fenômenos que possam ser gerados, pode contribuir para um adequado funcionamento dos mesmos e assim melhorar a execução e exploração das obras, nas vertentes econômicas, de segurança e de qualidade de serviço às comunidades, conforme apontam Amado & Marques (2004).

Assim, o emprego de simuladores para análise do comportamento hidráulico de redes de distribuição é uma poderosa ferramenta para avaliar alternativas de regras operacionais que confirmam uma maior eficiência ao sistema. Nesse sentido, diversas técnicas de otimização aplicadas em associação a modelos hidráulicos têm sido desenvolvidas, visando identificar regras operativas que minimizem os custos funcionais do sistema e mantenham a qualidade do serviço.

Os sistemas de distribuição de água em redes pressurizadas podem ser, na grande maioria dos casos, adequadamente formulados como problemas de escoamento em regime permanente ou simulações de período estendido. Uma das técnicas de solução que apresenta excelentes resultados para esse tipo de problema é o Método das Características – MOC.

Uma das principais vantagens do Método das Características é que as equações são todas lineares e explícitas, de forma a se calcular a cada passo do processo iterativo, diretamente os valores das cargas piezométricas nodais. O método torna-se particularmente eficiente quando são utilizados valores convenientes para a celeridade, parâmetro considerado apenas numérico no cálculo do escoamento permanente, pois não precisa representar a velocidade de propagação das perturbações no meio fluido como ocorre na análise de transitórios hidráulicos (Righetto, 1994).

Em relação às técnicas de otimização mais utilizadas para o problema em questão, o Algoritmo Genético – AG apresenta algumas vantagens sobre os métodos de busca direta como o Gradiente, Newton-Raphson, dentre outros. Por exemplo, não necessita

trabalhar com derivadas e esquemas matemáticos complexos, apresenta fácil implementação e hibridização com outras técnicas e possui a propriedade de “varrer” o espaço de busca de maneira eficaz.

Considerando este escopo, surgiu a pretensão de desenvolver um modelo hidráulico que utilizasse o MOC para determinação das variáveis hidráulicas de redes pressurizadas e empregasse a técnica dos Algoritmos Genéticos para otimização dos custos energéticos, gerando uma ferramenta analítica para obter regras mais eficientes de operação dos sistemas de abastecimento.

Destaca-se que para tal, partiu-se de um modelo originalmente desenvolvido por Righetto (1994), implementado em FORTRAN, que possibilitava simular algumas configurações básicas de redes de abastecimento de água, porém necessitava de adaptações no seu código para simulação de redes genéricas com diversos elementos. O programa desenvolvido foi implementado em DELPHI e agregou novas funcionalidades ao original.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo principal:

- Desenvolver e validar um modelo hidráulico associado a uma rotina de otimização para operação de estações elevatórias (EE) em sistemas de abastecimento de água. Para as simulações hidráulicas, utiliza-se o conceito de pseudo-transiente, técnica que permite empregar o Método das Características em redes, adotando um valor fictício para a celeridade da onda, de modo a obter a convergência dos cálculos numéricos para um estado de regime permanente. Para a rotina de otimização, utilizou-se a técnica dos Algoritmos Genéticos – AG, no intuito de obter uma seqüência de acionamento e desligamento das EEs, de modo a minimizar os custos energéticos e atender às restrições operacionais do sistema.

Os objetivos específicos são:

- Implementar o modelo na linguagem de programação Delphi, incorporando novas capacidades ao modelo de Righetto (1994),
- Simular redes de abastecimento e adutoras para exemplos fictícios e casos reais, considerando diferentes configurações de sistemas, equipados com os seguintes elementos: estações elevatórias (EE), booster, reservatórios de nível fixo (RNF) e reservatórios de nível variável (RNV ou tanque). Em seguida, comparar seus resultados com dados de simulações no modelo EPANET 2 e com dados de medições de pressão obtidos em experimento de campo;
- Avaliar aspectos de convergência, esforço computacional e comportamento hidráulico das condições de fronteira do MOC, para chegar a conclusões sobre a viabilidade do seu emprego em problemas de redes de abastecimento em período estendido;
- Realizar aplicações da rotina de otimização, avaliando como variações nos parâmetros do AG, nas formas de tarifação e nos critérios penalização da função objetivo – FO afetam o processo de busca.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. *Análise Hidráulica em Redes Pressurizadas*

Diversos autores têm desenvolvido estudos visando aprimorar as técnicas de modelagem em condições permanentes (Shamir & Howard (1968); Wood & Charles (1972); Isaacs e Mills (1980)) e em regime transitório (Wylie & Streeter (1978, 1983, 1993), Chaudhry (1979; 1987) e Almeida & Koelle (1992)). Fletcher (1988) analisa técnicas computacionais de dinâmica dos fluidos aplicadas à solução de problemas de hidráulica em regime não permanente.

Segundo Amado & Marques (2004), na resolução das equações que regem o comportamento físico dos escoamentos nos sistemas de distribuição de água, têm sido consideradas, na maioria das situações, condições de regimes permanentes ou quase-permanentes, dado que a modelação em regime transiente, além de mais complexa, se torna muito exigente em termos de esforço computacional, tanto em relação ao tempo de processamento, como na alocação da memória requerida.

Na análise hidráulica do período estendido, em regime permanente de escoamento, considera-se que modificações nas pressões e vazões ao longo do sistema ocorram instantaneamente, ou seja, após uma perturbação, o escoamento no sistema passa de uma condição estática para outra, negligenciando-se o tempo transcorrido para a estabilização do escoamento e os efeitos dinâmicos da transição. No entanto, as condições hidráulicas em sistemas de distribuição de água estão quase sempre em contínuo estado de alteração. Dada essa característica dinâmica, as considerações de escoamento permanente nas análises hidráulicas certamente limitam o emprego dos modelos computacionais (Soares *et al.*, 2008).

Karney (2000) comenta que, possivelmente, o emprego corrente de análises hidráulicas considerando o escoamento permanente, se deve à mistificação freqüentemente envolvida no desenvolvimento e entendimento do fenômeno transitório em condutos forçados, uma vez que a complexidade das equações diferenciais parciais não-lineares e a natureza dinâmica dos sistemas tendem a intimidar os modeladores.

Novakoski (2005) demonstra formas de estruturar metodologias de cálculo de pressões e vazões em redes hidráulicas de escoamento permanente, por meio

de modelos matemáticos de linearização, de Newton-Raphson e de Gauss com pivotamento, que se valem na sua construção de métodos numéricos, visando a sua implementação em linguagem de programação.

Para os escoamentos variáveis, o modelo mais utilizado e que apresenta excelentes resultados em termos de exatidão da solução (vazões e pressões) é o Método das Características (MOC). No entanto, este método no caso de sistemas complexos e com características físicas muito heterogêneas, mormente em termos de “rigidez”, exige grande esforço computacional em termos de tempo de execução e memória necessária ao cálculo (Amado & Marques, 2004).

Soares *et al.* (2008) apontam que uma fácil explicação do comportamento transitório pode ser obtida pelo simples conhecimento das propriedades físicas do fluido e de leis de conservação de massa e energia. Em redes hidráulicas, duas propriedades são relevantes: a elevada massa específica da água e seu alto módulo de elasticidade. Resumidamente, a água é pesada e difícil de ser comprimida. Por causa da elevada massa específica e pelo fato das tubulações serem longas, sistemas hidráulicos típicos transportam grande quantidade de massa e energia cinética. Além disso, pelo fato da água ser pouco compressível, elevadas alterações na pressão interna acontecem em decorrência de perturbações sobre o escoamento.

Deve-se frisar que os princípios físicos e matemáticos do comportamento transitório são também aplicados a escoamentos em regime permanente, tendendo o escoamento variável assintoticamente para a solução do regime permanente. Isto equivale a dizer que o escoamento variável é a transição entre dois estados de regime permanente.

Nas análises de transitórios hidráulicos em condutos sob pressão, dois modelos podem ser considerados: o modelo da coluna rígida, quando são admitidos líquido incompressível e conduto rígido, empregado para analisar os fenômenos de oscilação de massa (transitórios lentos com baixas frequências), e o modelo da coluna elástica, que considera os efeitos de elasticidade do líquido e do conduto, utilizado para a análise do golpe de aríete (transitórios rápidos com altas frequências).

Abreu *et al.* (1999) apresentam parâmetros adimensionais para definir os limites da

aplicabilidade dos modelos inercial elástico, inercial rígido e não-inercial quase-estático, que formam o grupo dos modelos dinâmicos, além do modelo estático, usado para análise do regime permanente.

Amando & Marques (2004) analisam o desempenho do MOC aplicados nas considerações de modelo elástico, rígido e escoamentos permanentes. Os autores propõem ainda, para sistemas complexos, a utilização de um modelo “híbrido”, em que este seja globalmente elástico, mas que, no entanto, para algumas tubulações com características muito rígidas, essas sejam efetivamente tratadas como rígidas. Foram obtidas boas performances neste modelo híbrido, sem que, no entanto, houvesse redução, de modo significativo, da precisão dos resultados.

Classicamente o MOC foi utilizado na resolução de problemas de engenharia envolvendo escoamentos variáveis (Wylie & Streeter, 1978; Chaudhry, 1979), partindo de condições pré-determinadas de regime permanente e de condições de fronteira particulares.

Posteriormente, foram efetuados esforços no sentido de aplicar o modelo à determinação de equilíbrios hidráulicos em regime permanente em pressão (Fox & Keech, 1975; Vardy & Chan, 1983; Shimada, 1988). No Brasil destacam-se os trabalhos de Koelle (1983), Luvizotto Jr. (1995), Righetto (1994, 2002), Luvizotto Jr & Anjo (2004), Anjo *et al.* (2008), Soares (2007), Soares *et al.* (2008).

Shimada (1988) apresentou um método denominado “Time-Marching Approach” (TMA), que consiste da avaliação ao longo do tempo de um pseudo-transitório que converge para o regime permanente. A análise hidráulica é baseada no modelo da coluna elástica, com uma generalização das equações da quantidade de movimento e da conservação de massa, além de procedimentos para a aceleração da convergência numérica.

No estudo, o autor propôs uma metodologia que consistia em transformar o sistema real em um sistema equivalente, de modo que a perda de energia fosse a mesma. Isto era obtido substituindo o fator de atrito real de cada tubulação (f_i) por um fator de atrito equivalente (f_i^*), e em que os comprimentos das diferentes tubulações de uma rede fossem o mesmo (L_0), resultando $f_i^* = f_i \times L_i / L_0$.

Assim, Shimada (1988) demonstrou que tal procedimento acelera a convergência do processo de cálculo para o regime permanente final, e que no caso de se utilizar apenas um comprimento único para todas as tubulações, bastaria otimizar o valor do passo de tempo (Δt), resultando assim em um número mínimo de iterações para a convergência correspondente ao regime permanente.

Considerando esta metodologia proposta por Shimada (2008), que é válida em regime permanente e quase-permanente, partindo de determinadas condições iniciais, como, por exemplo, vazão nula em todas as tubulações (situação hidrostática), utilizando condições de contorno adequadas e considerando uma celeridade fictícia $a^* = L_0 / \Delta t$, pode-se resolver o equilíbrio hidráulico correspondente a determinada situação de regime permanente utilizando as equações do Método das Características (Amado & Marques, 2004).

Righetto (1994) desenvolveu um algoritmo baseado no MOC que foi aplicado no estudo de casos de redes sujeitas a pressões negativas, a variações de demanda, ao processo de ajuste dos coeficientes de atrito de tubulações e da operação de sistemas contendo estações elevatórias, reservatórios de ponta, válvulas e “booster”. O autor implantou ainda um modelo de otimização visando alcançar a operação ótima de sistemas de distribuição de água, envolvendo parâmetros relacionados com o consumo de energia, confiabilidade operacional, satisfação quanto ao atendimento da demanda e controle das pressões nodais (Righetto, 2002).

Luvizotto Jr. (1995), utilizando o MOC, propôs uma sistematização para o escoamento permanente segundo a qual as tubulações são tratadas como um trecho único, resultando em apenas duas seções de cálculo para cada tubulação, coincidindo com os nós de montante e de jusante do escoamento. Foram analisados dois tipos de malhas, regular e cruzada, com a adoção de uma celeridade fictícia, além da avaliação de duas formas de acelerar a convergência para o regime estacionário, produzindo um “transitório apenas numérico” (pseudo-transitório).

Koelle (1983) apresentou o conceito de celeridade fictícia. Luvizotto Jr & Anjo (2004) e Anjo *et al.* (2008) modificaram o Método Gradiente para o cálculo hidráulico em escoamentos permanente e transitório lento. Soares *et al.* (2008) apresentaram um modelo hidráulico para análise de sistemas de distribuição de água sujeito a eventos

transitórios, o qual combina o Método das Características com o simulador EPANET 2, utilizado para inicialização das variáveis de estado, batizado de MOC-EPANET. Soares (2007) apresenta um estudo dos transitórios hidráulicos visando calibração e detecção de vazamentos em sistemas de distribuição de água.

Ressalta-se que pesquisadores da Universidade Federal do Ceará têm utilizado o MOC para solucionar problemas de escoamento em regime transitório, desenvolvendo programas baseados nas formulações clássicas propostas por Wylie & Streeter (1978, 1983, 1993) e Chaudhry (1979; 1987).

Neiva (2000) estudou a influencia do reservatório hidropneumático e da válvula de alívio como dispositivo de alívio do golpe de Aríete. Barbosa (2006) analisou o comportamento das ondas de sobrepressão e subpressão decorrentes do fenômeno transitório, verificando a influência da chaminé de equilíbrio e do tanque de alimentação unidirecional (TAU), comparando resultados com dados obtidos em testes realizados no CTran, software desenvolvido pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Peroba (2007), em continuidade aos trabalhos de Neiva (2000) e Barbosa (2006), implementou o modelo UFC6, produzido pelo Grupo de Estudos em Hidráulica Computacional da Universidade Federal do Ceará, que simula adutoras com ventosas automáticas de duplo efeito. Para resolver a não linearidade desta condição de contorno, aplicou-se o método da aproximação parabólica nos intervalos onde ocorre escoamento do ar em regime subsônico, seguindo a metodologia da bisseção (Lessa, 1984, Lessa, 1990). Rodrigues (2008) incorporou ao UFC6 a capacidade de simular ventosas com abertura e fechamento não instantâneos.

Retornando às técnicas de solução para problemas de redes pressurizadas em regime permanente, destaca-se o Método Gradiente (Todini & Pilati, 1988). Este tem sido empregado com bastante sucesso e foi implementado no modelo EPANET 2 (Rossman, 2000), um simulador hidráulico desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos.

Destaca-se que os modelos baseados na resolução de sistemas de equações lineares, como o Método Gradiente, podem resultar em valores incorretos para as

variáveis da carga hidráulica e vazão, em vista do elevado grau de esparsidade e da falta de condicionamento da matriz do sistema de equações. Embora haja a disponibilidade cada vez maior de recursos computacionais, o desconhecimento matemático de técnicas, como pré-condicionamento de matrizes e outras, pode comprometer a solução final obtida pelos métodos baseados na resolução de sistemas de equações lineares. Soares *et al.* (2008) apresentam um estudo em que avaliam as vantagens da utilização de uma combinação do Método Gradiente e do MOC para melhorar o processo de convergência de cálculo hidráulico em redes de abastecimento, tendo sido o modelo desenvolvido batizado de MOC-EPANET.

Righetto (1994) evidencia vantagens do MOC frente a outras técnicas de solução para problemas em regime permanente e período estendido, como a facilidade de caracterização do sistema e o equacionamento explícito das cargas nodais e das vazões nos trechos da rede, quando da aplicação do MOC. Segundo o autor, esta é a grande qualidade desse equacionamento que, apesar de exigir um número relativamente grande de passos no tempo para se alcançar a condição de escoamento permanente, não necessita de um número elevado de operações algébricas, necessárias quando se trata da resolução de sistemas de equações.

3.2. Algoritmos Genéticos

Algoritmos Genéticos, AGs, são métodos de otimização e de busca inspirados nos mecanismos de evolução de populações de seres vivos. Fundamentam-se no princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto, declarado em 1859 pelo naturalista e fisiologista inglês Charles Darwin, em seu livro “A Origem das Espécies” (Darwin, 1859).

Segundo Goldberg (1989), os Algoritmos Genéticos, em contraste a outras técnicas evolutivas, foram concebidos não para solucionar problemas específicos, mas sim estudar o fenômeno de adaptação como ele ocorre na natureza e desenvolver caminhos através dos quais os mecanismos da adaptação natural pudessem ser importados para os sistemas computacionais.

Os AGs possuem termos originários da biologia e discussões sobre a associação comumente realizada entre o termo no sentido biológico e a exportação do seu significado ou conceito para o método de busca encontram-se apresentadas em Goldberg (1989) e Lacerda & Carvalho (1999).

O método se baseia em uma seqüência de etapas, quais sejam: geração de uma população inicial de cromossomos codificados, determinação da aptidão dos cromossomos, seleção dos mais aptos no processo evolutivo (roda da roleta, seleção por torneios, etc.), imposição de modificações aos cromossomos por meio de “cruzamentos” (crossover) e “mutação”, manutenção das melhores soluções (elitismo) e critério de parada.

De acordo com a descrição de Soares (2003), o primeiro passo de um AG é a geração de uma população inicial de soluções. Durante o processo de otimização, a população é avaliada e cada solução recebe um valor, denominado aptidão. A técnica dos AGs é baseada fundamentalmente na utilização de operadores inspirados na genética: seleção, recombinação e mutação, os quais são aplicados repetidamente em busca de soluções eficientes para o problema. A seleção é o mecanismo através de que as características de uma solução possível (cromossomo ou indivíduo) são transmitidas à próxima geração, resultando na sobrevivência das soluções mais aptas, ou seja, que resultem em valores mais eficientes da função objetivo – FO. A recombinação promove a troca parcial de segmentos correspondentes entre dois cromossomos pais, gerando dois

novos cromossomos filhos. A mutação é o resultado de uma degeneração casual dos valores, permitindo a introdução de novas características genéticas às populações. Nos AGs, a mutação é considerada mais um método para recuperar material genético perdido do que de procura de uma solução melhor, cujos resultados é ampliação do espaço da busca.

Carrijo *et al.* (2003) aponta que os AGs são baseados em processos estocásticos de busca, e vêm sendo utilizados com sucesso, com amplas possibilidades de aplicação em várias áreas de conhecimento, devido à facilidade de implementação e a quase ilimitada condição de aplicabilidade de seus recursos. Os AGs são métodos de busca baseados na seleção natural e na genética de evolução populacional e, especialmente, adequados para tratar problemas complexos como os relativos aos sistemas de distribuição de água. Apresentam vantagens sobre as técnicas de otimização convencionais quanto à possibilidade de analisar diretamente populações de soluções e, através de um aprimoramento de populações sucessivas, chegar a soluções com alta performance.

A Figura 3.1 mostra um fluxograma com os passos básicos de um algoritmo genético padrão.

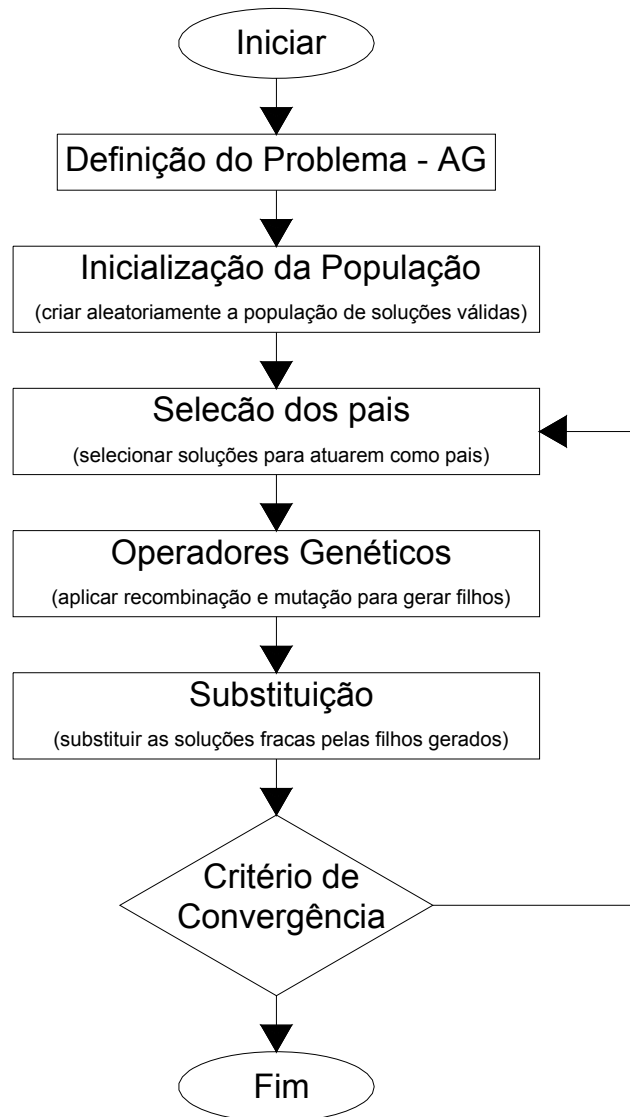


Figura 3.1. Estrutura de um algoritmo genético padrão

Segundo Lacerda & Carvalho (1999) os Algoritmos Genéticos têm sido empregados em problemas complexos de otimização em que outras técnicas convencionais apresentam falhas, podendo-se citar como vantagens dos AGs:

- Funcionam tanto com parâmetros contínuos como discretos ou combinação deles;
- Realizam buscas simultâneas em várias regiões do espaço de busca, pois trabalham com uma população e não com um único ponto;
- Utilizam informações de custo ou recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar;

- Não é necessário conhecimento matemático aprofundado do problema;
- Otimizam um número grande de variáveis;
- Adaptam-se bem a computadores que processam em paralelo;
- Otimizam parâmetros de funções objetivos com superfícies complexas e complicadas, reduzindo a incidência de mínimos locais;
- Trabalham com codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros;
- Fornecem uma lista de parâmetros ótimos e não uma simples solução;
- Trabalham com dados gerados experimentalmente e são tolerantes a ruídos e dados incompletos;
- São modulares e portáteis, no sentido que o mecanismo de evolução é separado da representação particular do problema considerado. Assim, eles podem ser transferidos de um problema para outro.
- São flexíveis para trabalhar com restrições arbitrárias e otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes;
- São também facilmente hibridizados com outras técnicas heurísticas.

Porém, Lacerda & Carvalho (1999) alertam que, apesar das vantagens, os AGs não são eficientes para muitos problemas. São bastante lentos e não raro ainda estão avaliando a população inicial, enquanto outros métodos de “Subida de Encosta” (gradiente) já têm encontrado a solução. O principal campo de aplicação dos AGs é em problemas complexos, com múltiplos mínimos/máximos e para os quais não existe um algoritmo de otimização eficiente conhecido para resolvê-los.

Soares (2003) aponta como vantagens dos AGs sobre os métodos convencionais de busca direta o fato de que eles trabalham com o código dos parâmetros e não com os parâmetros propriamente ditos; realizam a busca a partir de uma população de pontos e não de um único ponto, usam informações da função objetivo apenas, não necessitando de derivadas ou de outras informações; não é necessário conhecimento matemático complexo, sendo de fácil implementação; são capazes de otimizar um número grande de variáveis, trabalhando com funções objetivas de superfícies complexas, reduzindo a

incidência de mínimos ou máximos locais; adaptam-se bem a técnicas de computação paralela; fornecem uma gama de parâmetros ótimos e não uma simples solução; usam regras de transição probabilísticas, e não determinísticas; são facilmente hibridizados com outras técnicas, apresentam a propriedade de varrer o espaço de busca de maneira eficaz, mesmo se o número de variáveis de decisão for grande.

Em relação à representação das soluções em AG existem as formas binária e real. A representação binária é a mais usual, sendo simples de utilizar e analisar teoricamente. É importante do ponto de vista histórico e foi utilizada nos trabalhos pioneiros. A representação real permite precisão numérica maior, criação de mais operadores genéticos e gerar cromossomos menores. Michalewicz (1994) discute o uso das representações binária e real.

Walters & Lohbeck (1993) aplicaram a técnica de AG para obter o traçado ótimo de redes de distribuição e compararam com programação dinâmica. Os autores concluíram que para as redes mais simples, os AGs atingiram os mesmos resultados da programação dinâmica, mas com menos esforço computacional. Já para redes mais complexas, os AGs apresentaram resultados melhores.

O trabalho de Simpson, Dandy & Murphy (1994) é considerado uma referência no uso de AGs aplicados a problemas de otimização em sistemas de distribuição de água (dimensionamento de diâmetros) e na comparação com outras técnicas de otimização, como a programação não-linear. Os autores apontaram que, embora a programação não-linear foi a técnica que utilizou os menores tempos computacionais, os AGs foram bastante eficientes na busca das soluções ótimas, e sua principal vantagem residiu no fato deles apresentarem uma gama de soluções possíveis e eficientes para o problema, de modo que uma das soluções alternativas poderia ser tomada como preferencial, com base em características não quantificáveis (qualitativas).

No Brasil destacam-se as pesquisas de Reis *et al.* (1997), Righetto (2002), Araújo & Chaudhry (2002), Araújo (2003), Soares (2003), Cheung (2004) e Soares (2007) como trabalhos que envolvem algoritmos genéticos aplicados a estudos hidráulicos. Na Universidade Federal do Ceará os trabalhos de destaque ficam por conta de Alencar Neto (2003) e Silva (2006).

3.3. MOC Pseudo-Transiente Aplicado a Escoamento Permanente

O fenômeno dos transitórios hidráulicos em condutos forçados é descrito pelas equações da continuidade e da quantidade de movimento. Estas formam um sistema de equações diferenciais parciais do tipo hiperbólico, cuja solução analítica exata não pode ser obtida, podendo-se chegar ao valor aproximado através de integração numérica (Chaudhry, 1979; Almeida & Koelle, 1992; Wylie & Streeter, 1993).

Para a grande maioria dos problemas envolvendo escoamentos variáveis em pressão, os termos convectivos são muito pequenos quando comparados com os outros termos que entram nas equações; esta aproximação é equivalente a aceitar que velocidade do escoamento no tubo é muito menor que a celeridade, o que resulta nas seguintes equações:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f|V|V}{2D} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{g}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Em que:

- x: distância; [L]
- t: tempo; [T]
- H: carga hidráulica (cota piezométrica), [L]
- V: velocidade do fluido; [L/T]
- D: o diâmetro interno da tubulação; [L]
- a: corresponde a velocidade de propagação da onda de pressão (celeridade); [L/T]
- g: aceleração da gravidade; [L/T²]
- f: fator de atrito de Darcy-Weisbach.

As Eq. (1) e (2) representam o fenômeno da propagação dos transitórios hidráulicos em condutos elásticos e permitem determinar as cotas piezométricas e velocidades em qualquer secção da tubulação e em qualquer instante ao longo desses transitórios. Uma vez que estas equações não podem ser resolvidas por via analítica, vários têm sido os estudos efetuados com o objetivo de obter uma solução considerando um modelo analítico simplificado, ou, por outra via, desenvolvendo modelos numéricos, dentre os quais um dos mais utilizados na comunidade técnico-científica é o MOC (Amado & Marques, 2004).

Considerando algumas modificações no sistema das Eq. (1) e (2) e transformando a velocidade em vazão por aplicação da equação da continuidade, o MOC proporciona a substituição do referido sistema de equações, por outro de derivadas totais, ao longo de duas linhas características (C^+ e C^-).

$$C^+ : \frac{dx}{dt} = a; \quad dH + \frac{a}{gA} dQ + \frac{f a}{2gDA^2} Q|Q|dt = 0 \quad (3)$$

$$C^- : \frac{dx}{dt} = -a; \quad -dH + \frac{a}{gA} dQ + \frac{f a}{2gDA^2} Q|Q|dt = 0 \quad (4)$$

Em que:

- Q: vazão do escoamento; [L^3/T]
- A: área da seção transversal do tubo. [L^2]

Integrando ao longo das linhas características C^+ e C^- e reescrevendo o sistema de Eq. (3) e (4), sob um esquema de diferenças finitas, vêm duas equações de compatibilidade ao longo das linhas características:

$$C^+ : (Q_i^{t+\Delta t} - Q_{i-1}^t) + \frac{g.A}{a} (H_i^{t+\Delta t} - H_{i-1}^t) + \frac{f.\Delta t}{2.D.A} Q_{i-1}^t |Q_{i-1}^t| = 0 \quad (5)$$

$$C^- : (Q_i^{t+\Delta t} - Q_{i+1}^t) - \frac{g.A}{a} (H_i^{t+\Delta t} - H_{i+1}^t) + \frac{f.\Delta t}{2.D.A} Q_{i+1}^t |Q_{i+1}^t| = 0 \quad (6)$$

Em que:

- $Q_i^{t+\Delta t}$: vazão em um determinado nó "i" num instante de tempo "t+Δt"; [L^3/T]
- $H_i^{t+\Delta t}$: carga hidráulica em um determinado nó "i" num instante de tempo "t+Δt"; [L]
- Q_{i-1}^t : vazão em um determinado nó "i-1" num instante de tempo "t"; [L^3/T]
- Q_{i+1}^t : vazão em um determinado nó "i+1" num instante de tempo "t"; [L^3/T]
- H_{i-1}^t : carga hidráulica em um determinado nó "i-1" num instante de tempo "t"; [L]
- H_{i+1}^t : carga hidráulica em um determinado nó "i+1" num instante de tempo "t"; [L]
- Δt : passo de tempo do cálculo numérico. [T]

Efetuada uma discretização do domínio por aplicação de uma grelha com intervalos especificados e utilizando o critério de estabilidade de Von Neumann, tem-se para a condição de estabilidade que $\Delta t/\Delta x \leq 1/a$. A Figura 3.2 ilustra a seguir uma representação da malha característica do esquema numérico de forma a proporcionar um melhor entendimento e visualização do equacionamento.

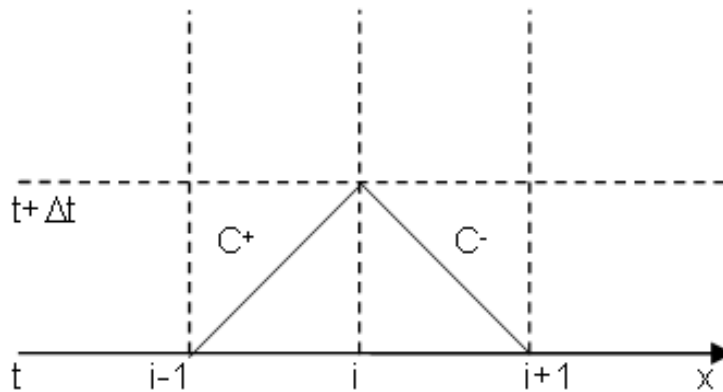


Figura 3.2. Malha de cálculo para resolução do problema em uma tubulação comum (x, t)

Manipulando os termos é possível expressar $Q_i^{t+\Delta t}$ em função de $H_i^{t+\Delta t}$:

$$Q_i^{t+\Delta t} = C_P - C_A \cdot H_i^{t+\Delta t} \quad (7)$$

$$Q_i^{t+\Delta t} = C_N + C_A \cdot H_i^{t+\Delta t} \quad (8)$$

$$C_P = Q_{i-1}^t + C_A \cdot H_{i-1}^t - F \cdot Q_{i-1}^t \cdot |Q_{i-1}^t| \quad (9)$$

$$C_N = Q_{i+1}^t - C_A \cdot H_{i+1}^t - F \cdot Q_{i+1}^t \cdot |Q_{i+1}^t| \quad (10)$$

$$C_A = \frac{g \cdot A}{a} \quad (11)$$

$$F = \frac{f \cdot \Delta t}{2 \cdot D \cdot A} \quad (12)$$

A idéia básica para utilização do MOC como técnica de solução para redes em regime permanente consiste em partir de uma condição inicial simples, em que todos os nós apresentam uma mesma carga hidráulica e os trechos apresentam vazões nulas (condição hidrostática).

Em seguida são impostas perturbações ao sistema, impondo vazões de consumo aos nós, que representam as demandas do sistema, e o MOC efetua o cálculo numérico entre um estágio de regime permanente inicial até um estágio de regime permanente final. Entretanto, como a precisão do cálculo hidráulico durante a transição entre os estágios inicial e final não é de interesse particular, pode-se tratar a celeridade apenas como um parâmetro numérico, procurando um valor que proporcione tornar mais rápida a convergência do processo. A oscilação dos valores de pressão e vazão durante a transição é apenas fictícia, ou seja, pode ser definida como um pseudo-transiente.

Segundo Righetto (2002), o uso do MOC para simular o comportamento hidráulico em redes consiste em tomar elementos de dois tipos: “Nós” ou “Trechos”. Nos elementos do primeiro tipo determinam-se valores de carga hidráulica, enquanto nos elementos do segundo determinam-se valores de vazões.

Assim, elementos tipo “Nós” podem representar:

- Ponto de demanda/consumo;

- Reservatório de Nível Constante;
- Reservatório de Nível Variável;
- Estação Elevatória;

Já elementos tipo “Trecho” podem representar:

- Tubulações;
- Booster;
- Válvulas;

A modelagem de cada um desses elementos, proposta em diversos trabalhos (Almeida & Koelle, 1992; Chaudhry, 1979; Wylie & Streeter, 1993; Righetto, 1994), é apresentada a seguir:

Ponto de demanda/consumo:

Para um nó “i” em que ocorre a partida e a chegada de vários trechos:

$$H_i^{t+\Delta t} = (q_i^{t+\Delta t} - B_i) / A_i \quad (13)$$

$$A_i = -\left[\sum_{r=1}^{NR} C_A(m_r) + \sum_{s=1}^{NS} C_A(j_s) \right] \quad (14)$$

$$B_i = \left[\sum_{r=1}^{NR} C_P(m_r) - \sum_{s=1}^{NS} C_N(j_s) \right] \quad (15)$$

Em que:

- $q_i^{t+\Delta t}$: a demanda nodal “i” no passo de tempo “t+Δt”; [L^3/T]
- (m_r) : conjunto dos trechos de montante;
- (j_s) : conjunto dos trechos de jusante;

- NR: total de trechos a montante de um determinado nó “i”;
- NS: total de trechos a montante de um determinado nó “i”.

Reservatório de Nível Fixo (RNF):

$$H_i^{t+\Delta t} = H_R \quad (16)$$

$$Q_i^{t+\Delta t} = C_N + C_A \cdot H_i^{t+\Delta t} \quad (17)$$

Em que:

- H_R : nível d'água do RNF (constante). [L]

Reservatório de Nível Variável (RNV):

$$Q_i^{t+\Delta t} = \left(C_N + C_A \cdot H_i^t - \frac{0,5 \cdot C_A \cdot \Delta t \cdot Q_i^t}{A_{RNV}} \right) / \left(1 + \frac{0,5 \cdot C_A \cdot \Delta t}{A_{RV}} \right) \quad (18)$$

$$H_i^{t+\Delta t} = H_i^t - 0,5 [Q_i^{t+\Delta t} + Q_i^t] \Delta t / A_{RNV} \quad (19)$$

Em que:

- A_{RNV} : área da seção transversal do RNV. [L^2]

Estação Elevatória (EE):

$$aux1 = C_{EE} \quad (20)$$

$$aux2 = B_{EE} - 1 / C_A \quad (21)$$

$$aux3 = A_{EE} + Z + C_N / C_A \quad (22)$$

$$Q_i^{t+\Delta t} = \frac{-(aux2) - \sqrt{(aux2)^2 - 4 \cdot (aux1) \cdot (aux3)}}{2 \cdot (aux1)} \quad (23)$$

$$H_i^{t+\Delta t} = Z + A_{EE} + B_{EE} \cdot (Q_i^{t+\Delta t}) + C_{EE} \cdot (Q_i^{t+\Delta t})^2 \quad (24)$$

Em que:

- A_{EE} , B_{EE} , C_{EE} : parâmetros da curva característica da EE (função parabólica entre a carga e a vazão na EE);
- Z : cota do eixo da EE em relação ao referencial adotado. [L]

Tubulações:

$$QTB_k^{t+\Delta t} = \frac{C_N + C_P + C_A \cdot (H_{j-1}^{t+\Delta t} - H_{j+1}^{t+\Delta t})}{2} \quad (25)$$

Em que:

- $QTB_k^{t+\Delta t}$: é a vazão para a tubulação do trecho “k”, no passo de tempo “t+Δt”; [L^3/T]
- $H_{j-1}^{t+\Delta t}$: a carga hidráulica do nó “j-1”, nó de montante do trecho “k”, no passo de tempo “t+Δt”; [L]
- $H_{j+1}^{t+\Delta t}$: a carga hidráulica do nó “j+1”, nó de jusante do trecho “k”, no passo de tempo “t+Δt”. [L]

Booster:

$$aux4 = C_A \cdot C_{BO} \quad (26)$$

$$aux5 = C_A \cdot B_{BO} - 2 \quad (27)$$

$$aux6 = C_A \cdot A_{BO} + C_N + C_P \quad (28)$$

$$QBO_k^{t+\Delta t} = \frac{-(aux5) - \sqrt{(aux5)^2 - 4 \cdot (aux4) \cdot (aux6)}}{2 \cdot (aux4)} \quad (29)$$

$$HBO_k^{t+\Delta t} = A_{BO} + B_{BO} \cdot (QBO_k^{t+\Delta t}) + C_{BO} \cdot (QBO_k^{t+\Delta t})^2 \quad (30)$$

Em que:

- A_{BO} , B_{BO} , C_{BO} : são parâmetros da curva característica do booster (função parabólica entre a carga e a vazão);
- $QBO_k^{t+\Delta t}$: vazão para o booster do trecho “k”, no passo de tempo “t+Δt”; [L³/T]
- $HBO_k^{t+\Delta t}$: altura manométrica no booster do trecho “k”, no passo de tempo “t+Δt”. [L]

Passo de tempo e celeridade:

Ressalta-se que o passo de tempo do cálculo hidráulico deve ser uniforme para toda a rede. Este é determinado no modelo a partir de um valor médio, conforme a expressão a seguir:

$$\Delta t = \left(\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{a^*_i} \right) / n \quad (31)$$

Em que:

- L_i : comprimento do tubo “i”; [L]
- n: número total de tubulações;
- a^*_i : celeridade fictícia da onda do trecho “i”, denominada aqui celeridade padrão, que é fornecida pelo usuário arbitrariamente, mas que necessitará ser recalculada para a simulação hidráulica. Esta celeridade “corrigida” (recalculada) será aqui denominada de celeridade de cálculo (a), e determinada conforme a expressão a seguir: [L/T]

$$a_i = L_i / \Delta t \quad (32)$$

Para a equação de resistência de Darcy-Weisbach, o fator de resistência “f” é calculado de forma similar ao EPANET 2 (Rossman, 2000), ou seja, por diferentes equações, dependendo do número de Reynolds do escoamento (Re), conforme segue:

- Fórmula de Hagen – Poiseuille para $Re < 2000$ (Bhave, 1991):

$$f = 64/Re \quad (33)$$

- Fórmula explícita aproximada de Swamee e Jain para resolver a equação de Colebrook -White, nos casos em que $Re > 4000$, depende da rugosidade absoluta “ ε ” [L] (Bhave, 1991):

$$f = 0,25/\left[\text{Log}\left(\varepsilon/3,7D + 5,74/Re^{0,9}\right)\right]^2 \quad (34)$$

- Interpolação cúbica do ábaco de Moody para $2000 < Re < 4000$ (Dunlop, 1991):

$$f = (X1 + R(X2 + R(X3 + X4))) \quad (35)$$

$$R = Re/2000 \quad (36)$$

$$X1 = 7FA - FB \quad (37)$$

$$X2 = 0,128 - 17FA + 2,5FB \quad (38)$$

$$X3 = -0,128 + 13FA - 2FB \quad (39)$$

$$X4 = R(0,032 - 3FA + 0,5FB) \quad (40)$$

$$FA = (Y3)^{-2} \quad (41)$$

$$FB = FA(2 - 0,00514215/Y2/Y3) \quad (42)$$

$$Y2 = \left(\varepsilon/3,7D + 5,74/Re^{0,9}\right) \quad (43)$$

$$Y3 = -0,86859 \times \text{Ln}\left(\varepsilon/3,7D + 5,74/4000^{0,9}\right) \quad (44)$$

Critério de parada:

Os modelos de cálculo para regime permanente de escoamento normalmente utilizam como critério de parada o alcance de uma convergência na simulação. Isto pode

ser obtido, por exemplo, comparando, entre duas iterações consecutivas, se os valores de pressão para os nós da rede, assim como das vazões nos trechos, estão variando abaixo de uma tolerância definida.

Todavia, o modelo baseado no MOC foi desenvolvido visando aplicações para operação de redes de abastecimento de água equipadas com reservatórios de nível variável. Nestes casos, a duração normalmente considerada é de 24 horas, e devido à natureza do RNV e da variação dos padrões de demandas ao longo do tempo, não existe um processo de convergência para um valor final estático, pois não se atinge um regime permanente de fato, uma vez que o RNV está sempre enchendo ou esvaziando.

Assim, o critério de parada utilizado no modelo desenvolvido foi o tempo total de simulação, fornecido pelo usuário. O número de iterações é, portanto, o tempo total da simulação dividido pelo passo de tempo do cálculo hidráulico.

Este critério de parada, embora adequado para modelagem de RNV, apresenta desvantagens quando se consideram simulações onde se estabelece o regime permanente de fato, pois tende a aumentar o tempo total de processamento.

Nestes casos, quando se aplica o MOC, o número de iterações necessárias para atingir a convergência não é o mesmo do número de iterações da simulação hidráulica. Assim, quando o usuário indicar um tempo total de simulação muito superior ao necessário para a convergência, estará tomando um tempo de processamento desnecessário. É possível também ocorrer a situação inversa, onde a simulação seja interrompida pelo critério de parada antes da obtenção da convergência. Para não incorrer no segundo caso, é possível realizar simulações variando o tempo total de simulação e observando se os valores finais obtidos são os mesmos.

Um fluxograma simplificado do algoritmo do modelo é apresentado na Figura 3.3. Ressalta-se que na rotina de cálculo da EE, existe uma sub-rotina para verificar se a bomba estará ligada ou desligada. Este controle da EE poderá ser realizado em função do nível da água de algum RNV ou pré-determinando o estado da EE (ligada ou desligada) em função da hora da simulação. Padrões de demanda podem também ser fornecidos para alterar os valores dos consumos nodais ao longo do tempo.

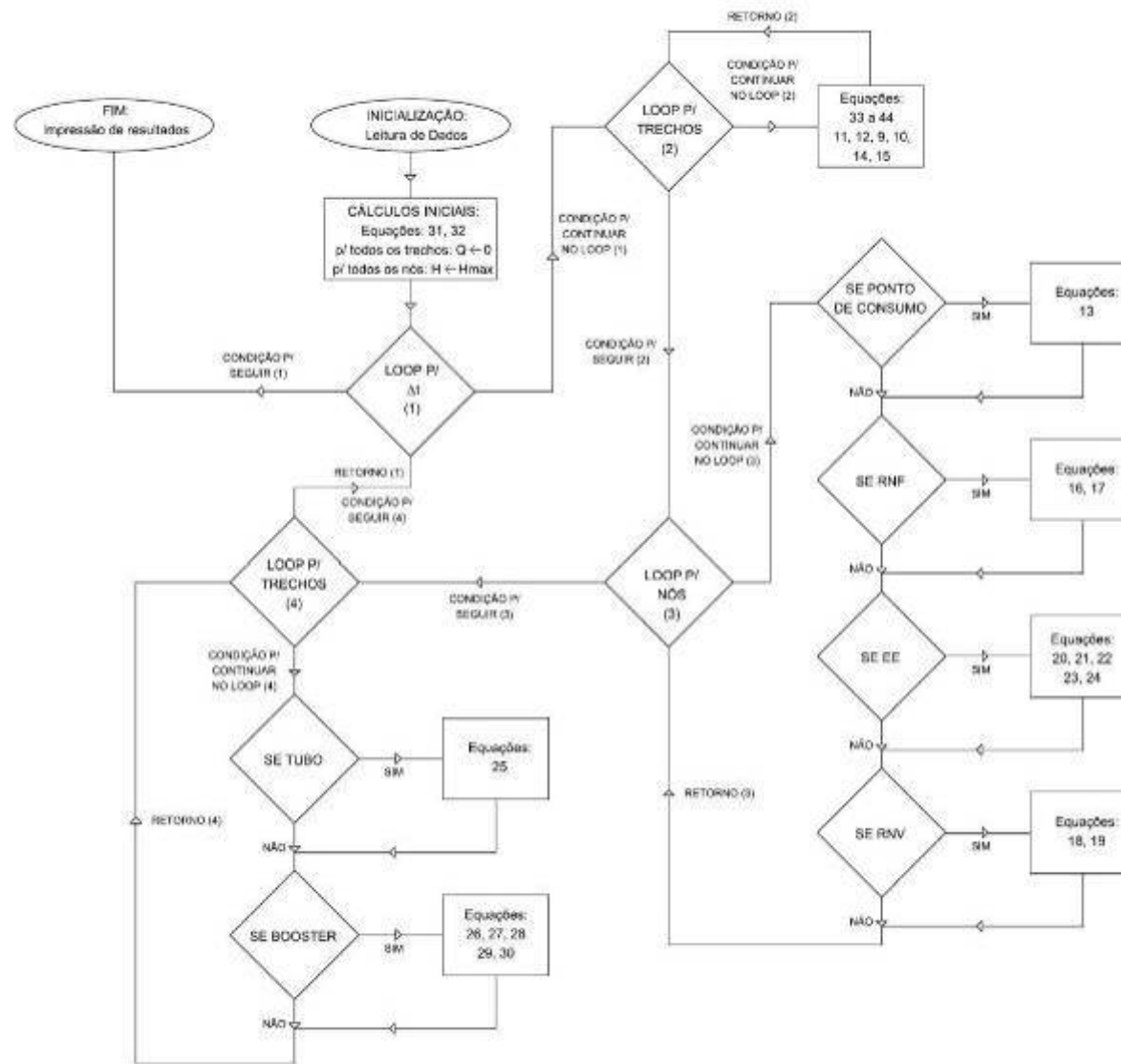


Figura 3.3. Fluxograma do processo de cálculo

4. METODOLOGIA

4.1. Minimização dos Custos de Bombeamento em AG

Para a simulação operacional do sistema deve ser definida uma duração total. O valor de 01 dia (24 horas) é normalmente o mais adequado nas aplicações, pois os padrões de demanda durante este intervalo tendem a se repetir ciclicamente no tempo, embora variações climáticas sazonais impactem causando algumas variações desses padrões ao longo do ano.

O período total da simulação deve então ser dividido em sub-períodos, como por exemplo, discretizar a duração total diária em sub-períodos horários. Nestes intervalos de tempo são estabelecidos os padrões de variação das demandas nodais, são computados os valores de pressão e vazão das simulações, e acionadas as regras operacionais de ligar e desligar as estações elevatórias.

As variáveis de decisão consideradas no modelo apresentado neste estudo estão associadas ao acionamento ou desligamento das estações elevatórias do problema. O desligamento ou acionamento de cada bomba, em cada sub-período da simulação, será representado por uma variável binária (gene), denotada por EE_uH_v , em que o índice “ u ” se refere à estação de bombeamento e o índice “ v ” se refere a um sub-período do tempo total de simulação. Assim, uma determinada regra operacional “ σ ” (indivíduo ou cromossomo) pode ser representada por uma matriz bidimensional de “genes”, conforme ilustração da Figura 4.1.

$$\sigma_{(N \times M)} = \begin{array}{ccccccc} EE_1h_1 & EE_1h_2 & EE_1h_3 & \dots & EE_1h_v & \dots & EE_1h_M \\ EE_2h_1 & EE_2h_2 & EE_2h_3 & \dots & EE_2h_v & \dots & EE_2h_M \\ EE_3h_1 & EE_3h_2 & EE_3h_3 & \dots & EE_3h_v & \dots & EE_3h_M \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ EE_uh_1 & EE_uh_2 & EE_uh_3 & \dots & EE_uh_v & \dots & EE_uh_M \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ EE_Nh_1 & EE_Nh_2 & EE_Nh_3 & \dots & EE_Nh_v & \dots & EE_Nh_M \end{array}$$

Figura 4.1. Matriz bidimensional binária representativa de uma regra operacional de um sistema com “N” estações elevatórias e um ciclo de operação de “M” intervalos de tempo

Nos procedimentos de otimização, G gerações de populações serão construídas e denotadas pelo vetor:

$$\vec{\gamma} = \langle \vec{\sigma}_1, \vec{\sigma}_2, \vec{\sigma}_3 \dots \vec{\sigma}_G \rangle. \quad (45)$$

Cada geração terá uma população constituída de S regras operacionais (indivíduos), expressas pelo vetor:

$$\vec{\sigma} = \langle \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots \sigma_S \rangle. \quad (46)$$

O número total de indivíduos em cada geração (S) determina o tamanho da população no Algoritmo Genético. Já o número total de gerações populacionais (G) determina o critério de parada no Algoritmo Genético.

A melhor regra operacional para a rede de abastecimento deverá ser escolhida usando técnicas de algoritmos genéticos e selecionada a partir de uma função paramétrica de desempenho, que exprima o consumo de energia.

Entretanto, o processo de escolha da regra operacional deverá considerar, além da função de desempenho, determinadas restrições, que estão relacionadas ao nível de atendimento da rede. Tais restrições são expressas no modelo por meio de limitações das pressões máximas e mínimas nos pontos de consumo, das velocidades máximas e mínimas nas tubulações, dos níveis d'água máximos e mínimos nos tanques e da quantidade de manobras nas estações elevatórias, que são prejudiciais à vida útil das mesmas.

Cada regra operacional " σ " constitui um indivíduo com " $N \times M$ " "genes". Todos os indivíduos de uma população são avaliados em relação a uma função objetivo, conforme expressão a seguir:

$$\text{Minimizar} \left(\sum_{u=1}^N \left(\sum_{v=1}^M \text{Cst}(v) \frac{Q(u,v)H(u,v)\gamma}{\eta(u)} T \right) + FD(u) TF \right) + Pnl \quad (47)$$

- $\text{Cst}(v)$: custo unitário da tarifa; (R\$/KWh)

- $Q(u,v)$: vazão bombeada na EE “u” no sub-período de tempo “v”; (m^3/s)
- $H(u,v)$: altura manométrica na EE “u” no sub-período de tempo “v”; (m)
- T : duração de cada sub-período do tempo total da simulação “v”; (h)
- γ : peso específico da água; (KN/m^3)
- N : número total de estações elevatórias;
- M : número total de sub-períodos de tempo ao longo simulação;
- $\eta(u)$: rendimento do conjunto motor-bomba na estação elevatória “u”;
- $FD(u)$: fator de demanda máxima; (KW)
- TF : tarifa do fator de demanda máxima; (R\$/KW)
- Pnl : custo associado à violação das restrições operacionais; (R\$)

Já as restrições abrangem as limitações impostas às variáveis do balanceamento hidráulico da rede, visando a preservação dos equipamentos. As equações das restrições são expressas por:

$$P_{\min i} \leq P_{it} \leq P_{\max i} \quad \forall i, \forall t \quad (48)$$

- P_{it} : pressão hidráulica para o nó “i” no instante “t”; [L]
- $P_{\min i}$: pressão hidráulica mínima requerida para o nó “i”; [L]
- $P_{\max i}$: pressão hidráulica máxima admitida para o nó “i”, [L]

$$V_{\min k} \leq V_{kt} \leq V_{\max k} \quad \forall k, \forall t \quad (49)$$

- V_{kt} : velocidade no trecho “k” no instante “t”; [L/T]
- $V_{\min k}$: velocidade mínima admitida no trecho “k”; [L/T]
- $V_{\max k}$: velocidade máxima admitida no trecho “k”. [L/T]

$$H_{\min it} \leq H_{it} \leq H_{\max it} \quad \forall i, \forall t \quad (50)$$

- H_{it} : nível d’água do reservatório “i” no instante “t”; [L]

- $H_{\min i}$: nível d'água mínimo do reservatório "i"; [L]
- $H_{\max i}$: nível d'água máximo do reservatório "i". [L]

Quando uma determinada regra operacional não atender às restrições, podem ser aplicados dois critérios:

- Opção 01: a solução encontrada (regra operacional) não poderá ser selecionada nem gerar descendentes;
- Opção 02: será incrementado um valor monetário (R\$) à função objetivo para cada restrição que não for atendida, visando penalizar essa solução.

Para a rotina de otimização desenvolvida no presente trabalho, foi adotado a Opção 02 para o tratamento das restrições. Isso permite uma flexibilização do atendimento das mesmas. Deste modo, é possível que regras operacionais que não atendam às restrições do problema gerem descendentes na execução do AG, embora o próprio processo de "seleção natural" se encarregue de dificultar esse acontecimento, por meio de penalidades incorporadas a essas soluções.

A Opção 02 permitiu também trabalhar a restrição associada à quantidade de manobras da estação elevatória de maneira simples, de modo que cada vez que uma EE fosse ligada, seria considerada uma penalidade na operação. Assim, ao final do processo de otimização, o AG "busca" uma solução que trate também de minimizar a quantidade de manobras das bombas, preservando esse tipo de equipamento.

Assim, o usuário terá a opção de entrar com os valores tarifários associados aos custos energéticos das estações de bombeamento, assim como os custos associados às violações das restrições, que representam as penalidades da operação. Destaca-se que as restrições embutem na solução obtida parâmetros de qualidade do atendimento e fatores que resultam na economia de manutenção da rede, que podem ser controlados pelo usuário.

Retornando ao processo de implementação do AG, a primeira geração populacional de indivíduos será formada pela geração aleatória dos mesmos. Já as gerações populacionais seguintes serão obtidas pela seleção das melhores regras operacionais (indivíduos) de cada geração, produzindo cruzamentos entre esses

indivíduos selecionados, resultando em descendentes potencialmente mais “aptos”, dos quais uma determinada parcela estará sujeita a “mutações genéticas”.

A seleção será baseada na técnica de “torneios”, que consiste em escolher aleatoriamente três indivíduos da população, dos quais será destinado ao processo de cruzamento somente o mais apto, ou seja, o que apresente a função objetivo de melhor desempenho (mínima).

O cruzamento (crossover) entre dois pais selecionados será realizado a partir da recombinação dos códigos binários, de modo que um ponto de corte será tomado aleatoriamente e os fragmentos cortados serão trocados entre si gerando descendentes diferentes dos pais (Figura 4.2).

O operador mutação é um mecanismo de busca que explora regiões desconhecidas do espaço amostral, alterando o valor de um gene, situado em uma posição aleatória; de 1 para 0, ou de 0 para 1, no caso de representação binária. A probabilidade de mutação deve ser sempre pequena. No caso de uma regra operacional sofrer mutação será tomado um gene aleatório EE_uH_v e invertido o seu código binário (Figura 4.3).

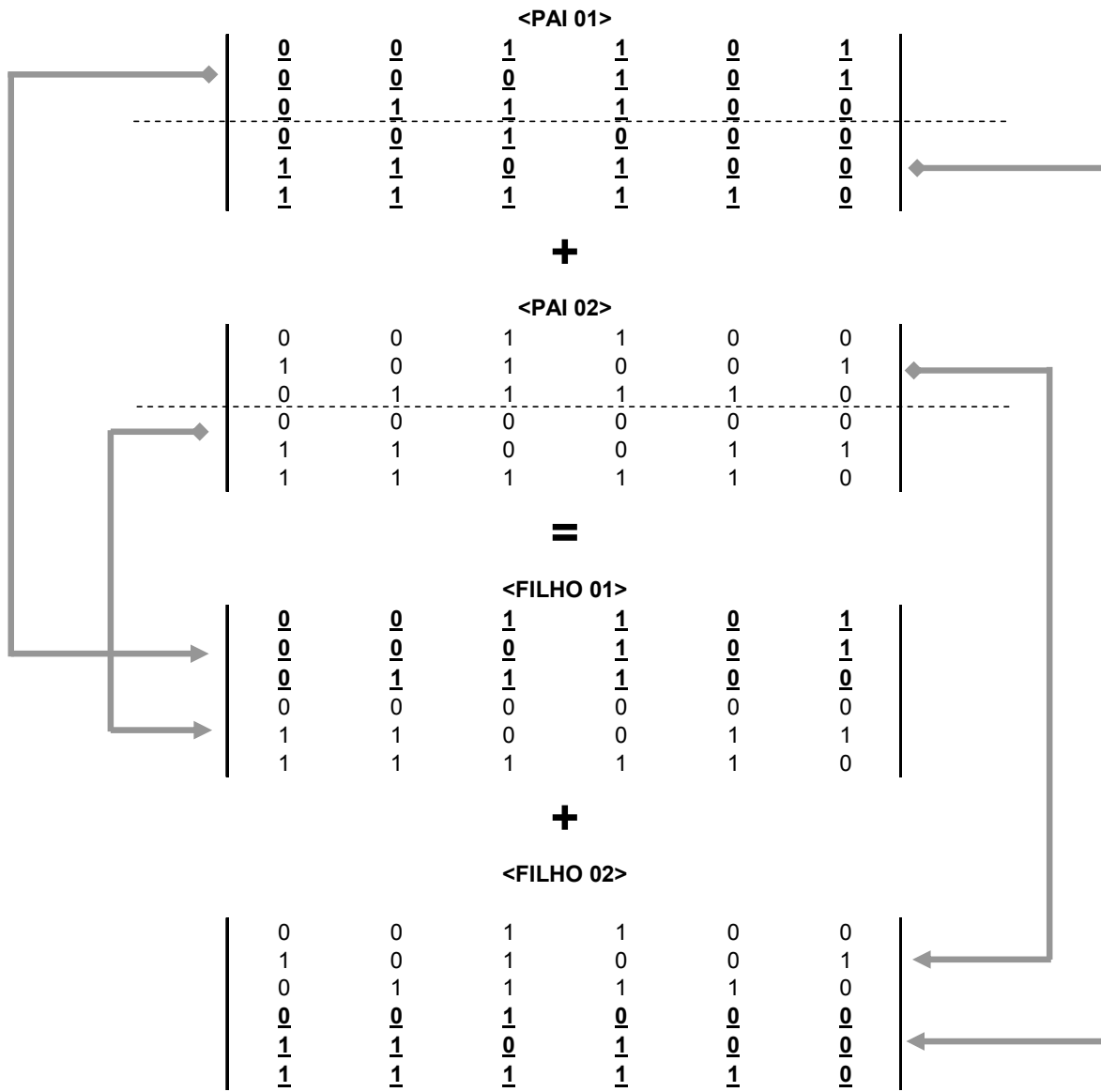


Figura 4.2. Exemplo da arquitetura de um cruzamento entre duas regras operacionais

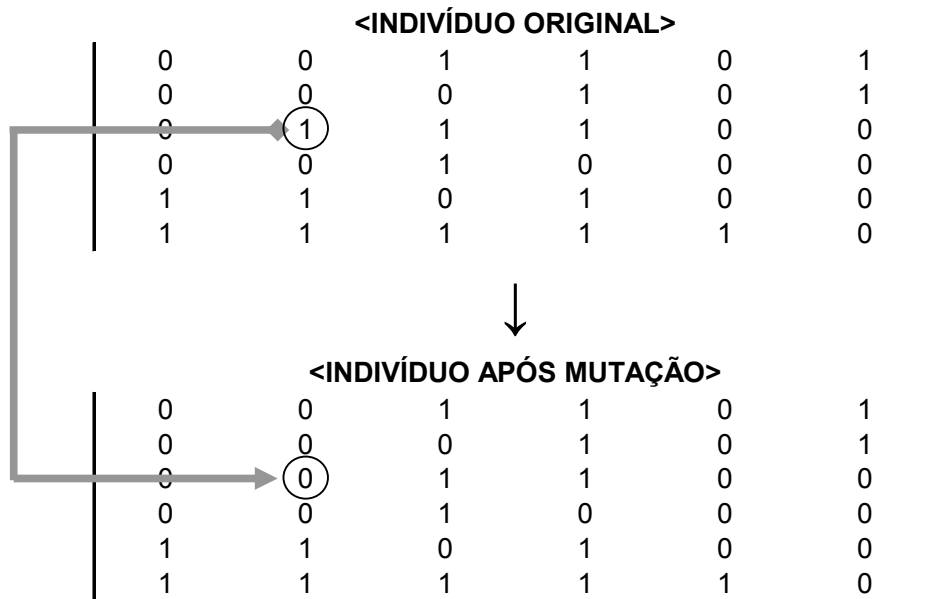


Figura 4.3. Exemplo da mutação em uma regra operacional

Após a aplicação dos operadores genéticos de recombinação e mutação, inicia-se o processo de substituição dos indivíduos da geração anterior pelos novos indivíduos gerados, formando uma nova população.

O emprego do elitismo assegura que os melhores indivíduos da geração anterior nunca serão substituídos por filhos piores. É comum a utilização de um valor baixo para a taxa de elitismo, a fim de reduzir os riscos de convergência prematura. No presente modelo utilizou-se o critério de sempre preservar um único descendente forte em cada geração.

O processo de evolução se encerra quando uma solução satisfatória é identificada por meio de critérios de parada dos quais podem se destacar: convergência da função objetivo, convergência da aptidão, número de gerações e quantidade de indivíduos que convergem para um mesmo valor. Para o otimizador do modelo apresentado no presente estudo será utilizado o critério de parada por número de gerações.

4.2. Custos de Bombeamento em Redes de Abastecimento

Conforme apresentado na Equação 47, além dos critérios de penalidade, os parâmetros da função objetivo do AG são o custo unitário da tarifa, que depende do consumo energético horário do equipamento, e o fator de demanda da

instalação, que é função da potência máxima utilizada. Essa formulação para a tarifação da energia em estações de bombeamento é baseada na Resolução ANEEL 456/2000.

A Resolução ANEEL 456/2000 estabelece de forma atualizada e consolidada as condições gerais de fornecimento de energia elétrica (critérios de tarifação de consumo elétrico). A seguir algumas definições dispostas no art. 2:

- Estrutura tarifária convencional: estrutura caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano.
- Estrutura tarifária horo-sazonal: estrutura caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano, conforme especificação a seguir:
 - Tarifa Azul: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de tarifas diferenciadas de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia.
 - Tarifa Verde: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de uma única tarifa de demanda de potência.
 - Horário de ponta (P): período definido pela concessionária e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos e feriados nacionais, considerando as características do seu sistema elétrico.
 - Horário fora de ponta (F): período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta.
 - Período úmido (U): período de 5 (cinco) meses consecutivos,

compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro de um ano a abril do ano seguinte.

- Período seco (S): período de 7 (sete) meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de maio a novembro.
- Grupo “A”: grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão inferior a 2,3 kV a partir de sistema subterrâneo de distribuição e faturadas neste Grupo nos termos definidos no art. 82, caracterizado pela estruturação tarifária binômia e subdividido em subgrupos: A1, A2, A3, A3a, A4, AS.
- Grupo “B”: grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão superior a 2,3 kV e faturadas neste Grupo nos termos definidos nos arts. 79 a 81, caracterizado pela estruturação tarifária monômia e subdividido em subgrupos: B1 – residencial, B1 – residencial baixa renda, B2 – rural, B2 – cooperativa de eletrificação rural, B2 – serviço público de irrigação, B3 – demais classes, B4 – iluminação pública.

Carrijo *et al.* (2003) descrevem a forma de cobrança dos custos de energia elétrica no Estado de Goiás. A demanda máxima mensal é definida como sendo o maior valor registrado da potência exigida pelos motores do sistema elétrico. Este valor é integralizado a cada 15(quinze) minutos pelo medidor de energia e registrado o maior no mês (quando a avaliação for mensal).

Unidades com demandas maiores que 300 kW são compulsoriamente contratadas no regime de tarifas horo-sazonais (tarifas para o período seco e para o úmido / chuvoso) que consideram as tarifas no período de ponta (18 às 21h) e fora de ponta. Neste caso há dois tipos de cobrança, a azul e a verde. A verde tem tarifa de demanda única. A azul tem tarifas diferentes nos dois horários. No caso do sistema de abastecimento de água de Goiânia, a Saneamento de Goiás S.A.(SANEAGO) adota a seguinte prática: para unidades pequenas (<75kVA) que funcionam pouco, abaixo de 14h/dia, utiliza-se tarifa de baixa tensão. Para unidades que podem parar pelo menos 2(duas) horas no horário de

ponta, aplica-se a tarifa verde. Para unidades menores que 300 kW que não podem parar no horário de ponta, utiliza-se tarifa convencional (valor constante durante as 24 horas do dia). Para unidades maiores que 300 kW, que não podem parar no horário de ponta, utiliza-se tarifa azul.

O consumo de energia é o valor efetivamente medido, totalizado durante o período de faturamento, expresso em kWh. O custo diário para cada bomba de uma estação elevatória é dado pela soma do custo do fator de demanda máxima mais o custo do consumo medido.

No Estado do Rio Grande do Norte, a CAERN – Companhia de Água e Esgoto do Rio Grande do Norte é a empresa responsável pelo abastecimento de água (concessionária ou permissionária do serviço público). Em consulta realizada em 12/08/09, a CAERN divulgou os preços das tarifas que estavam em vigor, as quais são transcritas a seguir na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Tarifas associadas aos custos energéticos de bombeamento (Fonte: CAERN em 12/08/09)

Tarifa Convencional A		Consumo (R\$/kWh)		0,15
		Demanda (R\$/kW)		28,72
Tarifa Convencional B		Consumo (R\$/kWh)		0,31
Tarifa Horo-Sazonal	Verde	Consumo (R\$/kWh)	Ponta	1,06439
			FPonta	0,12705
		Demanda (R\$/kW)		9,29
	Azul	Consumo (R\$/kWh)	Ponta	0,20841
			FPonta	0,12705
		Demanda (R\$/kW)	Ponta	36,86
FPonta			9,29	

Em relação à sazonalidade, a CAERN declarou que as tarifas do período seco e chuvoso eram praticamente iguais.

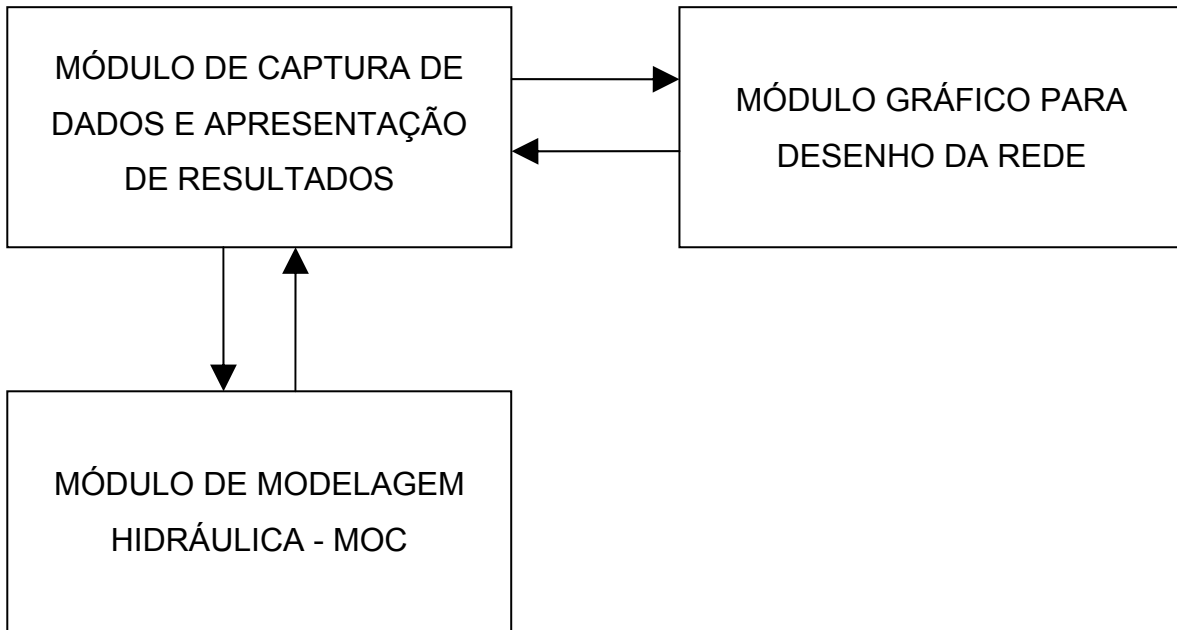
4.3. Interface Gráfica do Modelo

No presente trabalho, o modelo elaborado por Righetto (1994) foi reformulado para aceitar simulações de redes que apresentem múltiplos elementos e em configurações genéricas, tendo sido o código reescrito na linguagem de programação DELPHI. Além disso, incorporou-se uma rotina de otimização baseada em AG para minimizar os custos energéticos associados à operação de redes equipadas com EE.

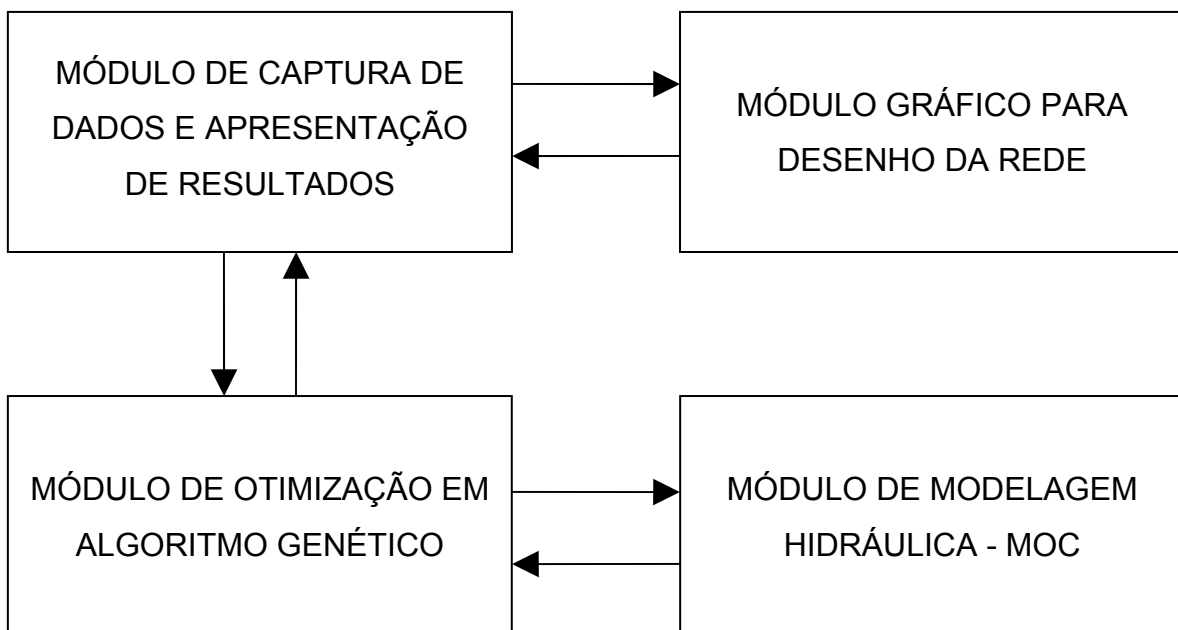
Os recursos da linguagem de programação DELPHI proporcionaram maior interatividade gráfica, permitindo a apresentação dos dados do problema e dos resultados das simulações de forma mais amigável do que o original na linguagem Fortran.

A entrada e saída de dados são realizadas a partir de arquivos em formato ASCII. A entrada de dados é parecida ao arquivo de extensão *.inp do EPANET. Além disso, desde que sejam fornecidas as coordenadas dos nós, é possível visualizar o mapa da rede.

O programa foi desenvolvido em formato modular, o que é vantajoso quando se faz necessário agregar nossas funções e ferramentas ao modelo. Um fluxograma dos módulos desenvolvidos encontra-se apresentado na Figura 4.4.



(A) INTERAÇÃO ENTRE MÓDULOS DO PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO



(B) INTERAÇÃO ENTRE MÓDULOS DO PROGRAMA PARA OTIMIZAÇÃO DA REGRA OPERACIONAL DE EEs

Figura 4.4. Fluxograma dos módulos desenvolvidos para o modelo computacional

A seguir nas Figuras 4.5 a 4.11 são apresentadas as telas que fazem parte da interface gráfica do programa desenvolvido.

No formulário principal (Figura 4.5) mostram-se os dados de entrada do MOC, na coluna da esquerda, e os resultados da simulação, na coluna da direita. Os dados são apresentados por tipo de elemento da rede (junção, RNF, EE, RNV, Tubos, Booster) em painéis distintos, que podem ser selecionados pelo usuário. Já no canto inferior esquerdo do formulário, o usuário pode selecionar qual o horário da simulação que deseja visualizar os resultados. O último painel permite visualizar um mapa da rede. Este mapa é obtido a partir de um arquivo com as coordenadas dos nós da rede e a conectividade dos trechos (*.inp) ou pode ser editado (desenhado) na própria interface (Figura 4.6).

The screenshot shows the main window of the CALHIDREDMT software. The window title is 'CALHIDREDMT' and it has a menu bar with 'Arquivo', 'Projeto', 'Resultados', 'Otimizador', 'Mapa', and 'Ajuda'. Below the menu bar is a tabbed interface with tabs for 'Dados de Junções', 'Dados de RNF', 'Dados de EE', 'Dados de RNV', 'Dados de Tubos', 'Dados de Booster', 'Dados de Válvulas', and 'Mapa'. The 'Dados de Junções' tab is active, displaying two tables: 'DADOS DE ENTRADA' and 'RESULTADOS'.

DADOS DE ENTRADA			RESULTADOS			
ID	Cota (m)	Consumo (m³/s)	ID	Carga (m)	Pressão (m)	Demanda (m³/s)
2	40	0.05	2	57.837	17.837	0.05000
3	35	0.05	3	56.403	21.403	0.05000
4	30	0.05	4	56.403	26.403	0.05000
5	35	0.05	5	55.029	20.029	0.05000

At the bottom of the window, there is a 'Passo de Tempo: 1' dropdown menu, a progress bar, and the text 'Processo de Simulação Finalizado!'.

Figura 4.5. Formulário principal indicando os dados de entrada e resultados da simulação no MOC

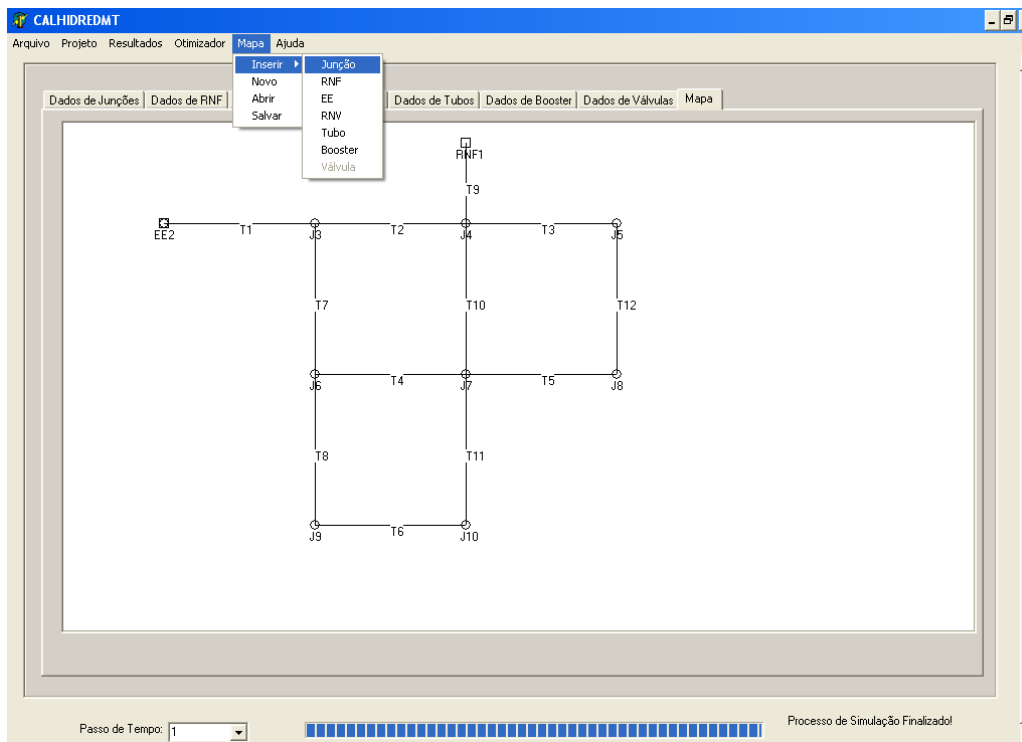


Figura 4.6. Formulário principal no painel que permite visualizar o mapa da rede

No formulário auxiliar referente aos dados de projeto (Figura 4.7), o usuário pode entrar com:

- A duração do passo de tempo da operação (normalmente é adotado o padrão horário);
- Optar se deverá ser utilizada a opção de interpolar demandas (desde um valor nulo até atingir o consumo nodal nos primeiros passos de tempo da simulação);
- O número de passos de tempo do interpolador de demanda (caso a opção esteja habilitada);
- A fórmula de perda de carga (na versão corrente só foi implantada a opção de Darcy-Weissbach);
- O valor da viscosidade cinemática do fluido;
- Optar se deverá ser gerado o arquivo com dados sobre o processo de convergência do MOC;

Dados do Projeto

Passo de Tempo da Operação da Rede (s): 3600

Utilizar opção de interpolar demanda

Nº de Passos de Tempo do Interpolador de Demandas: 100

Fórmula da Perda de Carga: D-W

Viscosidade Cinemática (m²/s): 0.000001007

Gerar arquivo com detalhes do processo de convergência numérica da simulação

OK

Figura 4.7. Formulário auxiliar referente aos dados do projeto

No formulário auxiliar referente aos padrões de demanda (Figura 4.8), o usuário pode visualizar os fatores multiplicadores que serão aplicados ao valor da demanda nodal em cada horário da simulação (normalmente a simulação utiliza como padrão uma duração de 24 horas).

No formulário auxiliar referente ao controle das bombas (Figura 4.9), o usuário pode visualizar o tipo de controle (em função de nível da água de tanque/RNV ou pré-determinado em função do horário de simulação), e as informações associadas ao controle (tipo de controle, ID da bomba, ID do RNV, nível para ligar a bomba, nível para desligar a bomba, horário para ligar a bomba, horário para desligar a bomba).

The screenshot shows a window titled "Padrões de Demanda" with a sub-header "Multiplicadores da Demanda". It contains a table with two columns: "Passo de Tempo" and "Fator Multiplicador". The table lists 12 steps with their respective multiplier values.

Passo de Tempo	Fator Multiplicador
Passo 1	0.7
Passo 2	0.6
Passo 3	0.6
Passo 4	0.7
Passo 5	0.9
Passo 6	1
Passo 7	1.3
Passo 8	1.2
Passo 9	1.1
Passo 10	1
Passo 11	1.1
Passo 12	1.2

Figura 4.8. Formulário auxiliar para visualizar os padrões de demanda da simulação

The screenshot shows a window titled "Controles" with a sub-header "Especificações dos controles das Estações Elevatórias e Booster". It contains a table with five columns: "ID", "Tipo", "ID RNV", "Nível Liga (m)", and "Nível Desliga (m)". The table has one data row and a large empty space below it.

ID	Tipo	ID RNV	Nível Liga (m)	Nível Desliga (m)
1	1	2	34	42.5

Figura 4.9. Formulário auxiliar para visualizar o controle das bombas

No formulário auxiliar referente ao otimizador em AG (Figura 4.10), o usuário poderá entrar com os seguintes dados:

- Tamanho da população do AG;
- Taxa de mutação do AG;
- Número de gerações do AG, usado como critério de parada
- Dados de restrição operacional:
 - Pressão máxima admissível;
 - Pressão mínima admissível;
 - Penalidade por violação de pressão admissível;
 - Penalidade por violação de nível do RNV (o nível máximo e mínimo do RNV é fornecido no arquivo de entrada, *.inp);
 - Penalidade por manobra de acionamento de bomba;
- Dados sobre os custos energéticos:
 - Tarifa de consumo no horário de ponta;
 - Tarifa de consumo fora do horário de ponta;
 - Tarifa de demanda no horário de ponta;
 - Tarifa de demanda fora do horário de ponta;

Módulo de Otimização de Operação de Redes de Abastecimento

Parâmetros do Algoritmo Genético

Tamanho da população inicial do AG:

Taxa de mutação do AG:

Critério de parada - Número de gerações:

Restrições Operacionais

	Mínima	Máxima
Pressão admissível (mca):	<input type="text" value="5.0"/>	<input type="text" value="100.0"/>
Velocidade admissível (m/s):	<input type="text" value="-3.0"/>	<input type="text" value="3.0"/>

Penalidade por:

Violação de pressão admissível (R\$):

Violação de nível de RNV (R\$):

Violação de velocidade admissível (R\$):

Manobra liga/desliga em EE (R\$):

Dados dos Custos Energéticos

Consumo (R\$/kWh):		Demanda (R\$/kW):	
Tarifa de Ponta	Tarifa Fora de Ponta	Tarifa de Ponta	Tarifa Fora de Ponta
<input type="text" value="0.20841"/>	<input type="text" value="0.12705"/>	<input type="text" value="36.86"/>	<input type="text" value="9.29"/>

Rendimento das EEs:

OK

Figura 4.10. Formulário auxiliar para entrada de dados da otimização em AG

Os resultados dos custos energéticos associados à solução otimizada de operação da rede encontrada pelo AG podem ser visualizados em um formulário específico, mostrado a seguir na Figura 4.11.

Form8-FO

Passo de Tempo:

Custo do Passo de Tempo (R\$): 31.23

Custo do Total (R\$): 3048.76

Figura 4.11. Formulário auxiliar para mostrar os resultados da otimização em AG

5. ESTUDOS DE CASO PARA VERIFICAÇÃO/VALIDAÇÃO DO MODELO

Com o intuito de verificar o desempenho do modelo baseado no MOC, foram realizadas simulações hidráulicas em redes de abastecimento de água com diferentes configurações e, em seguida, os resultados obtidos foram confrontados com simulações realizadas no EPANET.

Destaca-se que o EPANET é simulador hidráulico que utiliza o Método Gradiente para solucionar problemas de redes de abastecimento pressurizadas em período estendido, no regime permanente.

Os exemplos simulados incluíram a modelagem de:

- Reservatório de Nível Fixo (RNF);
- Estação Elevatória (EE);
- Booster;
- Reservatório de Nível Variável (RNV).

Deve-se frisar que, nos itens 5.1 a 5.4 deste capítulo, utilizaram-se sistemas simples e fictícios, equipados com somente um ou dois tipos de elemento (RNF, EE, booster, RNV), de modo que as análises sobre a sensibilidade da convergência do MOC considerassem somente o efeito isolado de cada um desses elementos na rede, contendo o mínimo de interferência de fatores de terceiros.

Todavia, nos itens 5.5 e 5.6, foram realizadas análises para casos reais, enquanto no item 5.7 considerou-se, para a aplicação do modelo de otimização, uma rede mais complexa (2 RNVs e 2 EEs), de modo a não limitar as análises do presente estudo meramente a casos simplificados e fictícios.

5.1. Modelagem de RNF

Para modelar o RNF, foi estabelecida uma rede simples, composta de 4 pontos de consumo/demanda, 5 tubulações e 1 RNF. A simulação foi estática. A Figura 5.1 apresenta a configuração da rede.

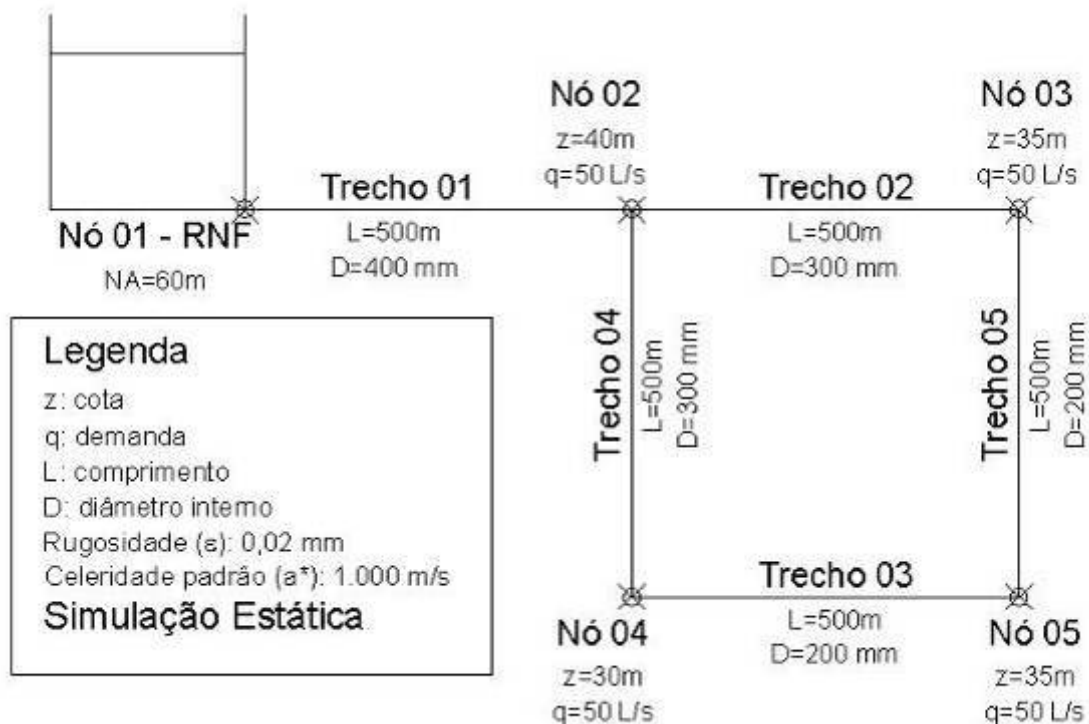


Figura 5.1. Configuração da rede para modelagem de RNF

A mesma rede foi simulada no EPANET. Comparações entre os resultados obtidos das simulações no MOC e no EPANET foram realizadas. Verificou-se compatibilidade satisfatória entre os resultados obtidos, erro relativo máximo para as pressões inferiores a 0,1%, e para vazões não houve diferença, conforme é ilustrado a seguir na Tabela 5.1.

Destaca-se que na rede simulada o Δt adotado foi de 0,5 s. Já as celeridades de cálculo (a) dos trechos foram de 1.000 m/s, valores iguais à celeridade padrão (a^*), pois todos os trechos têm comprimentos iguais.

Tabela 5.1. Comparação MOC e EPANET para RNF

NÓ	PRESSÃO (mca)		
	EPANET	MOC	ERRO
1	0,00	0,0000	0,00%
2	17,83	17,8366	0,04%
3	21,4	21,4030	0,01%
4	26,4	26,4030	0,01%
5	20,02	20,0292	0,05%
TRECHOS	VAZÃO (L/s)		
	EPANET	MOC	ERRO
1	200,00	200,00	0,00%
2	75,00	75,00	0,00%
3	25,00	25,00	0,00%
4	75,00	75,00	0,00%
5	25,00	25,00	0,00%

Em relação ao cálculo hidráulico, a rede é iniciada com a condição de contorno hidrostática, ou seja, todos os pontos da rede apresentam a mesma cota piezométrica do reservatório de nível constante e as vazões da rede são nulas. Iniciada a simulação, são introduzidas as demandas nodais.

Assim, é gerado um fluxo regido pelas equações do MOC, que faz a transição do estado inicial para um estado final, provocando oscilações fictícias dos valores de vazão e pressão para, finalmente, convergir ao valor associado ao regime permanente.

Para verificar aspectos sobre a convergência do MOC, foi simulada a mesma rede considerando algumas alterações, a saber:

- Modificação 01: considerou-se celeridade padrão de 500 m/s na simulação, e as demais variáveis foram mantidas iguais ao exemplo original;
- Modificação 02: considerou-se celeridade padrão de 1.500 m/s, e as demais variáveis foram mantidas iguais ao exemplo original;

Os resultados são apresentados na Figura 5.2.

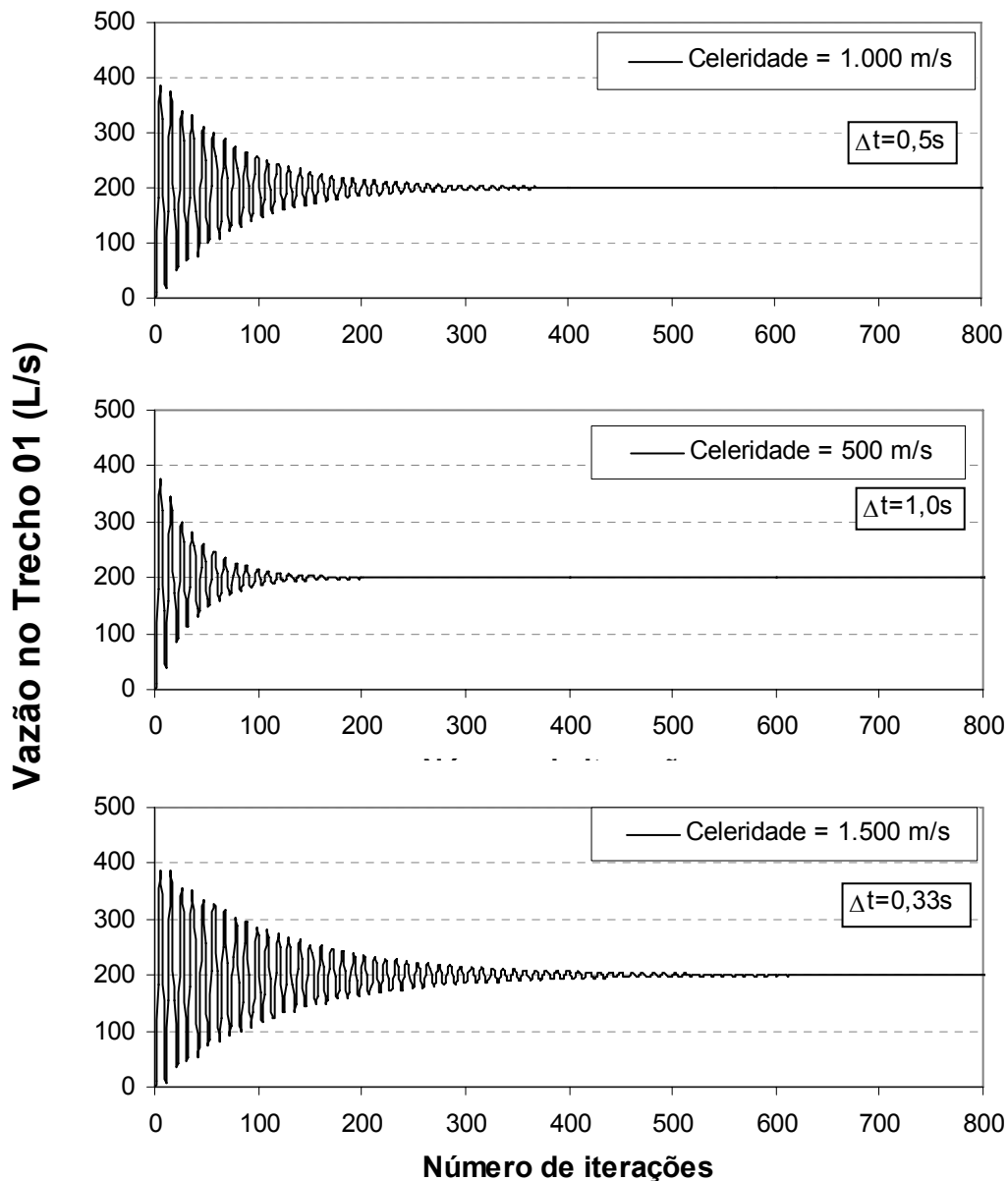


Figura 5.2. Resultados das simulações considerando diferentes celeridades (1.000 m/s, 500 m/s e 1.500 m/s)

Observou-se que nas simulações com diferentes celeridades, os valores finais de pressão e vazão foram todos iguais, ou seja, os mesmos apresentados na Tabela 5.1. Além disso, verificou-se que o MOC convergiu com menor esforço computacional (menor número de iterações), à medida que a celeridade padrão foi reduzida, pois isso resulta em um incremento do Δt .

Obviamente que chegará um momento em que a redução da celeridade padrão tornará o cálculo numérico instável e o modelo não poderá convergir. Esse valor depende

de aspectos da rede modelada. Prosseguiu-se assim tomando valores de celeridade sucessivamente menores a fim de averiguar como seria o comportamento do MOC, considerando o exemplo que envolve o RNF.

Para valores da celeridade padrão de 25 m/s e de 20 m/s, os resultados finais de pressão e vazão foram os mesmos do exemplo original, mas para o valor de 15 m/s, o erro relativo cresceu subitamente, chegando a um máximo de cerca de 4% para as pressões e de 16% para as vazões (Tabela 5.2).

Os resultados do processo de convergência são apresentados na Figura 5.3. É possível verificar que quando a celeridade padrão adotada foi de 25 m/s obteve-se convergência mais rápida do que para o valor de 20 m/s, o que demonstra que para tais valores o incremento do Δt já não resulta em redução do esforço computacional. Já no caso da celeridade padrão de 15 m/s, o MOC não mais convergiu para o valor correto da vazão no Trecho 01.

Tabela 5.2. Comparação MOC e EPANET para RNF considerando diferentes valores de celeridade

NÓ	PRESSÃO (mca)						
	EPANET	MOC celeridade 25m/s	ERRO	MOC celeridade 20m/s	ERRO	MOC celeridade 15m/s	ERRO
1	0	0,0000	0,00%	0,0000	0,00%	0,0000	0,00%
2	17,83	17,8366	0,04%	17,8366	0,04%	18,1033	1,51%
3	21,4	21,4030	0,01%	21,4030	0,01%	21,9006	2,29%
4	26,4	26,4030	0,01%	26,4030	0,01%	26,9006	1,86%
5	20,02	20,0292	0,05%	20,0292	0,05%	20,8233	3,86%
TRECHOS	VAZÃO (L/s)						
	EPANET	MOC celeridade 25m/s	ERRO	MOC celeridade 20m/s	ERRO	MOC celeridade 15m/s	ERRO
1	200,00	200,00	0,00%	200,00	0,00%	186,40	-7,30%
2	75,00	75,00	0,00%	75,00	0,00%	68,20	-9,97%
3	25,00	25,00	0,00%	25,00	0,00%	21,60	-15,74%
4	75,00	75,00	0,00%	75,00	0,00%	68,20	-9,97%
5	25,00	25,00	0,00%	25,00	0,00%	21,60	-15,74%

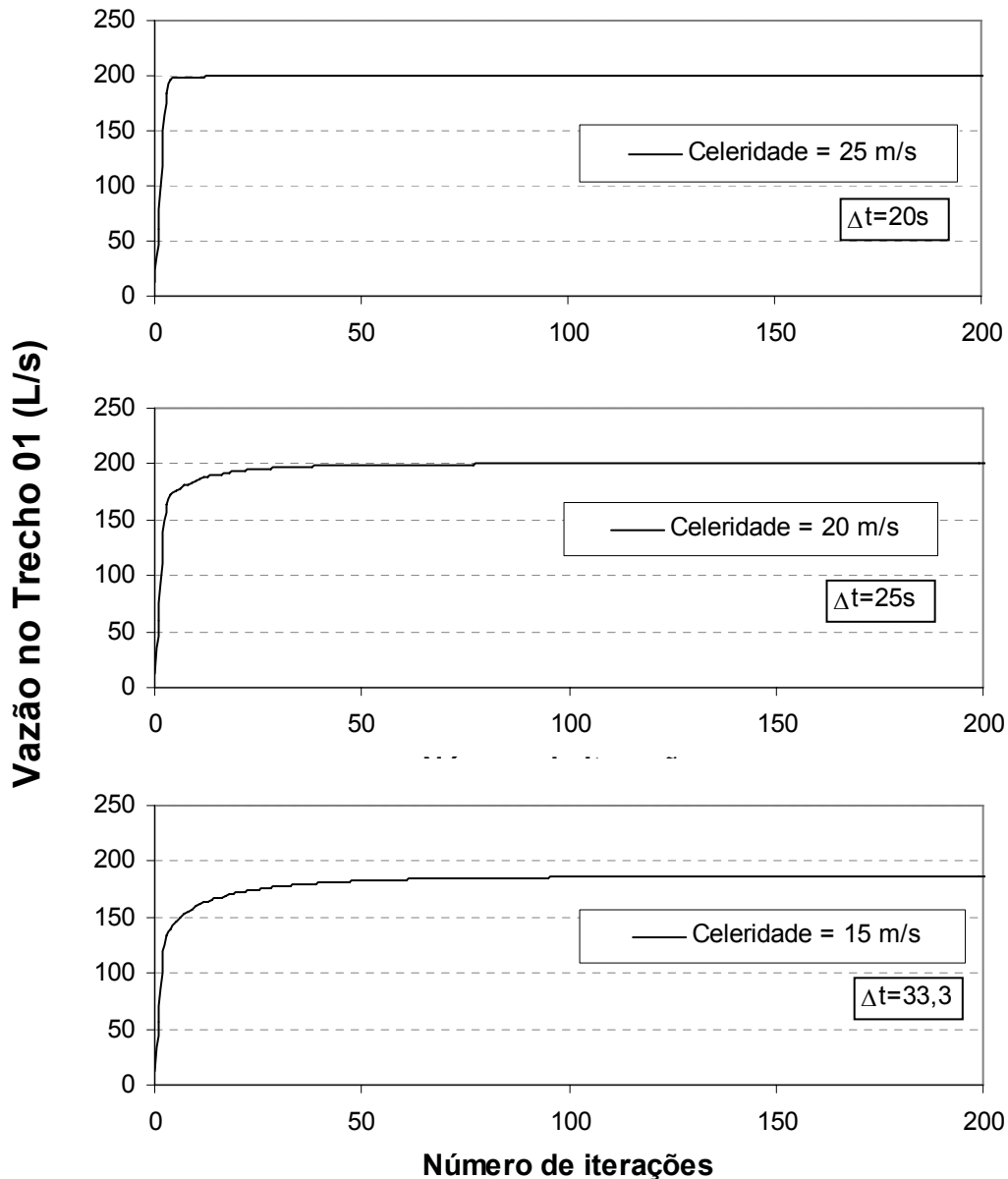


Figura 5.3. Resultados das simulações considerando diferentes celeridades (25 m/s, 20 m/s e 15m/s)

Em seguida, procurou-se verificar qual o impacto na convergência do modelo, em outra situação:

- Modificação 03: O modelo considera que o consumo, nos passos de tempo iniciais, varia gradualmente de um valor nulo até atingir o valor das demandas nodais, por meio de interpolação (foi considerado que esta interpolação deveria se dar nas 100 primeiras iterações). Neste caso manteve-se a celeridade padrão em 1.000 m/s. Destaca-se que no exemplo original, já no primeiro passo

de cálculo hidráulico, o modelo considerava o consumo nodal igual ao da demanda;

Deve-se frisar que essa situação (Modificação 03) é uma idéia proposta por Righetto (1994), como uma forma de melhorar o desempenho da convergência do MOC. Uma forma de compreender melhor essa técnica é através de analogia. Pode-se imaginar uma rede em que os pontos de consumo fossem torneiras. Essas torneiras seriam abertas lentamente até atingir a demanda final do sistema. Desta forma, no cálculo numérico do problema, as mudanças de vazões nodais (perturbações aos sistema) ocorreriam de maneira suave e o processo de convergência apresentaria pequenas oscilações. Já no caso do exemplo original, as torneiras seriam abertas bruscamente já no início, causando fortes oscilações no processo de convergência.

Os resultados são apresentados na Figura 5.4. Esta demonstra que, ao se considerar os valores do consumo dos nós variando gradualmente, é possível tornar mais rápida a convergência do modelo.

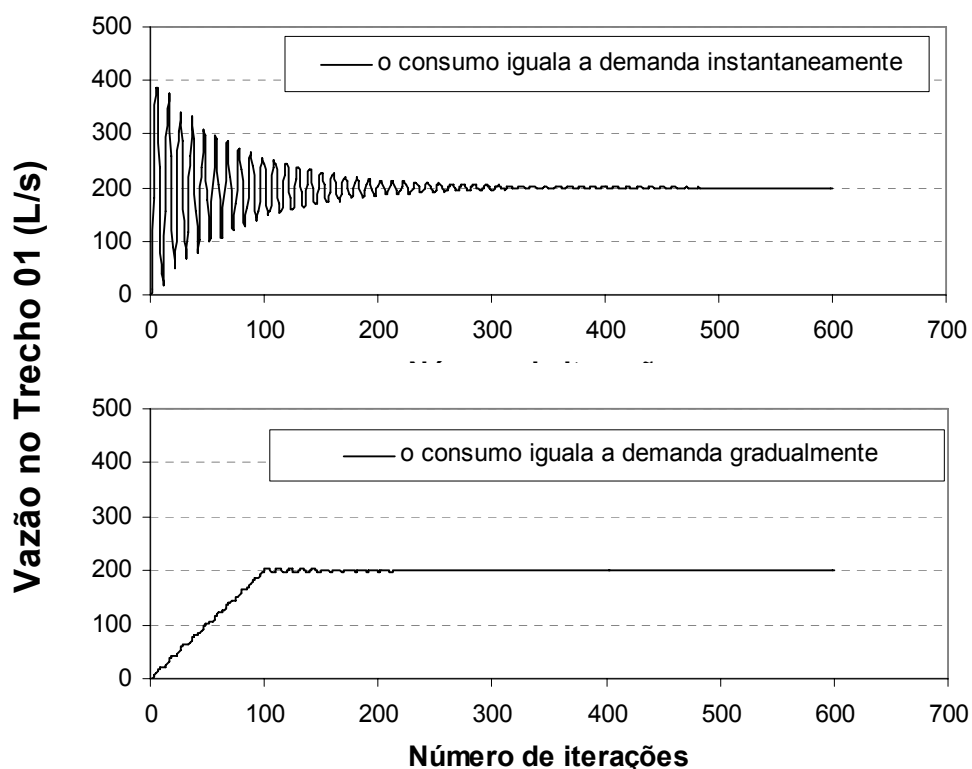


Figura 5.4. Resultados das simulações considerando variação gradual do consumo nodais

Outro aspecto analisado foi a constatação de Luvizotto Jr (1995). Este autor mostrou que para trechos com comprimentos considerados pequenos em relação aos outros da rede, pode haver problemas de convergência. Assim, considerou-se uma nova alteração:

- Modificação 04: para o Trecho 01 da rede, o comprimento passou a ser de 50 m, para os Trechos 02 e 03 de 725 m e para os Trechos 04 e 05 o comprimento foi alterado para 500 m. No exemplo original todos os trechos apresentavam 500 m de comprimento.

Foi verificado que ao final das simulações, os resultados do EPANET e do MOC foram similares, conforme apresenta a Tabela 5.3. O erro relativo máximo foi de 0,03% para a pressão, e para a vazão os valores foram iguais.

Em relação ao processo de convergência (Figura 5.5), observa-se que, no caso da rede de tubos com comprimento variável, o gráfico tem menor simetria. Os resultados são mostrados na Figura 5.5. Neste caso, o passo de tempo foi de 0,5 s, a celeridade de cálculo (a) foi de 100 m/s para o Trecho 01, de 1450 m/s para os Trechos 02 e 03 e de 1.000 m/s para Trechos 04 e 05.

Tabela 5.3. Comparação MOC e EPANET para RNF, com variação no comprimento

NÓ	PRESSÃO (mca)		
	EPANET	MOC	ERRO
1	0,00	0,00	0,00%
2	19,78	19,7837	0,02%
3	22,71	22,7091	0,00%
4	28,34	28,3473	0,03%
5	21,34	21,3434	0,02%
TRECHOS	VAZÃO (L/s)		
	EPANET	MOC	ERRO
1	200,00	200,00	0,00%
2	74,92	74,92	0,00%
3	25,08	25,08	0,00%
4	75,08	75,08	0,00%
5	24,92	24,92	0,00%

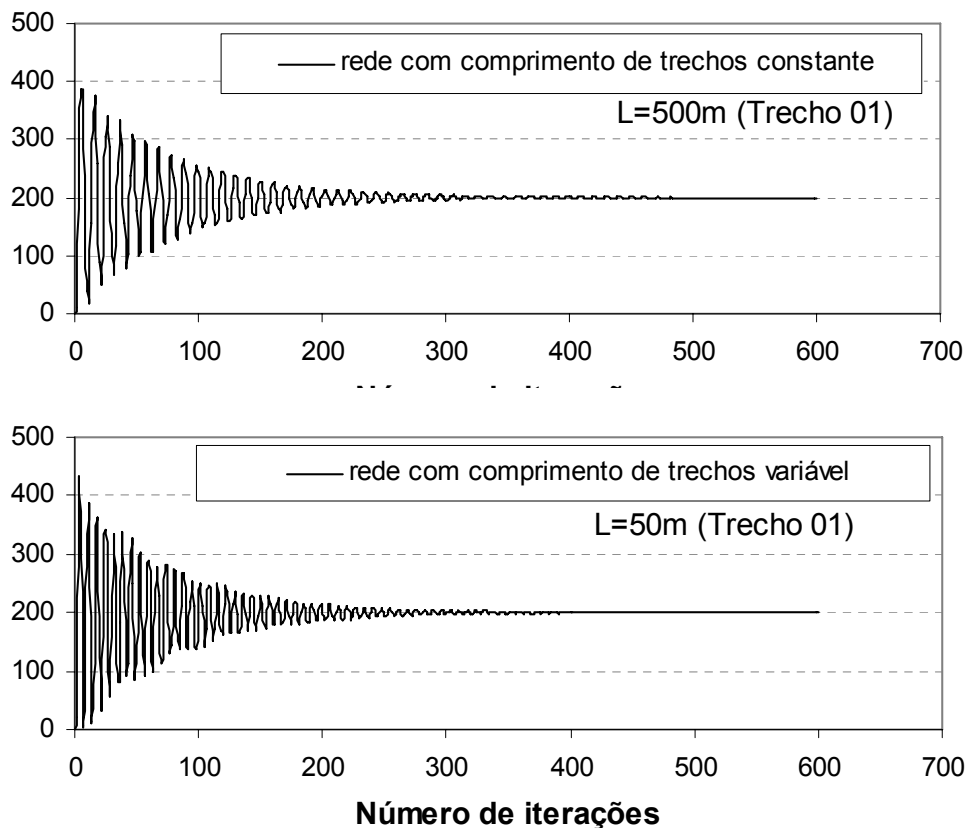


Figura 5.5. Resultados de simulações considerando variação dos comprimentos dos trechos

Assim, constata-se que a heterogeneidade dos comprimentos das tubulações impacta o processo de convergência numérica do MOC. Deste modo, alerta-se para a necessidade de maiores investigações, a fim de verificar se esse fato, quando da consideração de redes reais de topologia complexa e composta por trechos de comprimentos diferenciados, pode afetar o processo de convergência ao ponto de comprometer a solução final. Esta discussão será retomada posteriormente na modelagem de um caso real de rede de abastecimento (item 5.5).

Em relação ao tempo de processamento gasto para as simulações dos exemplos da modelagem de RNF, constatou-se que tanto o MOC como o EPANET consumiram menos de 1 s. O computador usado era equipado com processador Intel Core 2 Duo, 2,40 GHz, 3,11 GB de RAM.

Deve-se frisar que nas comparações entre o tempo de processamento no EPANET e no MOC, é necessário levar em conta que o primeiro utiliza como critério de parada a convergência dos valores de pressão e vazão em nós e trechos da rede, enquanto o MOC considera o tempo total de simulação.

O EPANET é um modelo especialista e concebido para otimizar o número de iterações em função da convergência para uma solução final no regime permanente, o que traz uma vantagem em termos de tempo de processamento nestes casos. Já o MOC pseudo-transiente foi desenvolvido visando aplicação em operação de redes equipadas com RNV, onde não existe a estabilização de valores de pressão e vazão ao longo do tempo. Este processo representa de uma maneira mais fidedigna a dinâmica do comportamento hidráulico em redes reais de abastecimento, sujeitas a variações de demanda ao longo do tempo, assim como dos níveis dos tanques de armazenamento e das regras operacionais de bombeio no sistema.

5.2. Modelagem de EE

Trata-se de uma rede composta de 8 pontos de consumo, 12 tubulações, 1 RNF e 1 EE. A simulação abrange uma duração de 24 horas (período estendido). Os valores de demanda nodais são variáveis ao longo da simulação, ou seja, a cada hora o consumo-base é multiplicado por um fator (o passo de tempo entre sucessivos valores é horário e os fatores multiplicadores estão apresentados na Figura 5.6).

Além disso, foi imposta à EE uma regra operacional para que estivesse ligada nas primeiras 12 horas de simulação, desligada entre as 12:01 horas e 18 horas, e reacionada nas horas restantes (entre 18:01 horas e 24 horas), com intuito de testar a capacidade do modelo na utilização de regras operacionais. Outros dados da rede e a sua configuração encontram-se na Figura 5.6.

A mesma rede foi simulada no EPANET. Verificou-se compatibilidade satisfatória para os resultados obtidos entre os dois modelos, sendo que os erros relativos máximos foram de +0,22% e -0,25% para as vazões e de +0,09% e -0,02% para as pressões, considerando todos os nós, trechos e horários da simulação. Os resultados de vazão e pressão para as 24 horas de simulação são apresentados na Tabelas 5.4 e 5.5 respectivamente.

Padrões de Demanda

Hora:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Padrão:	0,7	0,6	0,6	0,7	0,9	1,0	1,3	1,2	1,1	1,0	1,1	1,2
Hora:	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Padrão:	1,2	1,1	1,1	1,0	1,1	1,2	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,8

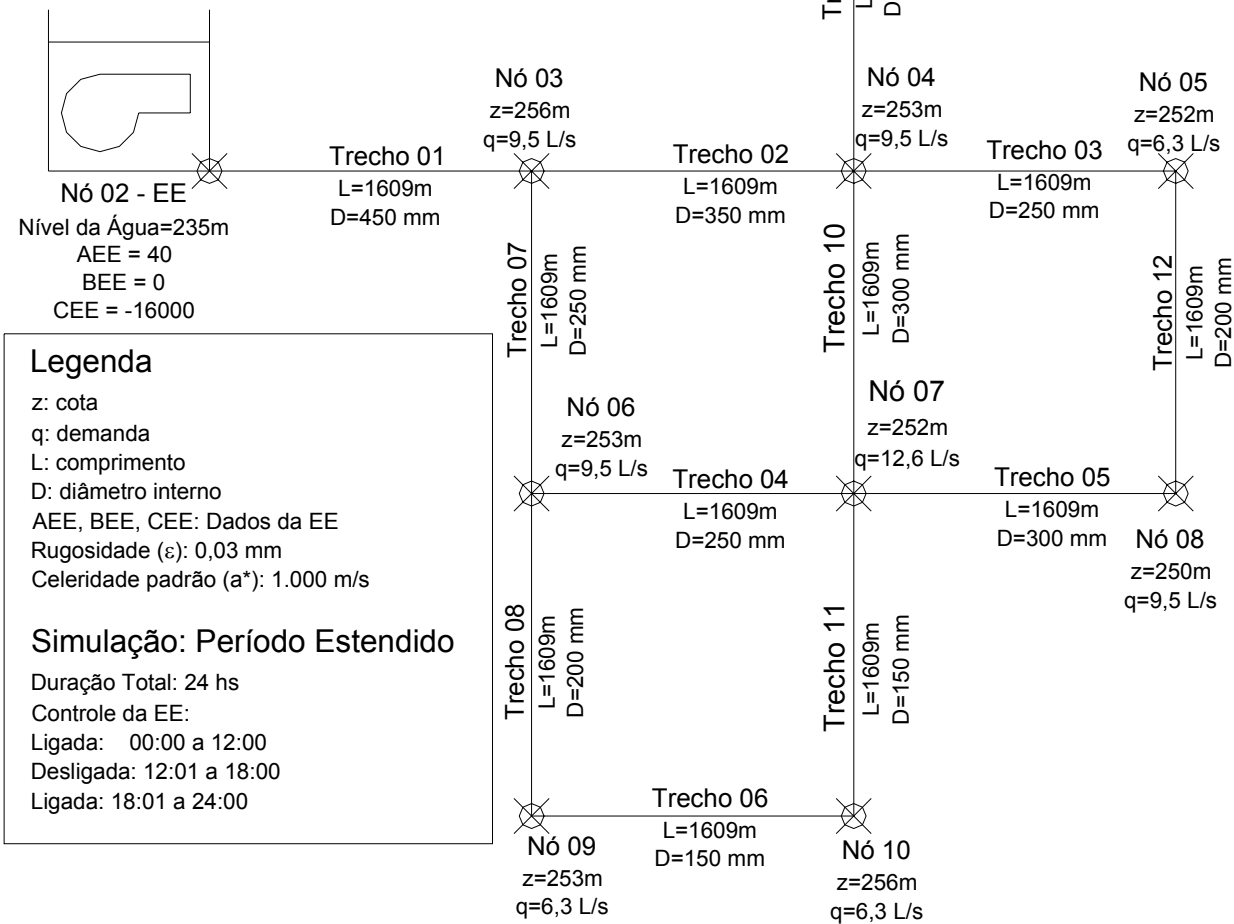


Figura 5.6. Configuração da rede para modelagem de EE

Tabela 5.4. Resultados de pressão do MOC e do EPANET na modelagem da EE

Pressão (mca) - MOC										
Hora	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9	Nó 10
1	0,00	34,92	13,87	16,87	17,68	16,55	17,57	19,55	16,24	13,15
2	0,00	34,97	13,92	16,92	17,77	16,68	17,69	19,68	16,44	13,37
3	0,00	34,97	13,92	16,92	17,77	16,68	17,69	19,68	16,44	13,37
4	0,00	34,92	13,87	16,87	17,68	16,55	17,57	19,55	16,24	13,15
5	0,00	34,79	13,74	16,75	17,45	16,24	17,27	19,24	15,76	12,61
6	0,00	34,70	13,65	16,68	17,31	16,06	17,09	19,06	15,47	12,30
7	0,00	34,37	13,32	16,41	16,81	15,39	16,44	18,40	14,45	11,18
8	0,00	34,49	13,44	16,50	16,99	15,63	16,68	18,64	14,82	11,58
9	0,00	34,60	13,55	16,59	17,16	15,85	16,89	18,86	15,16	11,96
10	0,00	34,70	13,65	16,68	17,31	16,06	17,09	19,06	15,47	12,30
11	0,00	34,60	13,55	16,59	17,16	15,85	16,89	18,86	15,16	11,96
12	0,00	34,49	13,44	16,50	16,99	15,63	16,68	18,64	14,82	11,58
13	0,00	33,87	12,87	16,21	16,67	15,21	16,31	18,27	14,41	11,19
14	0,00	34,03	13,03	16,33	16,87	15,47	16,56	18,53	14,79	11,60
15	0,00	34,03	13,03	16,33	16,87	15,47	16,56	18,53	14,79	11,60
16	0,00	34,19	13,19	16,44	17,05	15,72	16,79	18,76	15,14	11,98
17	0,00	34,03	13,03	16,33	16,87	15,47	16,56	18,53	14,79	11,60
18	0,00	33,87	12,87	16,21	16,67	15,21	16,31	18,27	14,41	11,19
19	0,00	34,49	13,44	16,50	16,99	15,63	16,68	18,64	14,82	11,58
20	0,00	34,60	13,55	16,59	17,16	15,85	16,89	18,86	15,16	11,96
21	0,00	34,70	13,65	16,68	17,31	16,06	17,09	19,06	15,47	12,30
22	0,00	34,79	13,74	16,75	17,45	16,24	17,27	19,24	15,76	12,61
23	0,00	34,86	13,81	16,82	17,57	16,41	17,43	19,41	16,01	12,90
24	0,00	34,86	13,81	16,82	17,57	16,41	17,43	19,41	16,01	12,90

Pressão (mca) - EPANET										
Hora	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9	Nó 10
1	0,00	34,92	13,87	16,87	17,68	16,55	17,56	19,55	16,24	13,15
2	0,00	34,97	13,92	16,92	17,77	16,68	17,69	19,68	16,44	13,37
3	0,00	34,97	13,92	16,92	17,77	16,68	17,69	19,68	16,44	13,37
4	0,00	34,92	13,87	16,87	17,68	16,55	17,56	19,55	16,24	13,15
5	0,00	34,79	13,74	16,75	17,45	16,24	17,26	19,24	15,75	12,61
6	0,00	34,70	13,65	16,68	17,31	16,06	17,09	19,06	15,47	12,30
7	0,00	34,37	13,32	16,40	16,81	15,39	16,44	18,40	14,44	11,17
8	0,00	34,49	13,44	16,50	16,99	15,63	16,67	18,64	14,81	11,58
9	0,00	34,60	13,55	16,59	17,16	15,85	16,89	18,86	15,15	11,95
10	0,00	34,70	13,65	16,68	17,31	16,06	17,09	19,06	15,47	12,30
11	0,00	34,60	13,55	16,59	17,16	15,85	16,89	18,86	15,15	11,95
12	0,00	34,49	13,44	16,50	16,99	15,63	16,67	18,64	14,81	11,58
13	0,00	33,87	12,87	16,21	16,67	15,21	16,30	18,27	14,40	11,18
14	0,00	34,03	13,03	16,33	16,87	15,47	16,55	18,52	14,78	11,59
15	0,00	34,03	13,03	16,33	16,87	15,47	16,55	18,52	14,78	11,59
16	0,00	34,19	13,19	16,44	17,05	15,71	16,78	18,76	15,13	11,97
17	0,00	34,03	13,03	16,33	16,87	15,47	16,55	18,52	14,78	11,59
18	0,00	33,87	12,87	16,21	16,67	15,21	16,30	18,27	14,40	11,18
19	0,00	34,49	13,44	16,50	16,99	15,63	16,67	18,64	14,81	11,58
20	0,00	34,60	13,55	16,59	17,16	15,85	16,89	18,86	15,15	11,95
21	0,00	34,70	13,65	16,68	17,31	16,06	17,09	19,06	15,47	12,30
22	0,00	34,79	13,74	16,75	17,45	16,24	17,26	19,24	15,75	12,61
23	0,00	34,86	13,81	16,81	17,57	16,41	17,42	19,40	16,01	12,90
24	0,00	34,86	13,81	16,81	17,57	16,41	17,42	19,40	16,01	12,90

ERRO RELATIVO										
Hora	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9	Nó 10
1	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,03%	0,00%	0,01%	0,00%
2	0,00%	0,01%	0,03%	-0,01%	0,03%	-0,01%	-0,01%	-0,02%	0,01%	0,01%
3	0,00%	0,01%	0,03%	-0,01%	0,03%	-0,01%	-0,01%	-0,02%	0,01%	0,01%
4	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,03%	0,00%	0,01%	0,00%
5	0,00%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,02%	0,04%	0,01%	0,04%	0,04%
6	0,00%	0,00%	0,01%	-0,02%	0,01%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
7	0,00%	0,00%	-0,02%	0,03%	0,02%	0,01%	0,03%	0,00%	0,06%	0,09%
8	0,00%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,04%	-0,01%	0,04%	0,03%
9	0,00%	0,01%	0,02%	0,03%	0,00%	0,03%	0,01%	-0,01%	0,05%	0,06%
10	0,00%	0,00%	0,01%	-0,02%	0,01%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
11	0,00%	0,01%	0,02%	0,03%	0,00%	0,03%	0,01%	-0,01%	0,05%	0,06%
12	0,00%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,04%	-0,01%	0,04%	0,03%
13	0,00%	-0,01%	-0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,04%	0,02%	0,05%	0,06%
14	0,00%	0,01%	0,04%	0,00%	-0,01%	0,03%	0,03%	0,04%	0,04%	0,06%
15	0,00%	0,01%	0,04%	0,00%	-0,01%	0,03%	0,03%	0,04%	0,04%	0,06%
16	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,02%	0,00%	0,05%	0,03%	0,01%	0,05%	0,06%
17	0,00%	0,01%	0,04%	0,00%	-0,01%	0,03%	0,03%	0,04%	0,04%	0,06%
18	0,00%	-0,01%	-0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,04%	0,02%	0,05%	0,06%
19	0,00%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,04%	-0,01%	0,04%	0,03%
20	0,00%	0,01%	0,02%	0,03%	0,00%	0,03%	0,01%	-0,01%	0,05%	0,06%
21	0,00%	0,00%	0,01%	-0,02%	0,01%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,00%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,02%	0,04%	0,01%	0,04%	0,04%
23	0,00%	0,00%	0,02%	0,03%	0,02%	-0,01%	0,03%	0,03%	0,02%	-0,02%
24	0,00%	0,00%	0,02%	0,03%	0,02%	-0,01%	0,03%	0,03%	0,02%	-0,02%

Tabela 5.5. Resultados de vazão do MOC e do EPANET na modelagem da EE

Vazão (L/s) - MOC												
Hora	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7	Trecho 8	Trecho 9	Trecho 10	Trecho 11	Trecho 12
1	17,82	0,58	7,92	-1,78	3,14	1,31	10,59	5,72	30,83	16,84	3,10	3,51
2	17,73	2,87	6,77	-1,45	2,71	1,12	9,15	4,90	23,97	14,38	2,66	2,99
3	17,73	2,87	6,77	-1,45	2,71	1,12	9,15	4,90	23,97	14,38	2,66	2,99
4	17,82	0,58	7,92	-1,78	3,14	1,31	10,59	5,72	30,83	16,84	3,10	3,51
5	18,05	-4,01	10,23	-2,39	3,99	1,68	13,51	7,35	44,50	21,71	3,99	4,56
6	18,20	-6,22	11,39	-2,74	4,41	1,87	14,92	8,17	51,30	24,19	4,43	5,09
7	18,76	-12,68	14,90	-3,87	5,64	2,42	19,09	10,61	71,59	31,66	5,77	6,71
8	18,55	-10,56	13,73	-3,49	5,23	2,23	17,71	9,79	64,85	29,17	5,33	6,17
9	18,37	-8,40	12,56	-3,11	4,82	2,05	16,32	8,98	58,08	26,67	4,88	5,63
10	18,20	-6,22	11,39	-2,74	4,41	1,87	14,92	8,17	51,30	24,19	4,43	5,09
11	18,37	-8,40	12,56	-3,11	4,82	2,05	16,32	8,98	58,08	26,67	4,88	5,63
12	18,55	-10,56	13,73	-3,49	5,23	2,23	17,71	9,79	64,85	29,17	5,33	6,17
13	0,00	-27,18	14,15	-5,34	4,81	2,16	15,78	9,72	83,40	30,67	5,40	6,59
14	0,00	-24,91	12,97	-4,90	4,41	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,04
15	0,00	-24,91	12,97	-4,90	4,41	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,04
16	0,00	-22,65	11,78	-4,45	4,02	1,80	13,15	8,10	69,50	25,57	4,50	5,48
17	0,00	-24,91	12,97	-4,90	4,41	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,04
18	0,00	-27,18	14,15	-5,34	4,81	2,16	15,78	9,72	83,40	30,67	5,40	6,59
19	18,55	-10,56	13,73	-3,49	5,23	2,23	17,71	9,79	64,85	29,17	5,33	6,17
20	18,37	-8,40	12,56	-3,11	4,82	2,05	16,32	8,98	58,08	26,67	4,88	5,63
21	18,20	-6,22	11,39	-2,74	4,41	1,87	14,92	8,17	51,30	24,19	4,43	5,09
22	18,05	-4,01	10,23	-2,39	3,99	1,68	13,51	7,35	44,50	21,71	3,99	4,56
23	17,92	-1,75	9,07	-2,06	3,57	1,50	12,07	6,54	37,68	19,26	3,54	4,03
24	17,92	-1,75	9,07	-2,06	3,57	1,50	12,07	6,54	37,68	19,26	3,54	4,03
Vazão (L/s) - EPANET												
Hora	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7	Trecho 8	Trecho 9	Trecho 10	Trecho 11	Trecho 12
1	17,82	0,58	7,92	-1,78	3,14	1,31	10,59	5,72	30,83	16,84	3,10	3,51
2	17,73	2,87	6,77	-1,45	2,71	1,12	9,15	4,90	23,97	14,38	2,66	2,99
3	17,73	2,87	6,77	-1,45	2,71	1,12	9,15	4,90	23,97	14,38	2,66	2,99
4	17,82	0,58	7,92	-1,78	3,14	1,31	10,59	5,72	30,83	16,84	3,10	3,51
5	18,05	-4,01	10,22	-2,39	4,00	1,68	13,51	7,35	44,50	21,72	3,99	4,55
6	18,20	-6,22	11,39	-2,74	4,41	1,87	14,92	8,17	51,30	24,19	4,43	5,09
7	18,76	-12,68	14,90	-3,87	5,64	2,42	19,09	10,61	71,59	31,66	5,77	6,71
8	18,55	-10,55	13,73	-3,49	5,23	2,23	17,71	9,79	64,85	29,17	5,33	6,17
9	18,37	-8,40	12,56	-3,11	4,82	2,05	16,32	8,98	58,08	26,67	4,88	5,63
10	18,20	-6,22	11,39	-2,74	4,41	1,87	14,92	8,17	51,30	24,19	4,43	5,09
11	18,37	-8,40	12,55	-3,11	4,83	2,05	16,32	8,98	58,08	26,68	4,88	5,62
12	18,56	-10,55	13,72	-3,49	5,24	2,23	17,71	9,79	64,84	29,17	5,33	6,16
13	0,00	-27,18	14,15	-5,34	4,81	2,16	15,78	9,72	83,40	30,67	5,40	6,59
14	0,00	-24,91	12,97	-4,90	4,41	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,04
15	0,00	-24,91	12,96	-4,90	4,42	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,03
16	0,00	-22,65	11,78	-4,45	4,02	1,80	13,15	8,10	69,50	25,57	4,50	5,48
17	0,00	-24,91	12,96	-4,90	4,42	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,03
18	0,00	-27,18	14,15	-5,34	4,81	2,16	15,78	9,72	83,40	30,67	5,40	6,59
19	18,56	-10,55	13,72	-3,49	5,24	2,23	17,71	9,79	64,84	29,17	5,33	6,16
20	18,37	-8,40	12,56	-3,11	4,82	2,05	16,32	8,98	58,08	26,67	4,88	5,63
21	18,20	-6,22	11,39	-2,74	4,41	1,87	14,92	8,17	51,30	24,19	4,43	5,09
22	18,05	-4,01	10,22	-2,39	4,00	1,68	13,51	7,35	44,50	21,72	3,99	4,55
23	17,92	-1,75	9,07	-2,06	3,57	1,50	12,07	6,54	37,68	19,26	3,54	4,03
24	17,92	-1,75	9,07	-2,06	3,57	1,50	12,07	6,54	37,68	19,26	3,54	4,03
ERRO RELATIVO												
Hora	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7	Trecho 8	Trecho 9	Trecho 10	Trecho 11	Trecho 12
1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
3	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
4	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
5	0,00%	0,00%	0,10%	0,00%	-0,25%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,05%	0,00%	0,22%
6	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
7	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
8	0,00%	0,09%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
9	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
10	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
11	0,00%	0,00%	0,08%	0,00%	-0,21%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,04%	0,00%	0,18%
12	0,00%	0,09%	0,07%	0,00%	-0,19%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%	0,16%
13	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
14	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
15	0,00%	0,00%	0,08%	0,00%	-0,23%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,17%
16	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
17	0,00%	0,00%	0,08%	0,00%	-0,23%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,17%
18	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,00%	0,09%	0,07%	0,00%	-0,19%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%	0,16%
20	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,00%	0,00%	0,10%	0,00%	-0,25%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,05%	0,00%	0,22%
23	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
24	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Ilustra-se na Figura 5.7, para a primeira hora da simulação, os valores de vazão inicial (0,0 L/s) e final (17,82 L/s) no Trecho 01, e os valores de pressão inicial (35 mca) e final (34,92 mca) no Nó 02 (EE), assim como os estágios intermediários do processo de convergência, que se estabiliza em cerca de 150 iterações.

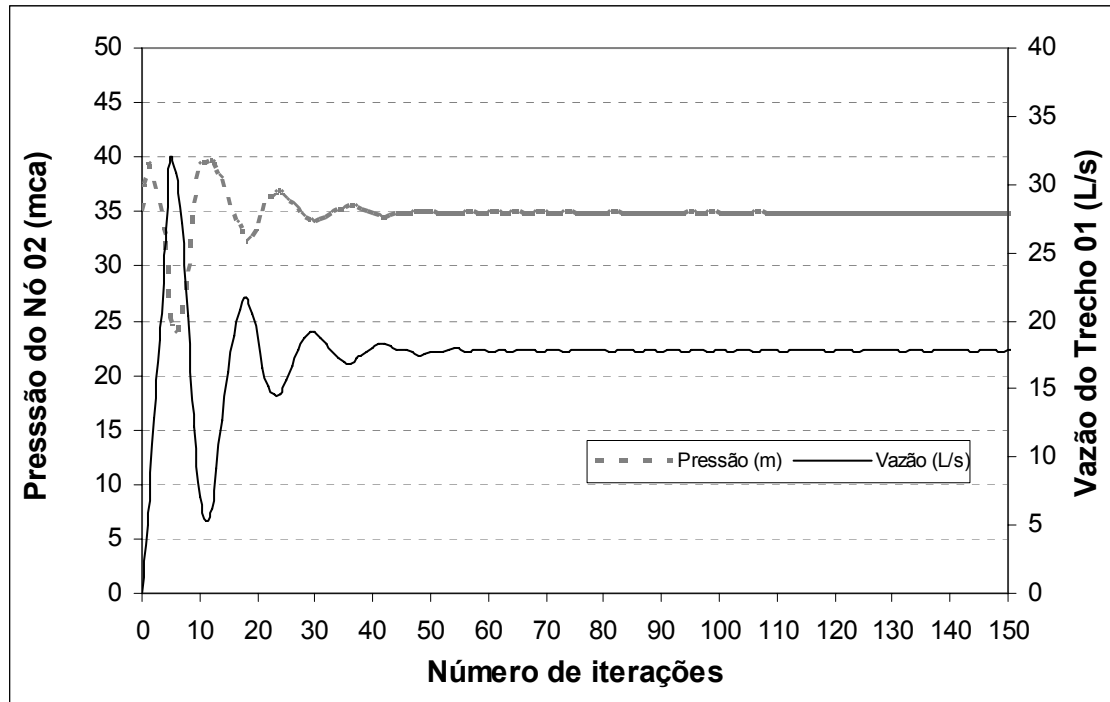


Figura 5.7. Processo de convergência do MOC, primeiro hora de simulação (EE)

A Figura 5.8 apresenta dados similares, entretanto, para a segunda hora da simulação (vazão final de 17,73 L/s e pressão final de 34,97 mca).

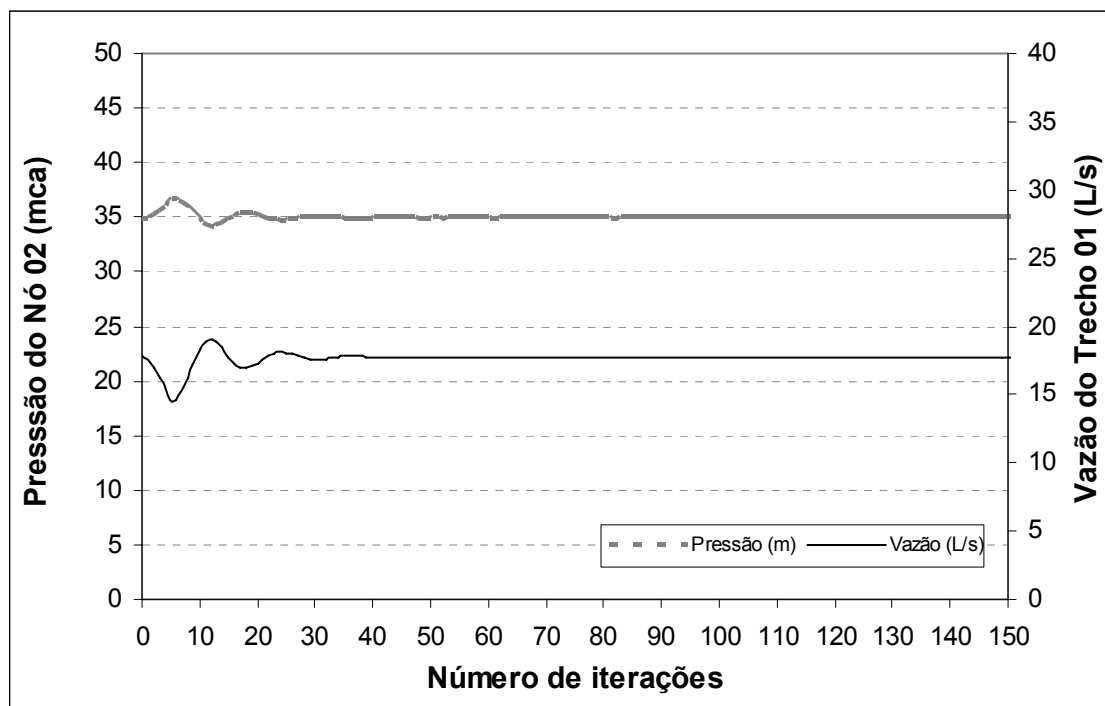


Figura 5.8. Processo de convergência do MOC, segunda hora de simulação (EE)

Nesse caso, o modelo não é iniciado a partir de uma condição hidrostática, mas da condição de regime permanente relativa à primeira hora de simulação. Estabelece-se então o processo de transição de estágios. A convergência é atingida após aproximadamente 50 iterações, portanto, com menor esforço computacional. Este fato demonstra que o processo de convergência é mais rápido quando a condição do estágio final é mais próxima da condição do estágio inicial.

O passo de tempo da simulação foi de 1,609 s e a celeridade de cálculo (a) de 1.000 m/s, igual à celeridade padrão (a^*), uma vez que os trechos têm comprimentos iguais. Os gráficos enfatizam as 150 primeiras iterações, embora cada hora da simulação envolva 2237 iterações (3600 s).

No que tange ao tempo de processamento gasto para as simulações do exemplo de modelagem no período estendido de EE, foi constatado que o MOC consumiu 3 s, enquanto o EPANET consumiu menos de 1 s.

5.3. Modelagem de Booster

Trata-se de uma rede composta de 05 pontos de consumo/demanda, 05 tubulações, 01 RNF, e 01 booster, necessário para “vencer” o desnível geométrico do último trecho da rede, conforme ilustra a Figura 5.9. A simulação considerou um período de 24 horas.

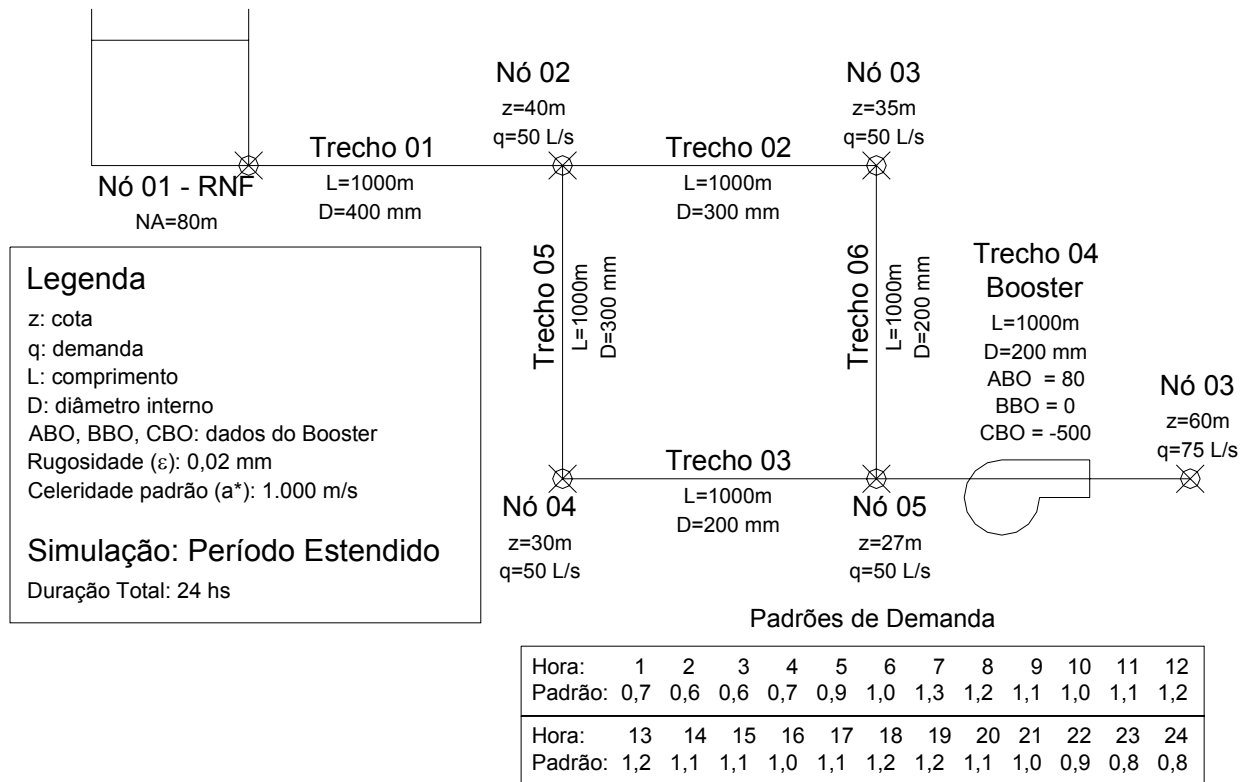


Figura 5.9. Configuração da rede para modelagem de Booster

A mesma rede foi simulada no EPANET. Observou-se compatibilidade satisfatória entre os resultados obtidos. O erro relativo máximo dos dados de pressão foi de 1,0%, enquanto que para os dados de vazões o erro foi nulo, conforme ilustram as Tabelas 5.6 e 5.7.

Tabela 5.6. Resultados de pressão do MOC e do EPANET na modelagem de booster

Pressão (mca) - MOC						
Hora	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6
1	0,00	35,97	37,83	42,83	38,12	72,90
2	0,00	36,98	39,62	44,62	41,82	79,68
3	0,00	36,98	39,62	44,62	41,82	79,68
4	0,00	35,97	37,83	42,83	38,12	72,90
5	0,00	33,55	33,54	38,54	29,22	56,60
6	0,00	32,13	31,04	36,04	24,03	47,07
7	0,00	27,09	22,13	27,13	5,55	13,09
8	0,00	28,90	25,34	30,34	12,19	25,32
9	0,00	30,59	28,31	33,31	18,35	36,65
10	0,00	32,13	31,04	36,04	24,03	47,07
11	0,00	30,59	28,31	33,31	18,35	36,65
12	0,00	28,90	25,34	30,34	12,19	25,32
13	0,00	28,90	25,34	30,34	12,19	25,32
14	0,00	30,59	28,31	33,31	18,35	36,65
15	0,00	30,59	28,31	33,31	18,35	36,65
16	0,00	32,13	31,04	36,04	24,03	47,07
17	0,00	30,59	28,31	33,31	18,35	36,65
18	0,00	28,90	25,34	30,34	12,19	25,32
19	0,00	28,90	25,34	30,34	12,19	25,32
20	0,00	30,59	28,31	33,31	18,35	36,65
21	0,00	32,13	31,04	36,04	24,03	47,07
22	0,00	33,55	33,54	38,54	29,22	56,60
23	0,00	34,83	35,81	40,81	33,91	65,21
24	0,00	34,83	35,81	40,81	33,91	65,21
Pressão (mca) - EPANET						
Hora	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6
1	0,00	35,97	37,82	42,82	38,09	72,86
2	0,00	36,97	39,61	44,61	41,80	79,64
3	0,00	36,97	39,61	44,61	41,80	79,64
4	0,00	35,97	37,82	42,82	38,09	72,86
5	0,00	33,54	33,53	38,53	29,18	56,54
6	0,00	32,12	31,02	36,02	23,99	47,01
7	0,00	27,08	22,10	27,10	5,49	13,00
8	0,00	28,89	25,31	30,31	12,14	25,23
9	0,00	30,58	28,28	33,28	18,31	36,57
10	0,00	32,12	31,02	36,02	23,99	47,01
11	0,00	30,58	28,28	33,28	18,31	36,57
12	0,00	28,89	25,31	30,31	12,14	25,23
13	0,00	28,89	25,31	30,31	12,14	25,23
14	0,00	30,58	28,28	33,28	18,31	36,57
15	0,00	30,58	28,28	33,28	18,31	36,57
16	0,00	32,12	31,02	36,02	23,99	47,01
17	0,00	30,58	28,28	33,28	18,31	36,57
18	0,00	28,89	25,31	30,31	12,14	25,23
19	0,00	28,89	25,31	30,31	12,14	25,23
20	0,00	30,58	28,28	33,28	18,31	36,57
21	0,00	32,12	31,02	36,02	23,99	47,01
22	0,00	33,54	33,53	38,53	29,18	56,54
23	0,00	34,82	35,79	40,79	33,89	65,16
24	0,00	34,82	35,79	40,79	33,89	65,16
ERRO RELATIVO						
Hora	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6
1	0,00%	0,00%	0,04%	0,03%	0,07%	0,06%
2	0,00%	0,02%	0,02%	0,02%	0,05%	0,04%
3	0,00%	0,02%	0,02%	0,02%	0,05%	0,04%
4	0,00%	0,00%	0,04%	0,03%	0,07%	0,06%
5	0,00%	0,03%	0,04%	0,04%	0,13%	0,10%
6	0,00%	0,05%	0,07%	0,06%	0,17%	0,14%
7	0,00%	0,03%	0,14%	0,11%	1,01%	0,70%
8	0,00%	0,05%	0,10%	0,08%	0,43%	0,35%
9	0,00%	0,02%	0,09%	0,08%	0,24%	0,21%
10	0,00%	0,05%	0,07%	0,06%	0,17%	0,14%
11	0,00%	0,02%	0,09%	0,08%	0,24%	0,21%
12	0,00%	0,05%	0,10%	0,08%	0,43%	0,35%
13	0,00%	0,05%	0,10%	0,08%	0,43%	0,35%
14	0,00%	0,02%	0,09%	0,08%	0,24%	0,21%
15	0,00%	0,02%	0,09%	0,08%	0,24%	0,21%
16	0,00%	0,05%	0,07%	0,06%	0,17%	0,14%
17	0,00%	0,02%	0,09%	0,08%	0,24%	0,21%
18	0,00%	0,05%	0,10%	0,08%	0,43%	0,35%
19	0,00%	0,05%	0,10%	0,08%	0,43%	0,35%
20	0,00%	0,02%	0,09%	0,08%	0,24%	0,21%
21	0,00%	0,05%	0,07%	0,06%	0,17%	0,14%
22	0,00%	0,03%	0,04%	0,04%	0,13%	0,10%
23	0,00%	0,02%	0,05%	0,04%	0,07%	0,07%
24	0,00%	0,02%	0,05%	0,04%	0,07%	0,07%

Tabela 5.7. Resultados de vazão do MOC e do EPANET na modelagem de booster

Vazão (L/s) - MOC						
Hora	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6
1	192,50	78,75	43,75	52,50	78,75	43,75
2	165,00	67,50	37,50	45,00	67,50	37,50
3	165,00	67,50	37,50	45,00	67,50	37,50
4	192,50	78,75	43,75	52,50	78,75	43,75
5	247,50	101,25	56,25	67,50	101,25	56,25
6	275,00	112,50	62,50	75,00	112,50	62,50
7	357,50	146,25	81,25	97,50	146,25	81,25
8	330,00	135,00	75,00	90,00	135,00	75,00
9	302,50	123,75	68,75	82,50	123,75	68,75
10	275,00	112,50	62,50	75,00	112,50	62,50
11	302,50	123,75	68,75	82,50	123,75	68,75
12	330,00	135,00	75,00	90,00	135,00	75,00
13	330,00	135,00	75,00	90,00	135,00	75,00
14	302,50	123,75	68,75	82,50	123,75	68,75
15	302,50	123,75	68,75	82,50	123,75	68,75
16	275,00	112,50	62,50	75,00	112,50	62,50
17	302,50	123,75	68,75	82,50	123,75	68,75
18	330,00	135,00	75,00	90,00	135,00	75,00
19	330,00	135,00	75,00	90,00	135,00	75,00
20	302,50	123,75	68,75	82,50	123,75	68,75
21	275,00	112,50	62,50	75,00	112,50	62,50
22	247,50	101,25	56,25	67,50	101,25	56,25
23	220,00	90,00	50,00	60,00	90,00	50,00
24	220,00	90,00	50,00	60,00	90,00	50,00
Vazão (L/s) - EPANET						
Hora	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6
1	192,50	78,75	43,75	52,50	78,75	43,75
2	165,00	67,50	37,50	45,00	67,50	37,50
3	165,00	67,50	37,50	45,00	67,50	37,50
4	192,50	78,75	43,75	52,50	78,75	43,75
5	247,50	101,25	56,25	67,50	101,25	56,25
6	275,00	112,50	62,50	75,00	112,50	62,50
7	357,50	146,25	81,25	97,50	146,25	81,25
8	330,00	135,00	75,00	90,00	135,00	75,00
9	302,50	123,75	68,75	82,50	123,75	68,75
10	275,00	112,50	62,50	75,00	112,50	62,50
11	302,50	123,75	68,75	82,50	123,75	68,75
12	330,00	135,00	75,00	90,00	135,00	75,00
13	330,00	135,00	75,00	90,00	135,00	75,00
14	302,50	123,75	68,75	82,50	123,75	68,75
15	302,50	123,75	68,75	82,50	123,75	68,75
16	275,00	112,50	62,50	75,00	112,50	62,50
17	302,50	123,75	68,75	82,50	123,75	68,75
18	330,00	135,00	75,00	90,00	135,00	75,00
19	330,00	135,00	75,00	90,00	135,00	75,00
20	302,50	123,75	68,75	82,50	123,75	68,75
21	275,00	112,50	62,50	75,00	112,50	62,50
22	247,50	101,25	56,25	67,50	101,25	56,25
23	220,00	90,00	50,00	60,00	90,00	50,00
24	220,00	90,00	50,00	60,00	90,00	50,00
ERRO RELATIVO						
Hora	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6
1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
3	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
4	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
6	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
7	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
8	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
9	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
10	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
11	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
12	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
13	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
14	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
15	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
17	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
18	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
20	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
23	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
24	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

O processo de convergência para o booster é apresentado na Figura 5.10 (Trecho 6). Verificou-se que o processo de cálculo convergiu após 200 iterações (vazão 43,75 L/s e pressão 72,90 mca). O passo de tempo da simulação foi de 1,0 s, a celeridade de cálculo (a) de 1.000 m/s. O gráfico enfatiza as 300 primeiras iterações (300 s), embora a primeira hora de simulação envolva 3600 iterações (3600 s).

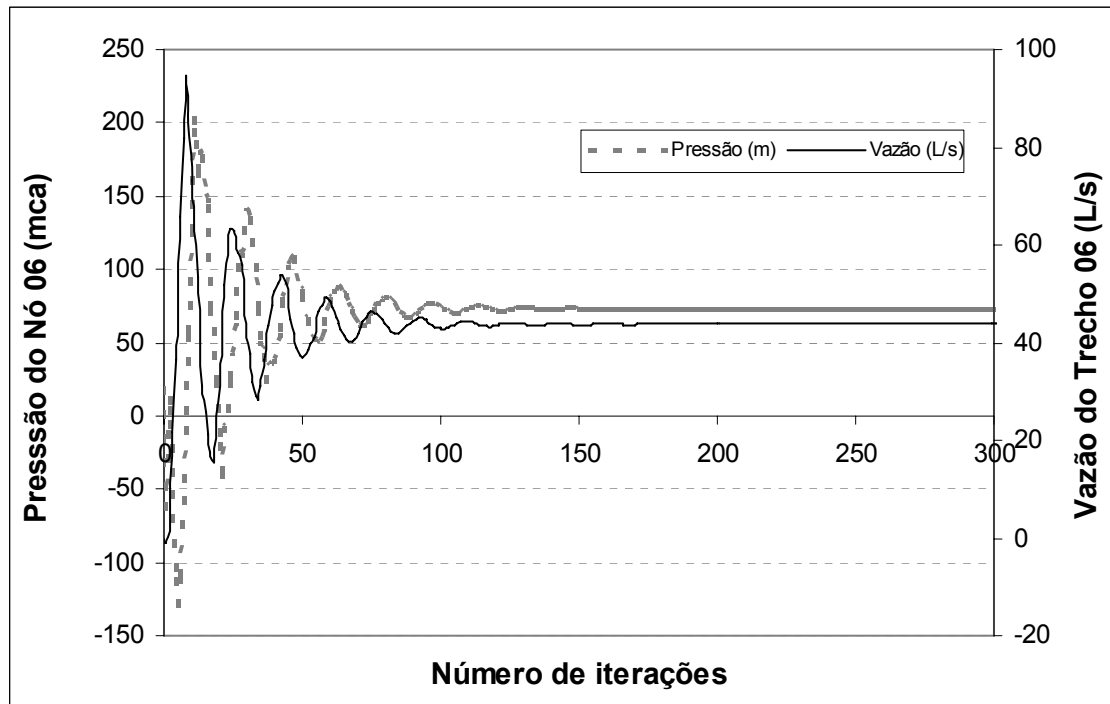


Figura 5.10. Processo de convergência do MOC, primeiro hora de simulação (booster)

Em relação ao tempo de processamento gasto para as simulações do exemplo de modelagem no período estendido do booster, foi constatado que o MOC consumiu 3 s, enquanto o EPANET consumiu menos de 1 s.

5.4. Modelagem de RNV

Trata-se de uma rede composta de 08 pontos de consumo/demanda, 11 tubulações e 01 RNV, conforme ilustra a Figura 5.11. A simulação considerou um período de 24 horas.

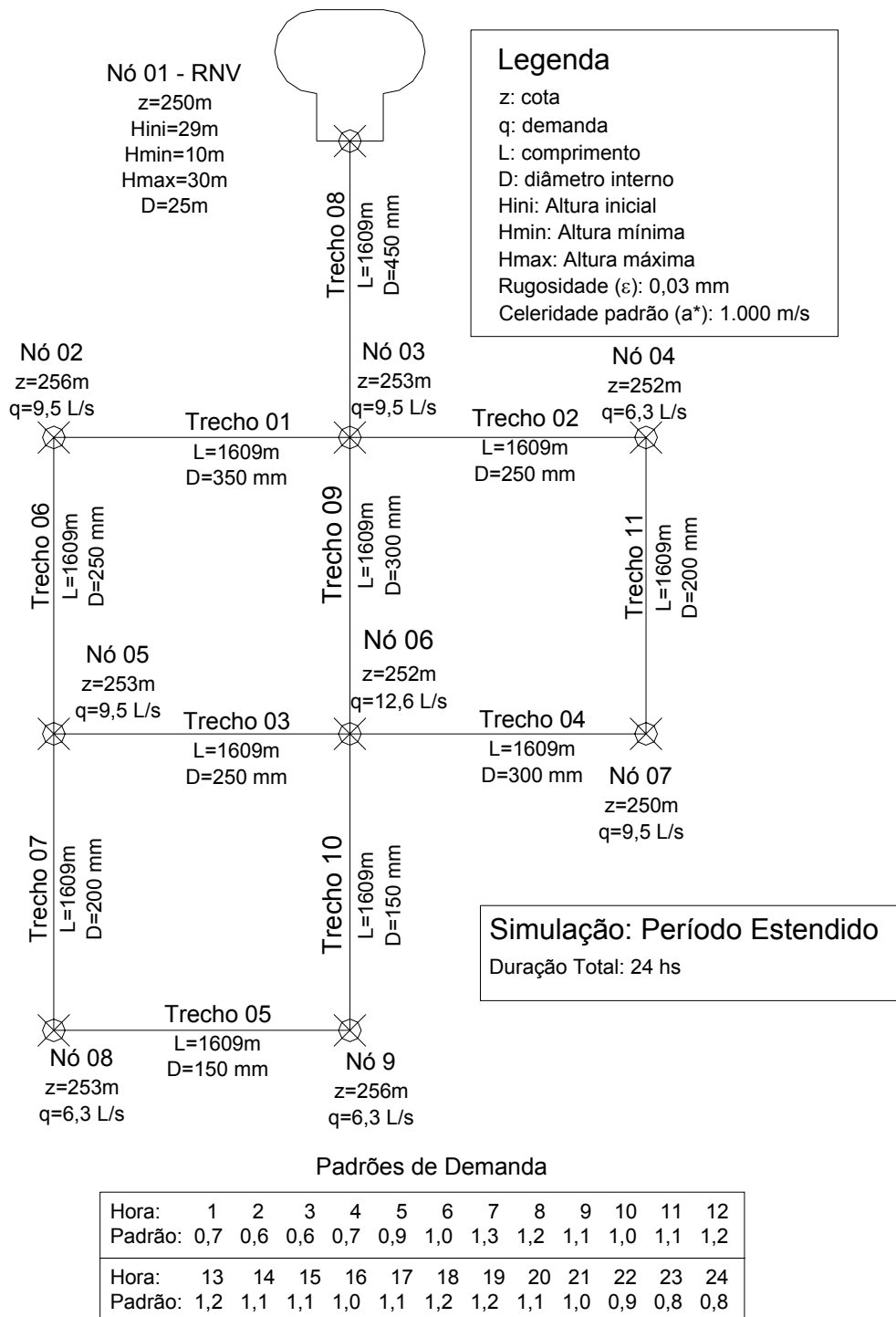


Figura 5.11. Configuração da rede para modelagem de RNV

A mesma rede foi simulada no EPANET. Uma comparação entre os resultados obtidos indicou que os valores de vazões apresentaram compatibilidade, erros relativos máximos de +0,31% e -0,41%, considerando todos os trechos e horários de simulação.

Todavia os valores de pressão apresentaram uma diferença mais acentuada, sendo os extremos do erro relativo de +6,61% e -3,85%, considerando todos os nós e horários de simulação. Se for considerado o módulo do erro relativo das pressões, o valor médio foi de 1,04%, enquanto que se o sinal for considerado, o erro médio foi de -0,11%.

Os resultados das simulações de pressão e vazão da modelagem do RNV encontram-se apresentados respectivamente nas Tabelas 5.8 e 5.9.

Tabela 5.8. Resultados de pressão do MOC e do EPANET na modelagem de RNV

Pressão (mca) - MOC									
Hora	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9
1	28,64	22,22	25,35	26,15	24,97	26,01	27,99	24,66	21,58
2	28,34	22,02	25,12	25,96	24,83	25,86	27,85	24,60	21,53
3	28,03	21,71	24,81	25,66	24,52	25,55	27,54	24,29	21,22
4	27,68	21,25	24,38	25,18	24,00	25,04	27,03	23,70	20,61
5	27,22	20,55	23,75	24,43	23,16	24,21	26,19	22,68	19,54
6	26,71	19,90	23,14	23,76	22,42	23,49	25,47	21,84	18,68
7	26,04	18,73	22,13	22,51	20,98	22,08	24,05	20,04	16,79
8	25,43	18,30	21,65	22,11	20,64	21,74	23,71	19,84	16,62
9	24,87	17,91	21,20	21,74	20,35	21,43	23,40	19,66	16,47
10	24,36	17,55	20,80	21,41	20,08	21,15	23,12	19,50	16,34
11	23,80	16,84	20,13	20,67	19,28	20,36	22,33	18,59	15,40
12	23,19	16,06	19,40	19,86	18,40	19,50	21,46	17,60	14,38
13	22,58	15,45	18,79	19,25	17,79	18,89	20,85	16,99	13,77
14	22,02	15,05	18,35	18,89	17,49	18,57	20,55	16,80	13,62
15	21,46	14,49	17,79	18,33	16,93	18,01	19,99	16,24	13,06
16	20,95	14,14	17,39	18,00	16,67	17,73	19,71	16,09	12,93
17	20,39	13,42	16,72	17,26	15,86	16,94	18,91	15,17	11,99
18	19,78	12,64	15,99	16,45	14,99	16,08	18,05	14,18	10,96
19	19,16	12,03	15,38	15,84	14,38	15,47	17,44	13,57	10,35
20	18,60	11,64	14,93	15,47	14,08	15,16	17,13	13,39	10,20
21	18,09	11,28	14,53	15,14	13,81	14,88	16,86	13,23	10,07
22	17,64	10,97	14,17	14,85	13,58	14,63	16,61	13,10	9,96
23	17,23	10,69	13,85	14,60	13,37	14,42	16,40	12,98	9,88
24	16,82	10,28	13,45	14,19	12,96	14,01	15,99	12,58	9,47
Pressão (mca) - EPANET									
Hora	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9
1	28,64	22,32	25,42	26,27	25,13	26,16	28,15	24,90	21,83
2	28,34	22,02	25,11	25,96	24,83	25,85	27,84	24,59	21,53
3	28,03	21,61	24,74	25,53	24,36	25,39	27,38	24,05	20,96
4	27,67	21,00	24,21	24,89	23,61	24,67	26,65	23,13	20,00
5	27,22	20,40	23,65	24,26	22,93	24,00	25,97	22,35	19,19
6	26,71	19,39	22,79	23,17	21,63	22,74	24,70	20,70	17,45
7	26,04	18,91	22,26	22,72	21,25	22,35	24,31	20,44	17,22
8	25,43	18,46	21,76	22,30	20,90	21,98	23,96	20,21	17,02
9	24,87	18,06	21,31	21,92	20,59	21,65	23,63	20,00	16,84
10	24,36	17,39	20,69	21,23	19,83	20,91	22,89	19,14	15,95
11	23,80	16,67	20,01	20,47	19,01	20,10	22,07	18,20	14,98
12	23,19	16,06	19,40	19,86	18,40	19,49	21,46	17,59	14,37
13	22,58	15,61	18,91	19,44	18,05	19,13	21,10	17,36	14,17
14	22,02	15,05	18,35	18,88	17,49	18,57	20,54	16,80	13,61
15	21,46	14,64	17,89	18,50	17,17	18,24	20,22	16,59	13,43
16	20,95	13,98	17,27	17,81	16,42	17,50	19,47	15,73	12,54
17	20,39	13,25	16,60	17,06	15,59	16,69	18,66	14,79	11,57
18	19,77	12,64	15,99	16,45	14,98	16,08	18,04	14,18	10,95
19	19,16	12,20	15,49	16,03	14,63	15,71	17,69	13,94	10,75
20	18,60	11,79	15,04	15,65	14,32	15,39	17,36	13,74	10,57
21	18,09	11,42	14,63	15,31	14,03	15,09	17,07	13,55	10,42
22	17,63	11,09	14,26	15,00	13,78	14,82	16,81	13,39	10,28
23	17,23	10,68	13,85	14,59	13,37	14,41	16,40	12,98	9,87
24	16,82	10,39	13,52	14,32	13,14	14,18	16,17	12,84	9,75
ERRO RELATIVO									
Hora	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7	Nó 8	Nó 9
1	0,00%	-0,45%	-0,28%	-0,47%	-0,64%	-0,59%	-0,56%	-0,95%	-1,16%
2	0,00%	-0,02%	0,02%	0,00%	-0,01%	0,02%	0,02%	0,02%	0,00%
3	0,00%	0,46%	0,28%	0,49%	0,66%	0,63%	0,58%	0,99%	1,25%
4	0,00%	1,18%	0,70%	1,14%	1,64%	1,47%	1,39%	2,39%	2,96%
5	0,00%	0,72%	0,43%	0,70%	0,98%	0,88%	0,85%	1,44%	1,81%
6	0,00%	2,54%	1,53%	2,47%	3,54%	3,20%	3,02%	5,24%	6,61%
7	0,00%	-0,94%	-0,58%	-0,94%	-1,31%	-1,20%	-1,10%	-1,97%	-2,56%
8	0,00%	-0,87%	-0,53%	-0,87%	-1,24%	-1,11%	-1,07%	-1,87%	-2,41%
9	0,00%	-0,85%	-0,51%	-0,82%	-1,20%	-1,04%	-0,99%	-1,74%	-2,25%
10	0,00%	0,92%	0,53%	0,85%	1,24%	1,13%	1,01%	1,85%	2,39%
11	0,00%	0,99%	0,60%	0,97%	1,38%	1,26%	1,16%	2,09%	2,72%
12	0,00%	-0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,04%	0,02%	0,04%	0,05%
13	0,00%	-1,05%	-0,63%	-0,97%	-1,45%	-1,29%	-1,19%	-2,20%	-2,94%
14	0,00%	0,02%	-0,01%	0,04%	0,02%	0,02%	0,03%	0,03%	0,04%
15	0,00%	-1,02%	-0,58%	-0,94%	-1,40%	-1,26%	-1,18%	-2,13%	-2,87%
16	0,00%	1,11%	0,66%	1,05%	1,47%	1,32%	1,22%	2,21%	2,99%
17	0,00%	1,29%	0,70%	1,14%	1,72%	1,49%	1,35%	2,53%	3,46%
18	0,00%	0,04%	0,00%	0,00%	0,06%	0,02%	0,06%	0,02%	0,12%
19	0,00%	-1,39%	-0,73%	-1,21%	-1,76%	-1,54%	-1,44%	-2,71%	-3,85%
20	0,00%	-1,30%	-0,71%	-1,14%	-1,72%	-1,52%	-1,33%	-2,61%	-3,61%
21	0,00%	-1,21%	-0,68%	-1,09%	-1,58%	-1,41%	-1,27%	-2,40%	-3,45%
22	0,00%	-1,13%	-0,62%	-1,00%	-1,50%	-1,28%	-1,18%	-2,24%	-3,17%
23	0,00%	0,07%	0,03%	0,03%	0,02%	0,06%	0,01%	0,03%	0,06%
24	0,00%	-1,07%	-0,55%	-0,94%	-1,35%	-1,21%	-1,10%	-2,10%	-2,98%

Tabela 5.9. Resultados de vazão do MOC e do EPANET na modelagem de RNV

Vazão (L/s) - MOC											
Hora	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7	Trecho 8	Trecho 9	Trecho 10	Trecho 11
1	-15,85	8,23	-3,12	2,83	1,26	9,20	5,67	48,65	17,92	3,15	3,82
2	-13,58	7,04	-2,68	2,43	1,08	7,88	4,86	41,70	15,37	2,70	3,27
3	-13,58	7,04	-2,68	2,43	1,08	7,88	4,86	41,70	15,37	2,70	3,27
4	-15,85	8,23	-3,12	2,83	1,26	9,20	5,67	48,65	17,92	3,15	3,82
5	-20,38	10,59	-4,01	3,62	1,62	11,83	7,29	62,55	23,02	4,05	4,92
6	-22,65	11,78	-4,45	4,02	1,80	13,15	8,10	69,50	25,57	4,50	5,48
7	-29,45	15,34	-5,79	5,20	2,34	17,10	10,53	90,35	33,21	5,85	7,15
8	-27,18	14,15	-5,34	4,81	2,16	15,78	9,72	83,40	30,67	5,40	6,59
9	-24,91	12,97	-4,90	4,41	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,04
10	-22,65	11,78	-4,45	4,02	1,80	13,15	8,10	69,50	25,57	4,50	5,48
11	-24,91	12,97	-4,90	4,41	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,04
12	-27,18	14,15	-5,34	4,81	2,16	15,78	9,72	83,40	30,67	5,40	6,59
13	-27,18	14,15	-5,34	4,81	2,16	15,78	9,72	83,40	30,67	5,40	6,59
14	-24,91	12,97	-4,90	4,41	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,04
15	-24,91	12,97	-4,90	4,41	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,04
16	-22,65	11,78	-4,45	4,02	1,80	13,15	8,10	69,50	25,57	4,50	5,48
17	-24,91	12,97	-4,90	4,41	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,04
18	-27,18	14,15	-5,34	4,81	2,16	15,78	9,72	83,40	30,67	5,40	6,59
19	-27,18	14,15	-5,34	4,81	2,16	15,78	9,72	83,40	30,67	5,40	6,59
20	-24,91	12,97	-4,90	4,41	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,04
21	-22,65	11,78	-4,45	4,02	1,80	13,15	8,10	69,50	25,57	4,50	5,48
22	-20,38	10,59	-4,01	3,62	1,62	11,83	7,29	62,55	23,02	4,05	4,92
23	-18,11	9,41	-3,57	3,23	1,44	10,51	6,48	55,60	20,47	3,60	4,37
24	-18,11	9,41	-3,57	3,23	1,44	10,51	6,48	55,60	20,47	3,60	4,37

Vazão (L/s) - EPANET											
Hora	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7	Trecho 8	Trecho 9	Trecho 10	Trecho 11
1	-15,85	8,23	-3,12	2,83	1,26	9,20	5,67	48,65	17,92	3,15	3,82
2	-13,58	7,05	-2,68	2,43	1,08	7,88	4,86	41,70	15,37	2,70	3,27
3	-13,58	7,04	-2,68	2,44	1,08	7,88	4,86	41,70	15,37	2,70	3,26
4	-15,85	8,23	-3,12	2,83	1,26	9,20	5,67	48,65	17,93	3,15	3,82
5	-20,38	10,59	-4,01	3,63	1,62	11,83	7,29	62,55	23,03	4,05	4,92
6	-22,65	11,78	-4,45	4,02	1,80	13,15	8,10	69,50	25,58	4,50	5,48
7	-29,45	15,34	-5,79	5,20	2,34	17,10	10,53	90,35	33,22	5,85	7,15
8	-27,18	14,15	-5,34	4,81	2,16	15,78	9,72	83,40	30,67	5,40	6,59
9	-24,91	12,97	-4,90	4,41	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,04
10	-22,65	11,78	-4,45	4,02	1,80	13,15	8,10	69,50	25,57	4,50	5,48
11	-24,91	12,96	-4,90	4,42	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,03
12	-27,18	14,15	-5,34	4,81	2,16	15,78	9,72	83,40	30,67	5,40	6,59
13	-27,18	14,15	-5,34	4,81	2,16	15,78	9,72	83,40	30,67	5,40	6,59
14	-24,91	12,97	-4,90	4,41	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,04
15	-24,91	12,96	-4,90	4,42	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,03
16	-22,65	11,78	-4,45	4,02	1,80	13,15	8,10	69,50	25,57	4,50	5,48
17	-24,91	12,96	-4,90	4,42	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,03
18	-27,18	14,15	-5,34	4,81	2,16	15,78	9,72	83,40	30,67	5,40	6,59
19	-27,18	14,15	-5,34	4,81	2,16	15,78	9,72	83,40	30,67	5,40	6,59
20	-24,91	12,97	-4,90	4,41	1,98	14,46	8,91	76,45	28,12	4,95	6,04
21	-22,65	11,78	-4,45	4,02	1,80	13,15	8,10	69,50	25,57	4,50	5,48
22	-20,38	10,59	-4,01	3,63	1,62	11,83	7,29	62,55	23,02	4,05	4,92
23	-18,11	9,41	-3,57	3,23	1,44	10,51	6,48	55,60	20,48	3,60	4,37
24	-18,11	9,41	-3,57	3,23	1,44	10,51	6,48	55,60	20,48	3,60	4,37

ERRO RELATIVO											
Hora	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7	Trecho 8	Trecho 9	Trecho 10	Trecho 11
1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2	0,00%	-0,14%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
3	0,00%	0,00%	0,00%	-0,41%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,31%
4	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,06%	0,00%	0,00%
5	0,00%	0,00%	0,00%	-0,28%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,04%	0,00%	0,00%
6	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,04%	0,00%	0,00%
7	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,03%	0,00%	0,00%
8	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
9	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
10	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
11	0,00%	0,08%	0,00%	-0,23%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,17%
12	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
13	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
14	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
15	0,00%	0,08%	0,00%	-0,23%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,17%
16	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
17	0,00%	0,08%	0,00%	-0,23%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,17%
18	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
20	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,00%	0,00%	0,00%	-0,28%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
23	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,05%	0,00%	0,00%
24	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,05%	0,00%	0,00%

Destaca-se que a diferença entre os valores de pressão no MOC e no EPANET se deve a diferenças nas metodologias das simulações. Enquanto no MOC é considerado que o padrão de demanda é constante ao longo de um horário da simulação, alterando este valor somente quando se inicia o horário seguinte, no EPANET são calculados valores intermediários para o padrão de demanda, por meio de interpolação entre horários consecutivos.

Assim, quando os valores dos padrões de demanda estão crescendo ao longo do tempo, a interpolação no EPANET resulta em valores intermediários de consumo maiores do que os do MOC, resultando em maiores vazões nos trechos e menores pressões para os nós da rede, devido à maior perda de carga e o esvaziamento mais rápido do RNV. Já quando os padrões de demanda estão decrescendo, ocorre o inverso. Destaca-se como um ponto positivo que ao longo de um período completo de simulação (24 horas) o erro não se torna cumulativo, pois existe alternância entre os ciclos descritos.

A Figura 5.12 apresenta a série temporal de pressões do Nó 09, onde foram observados os maiores erros relativos entre o MOC e o EPANET. Ambos os modelos alternam-se na posição de valor máximo da pressão para diferentes horários da simulação, fato que guarda relação com a série temporal dos padrões de demanda, também plotada no gráfico da Figura 5.12. Além disso, a diferença de pressão observada na hora 06 (máxima), decresce no passo de tempo seguinte, ou seja, não é cumulativa.

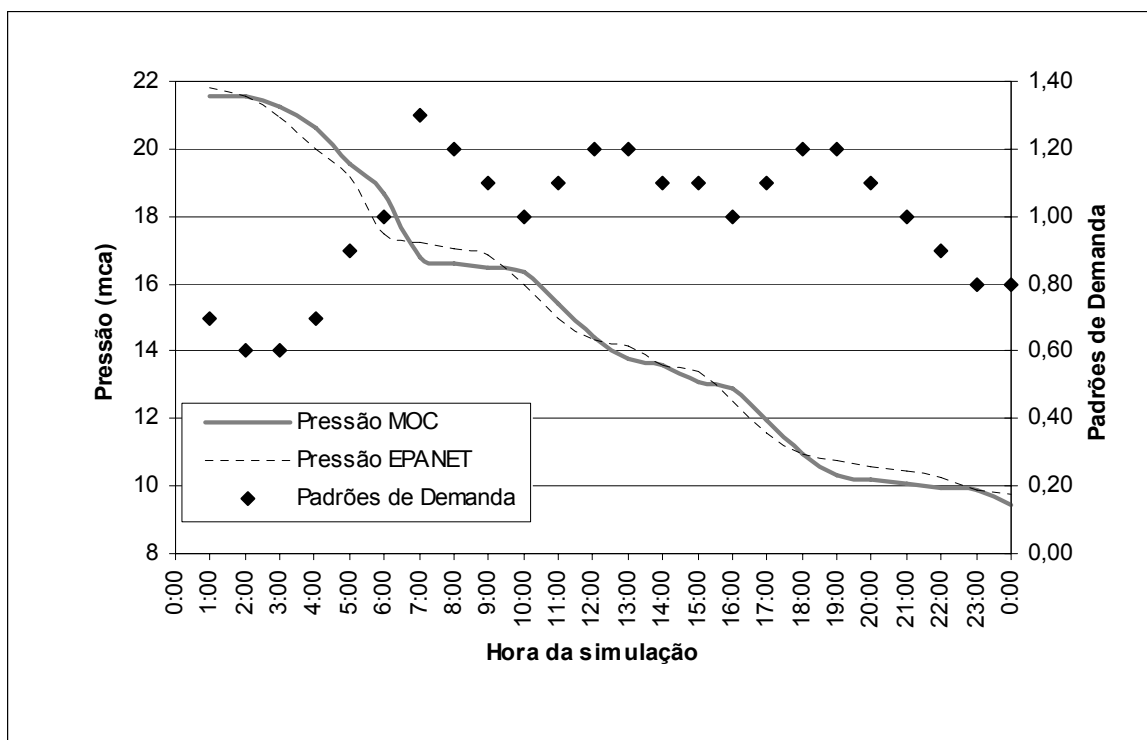


Figura 5.12. Série temporal de pressões do Nó 09, simulação do RNV

Ressalta-se que o próprio processo de esvaziamento e enchimento do tanque não se enquadra na classificação de um estado de regime permanente. Assim, o algoritmo de resolução do EPANET adapta o passo de tempo e outras variáveis do cálculo hidráulico para criar sucessivas soluções em regime permanente que emulam o processo dinâmico existente no sistema, enquanto a solução hidráulica do MOC é baseada em um transitório fictício, devido ao parâmetro de celeridade ter função apenas numérica.

Assim, em ambas as metodologias, há que se considerar que estão embutidas imprecisões nos resultados. Destaca-se que Filion & Karney (2002) apresentaram um estudo considerando dois métodos, preditor-corretor e preditor de Adams, para a modelagem de RNV. Vale frisar também que uma maior precisão nos resultados da modelagem de RNV sempre pode ser obtida quando se utiliza de um modelo inercial.

Em relação ao processo de “convergência”, para a primeira hora de simulação, ver Figura 5.13. O termo “convergência” é aqui usado no sentido de se atingir um valor pouco oscilante, uma vez que devido ao esvaziamento do RNV, as pressões na rede são decrescentes, além de resultar em um lento processo de redução das vazões dentro de um intervalo horário de consumo constante.

O passo de tempo da simulação foi de 1,609 s e a celeridade de cálculo (a) de 1.000 m/s. A primeira hora de simulação se encerra após 2237 iterações (3600s). A vazão oscila mais fortemente ao longo das 500 primeiras iterações, “convergindo” para um valor aparentemente estacionário, mas que decresce de uma forma quase imperceptível ao longo do tempo. Os valores ao final da primeira hora são de 28,64 mca e 48,65 L/s, respectivamente, para pressão e vazão.

No que concerne ao tempo de processamento gasto para as simulações de RNV, foi constatado que o MOC consumiu 3 s, enquanto o EPANET consumiu menos de 1 s.

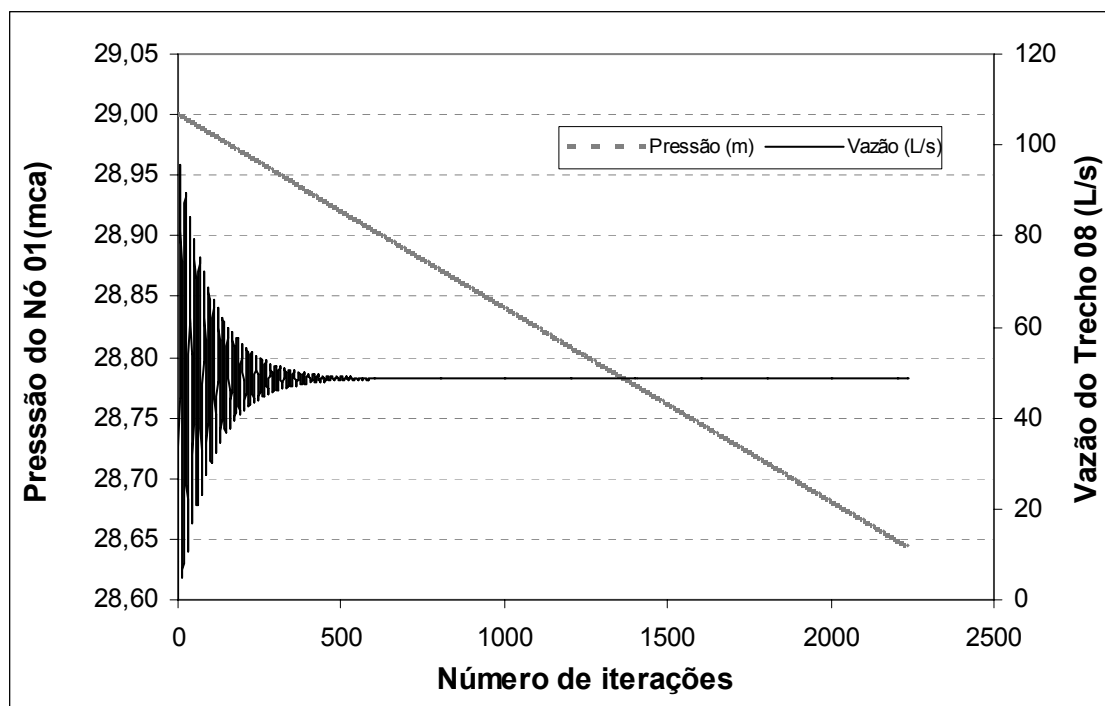


Figura 5.13. Processo de convergência do MOC, primeiro hora de simulação (RNV)

5.5. Modelagem de Caso Real 1

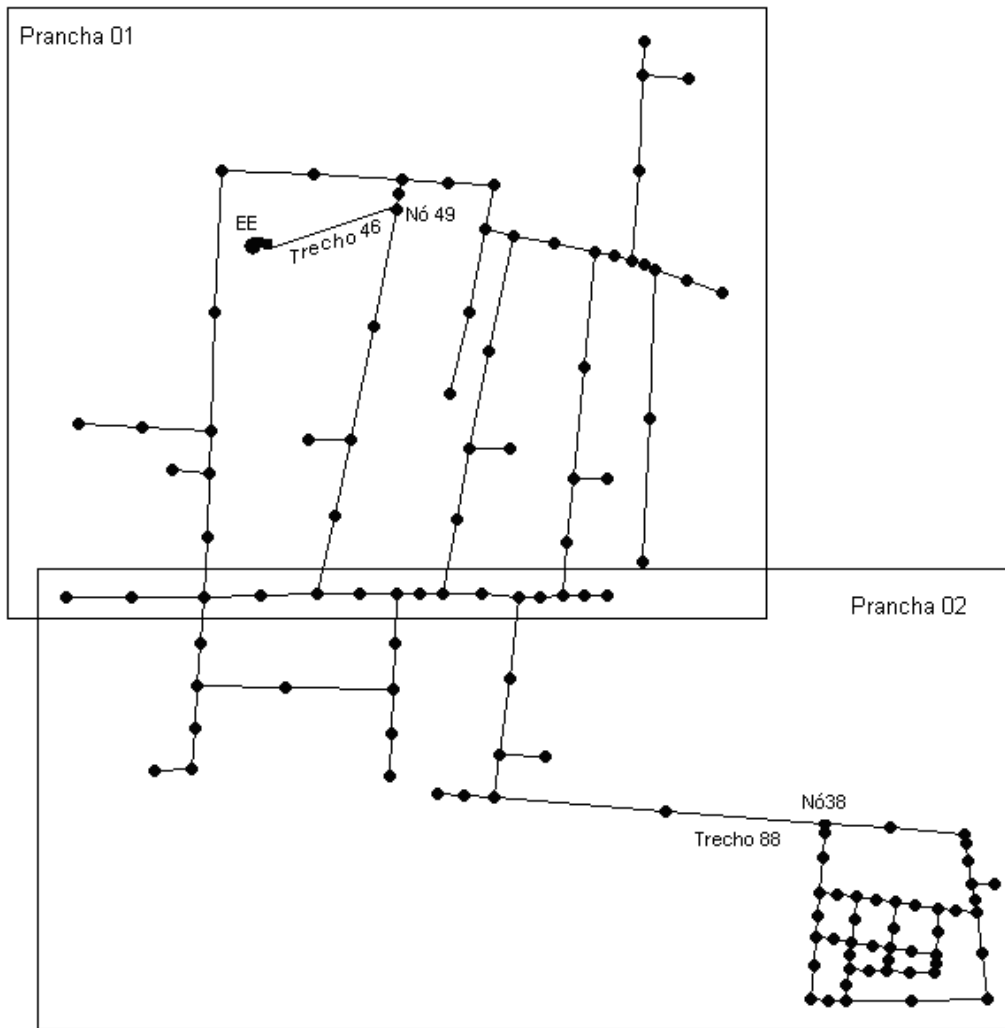
Com o intuito de testar o modelo baseado no MOC em uma simulação que retratasse um sistema de abastecimento de água real, foram utilizados os dados de uma rede de distribuição do Bairro de Dix-Sept Rosado, localizado no município de Natal, administrada pela CAERN.

Esta rede havia sido utilizada originalmente em um trabalho desenvolvido pelo Eng. Civil da CAERN Francisco Horácio Dantas em uma série de atividades com dois propósitos fundamentais:

- Avaliar a redução das Perdas, do Consumo de Energia Elétrica e o comportamento do Faturamento, em consequência de ações de melhoria da Eficiência Comercial, Operacional e Energética;
- Avaliar os efeitos nas principais variáveis hidráulicas, em subsistema isolado, com recalque direto na Rede de Distribuição, operando em velocidade constante e velocidade variável;

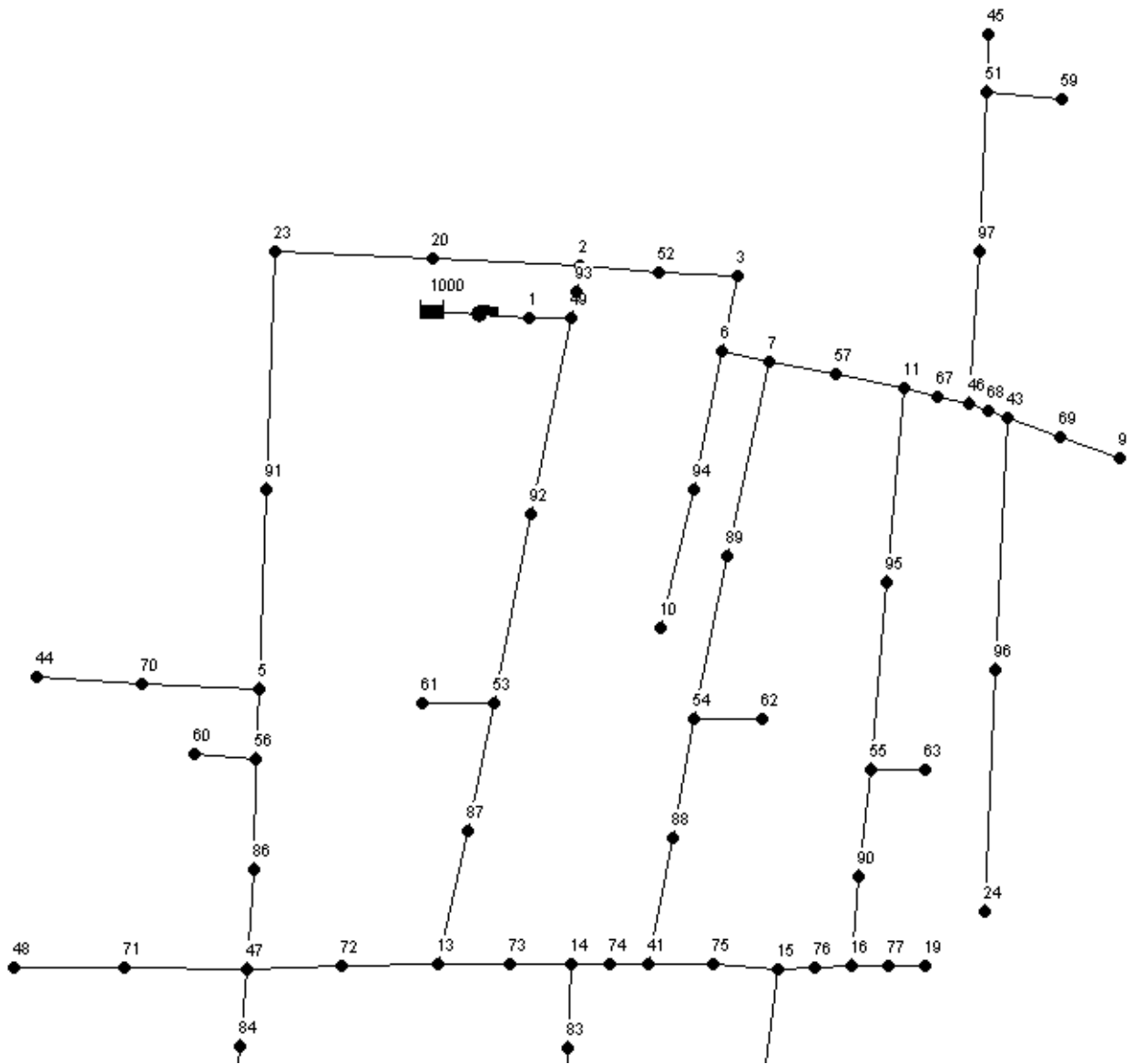
No trabalho da CAERN foi utilizado o simulador EPANET para modelar as vazões e pressões do sistema. A captação dessa rede, a qual deve-se frisar é isolada do restante sistema da cidade, é feito a partir de uma bomba junto a um poço.

A rede modelada era composta de 122 pontos de consumo/demanda, 134 tubulações e 01 EE, associada à bomba no ponto de captação do poço, conforme ilustra a Figura 5.14. Os dados da rede são apresentados nas Tabelas 5.10 a 5.13. A simulação considerou um período de 24 horas.



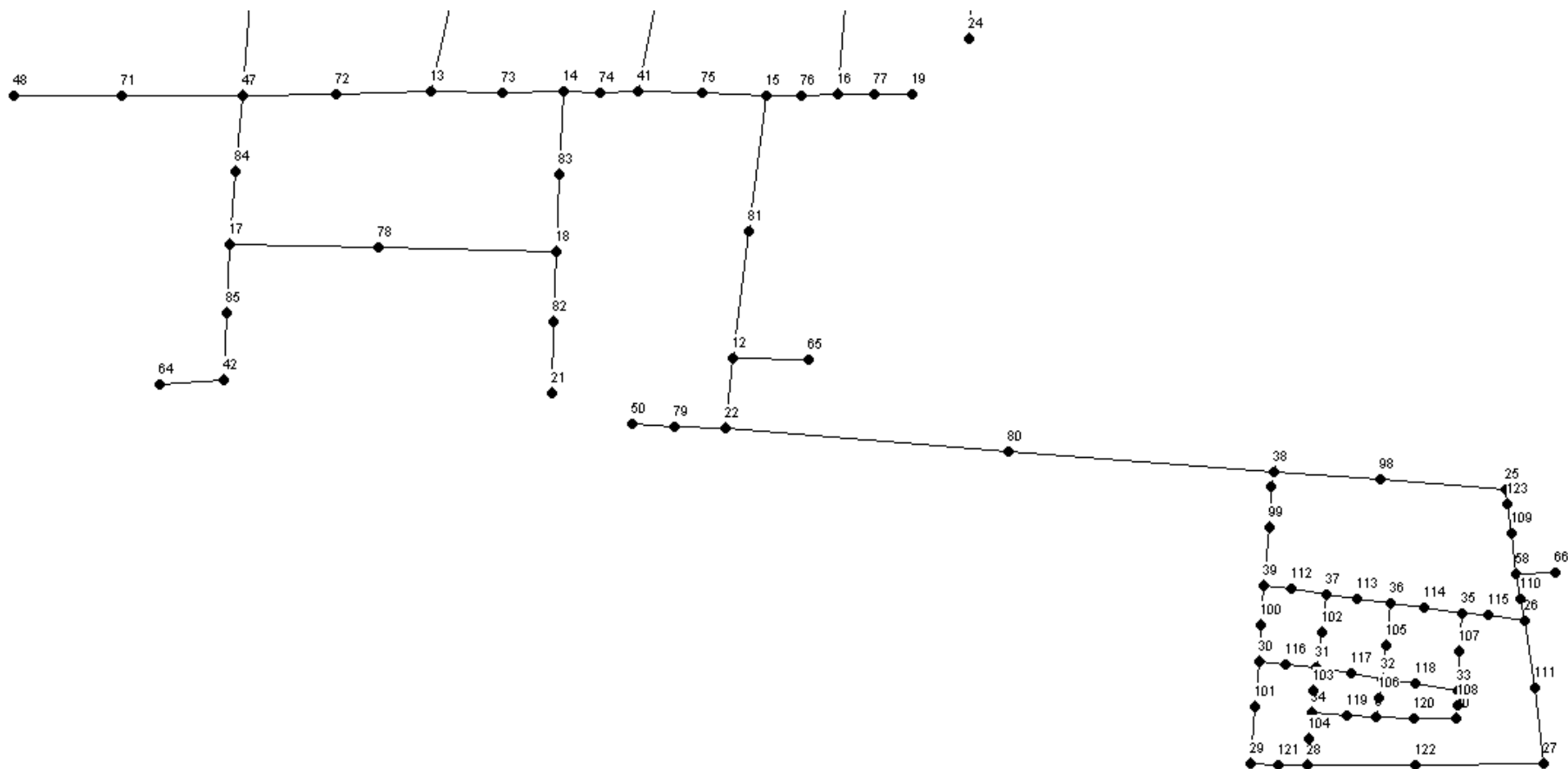
(a) Visão geral

Figura 5.14. Esquema de nós e trechos da rede de abastecimento de água modelada do município de Natal (Página 1 de 3)



(b) Detalhe dos Nós - Prancha 1

Figura 5.14. Esquema de nós e trechos da rede de abastecimento de água modelada do município de Natal (Página 2 de 3)



(c) Detalhe dos Nós - Prancha 2

Figura 5.14. Esquema de nós e trechos da rede de abastecimento de água modelada do município de Natal (Página 3 de 3)

Tabela 5.10. Dados relativos aos nós da rede de abastecimento de água modelada do município de Natal

Id Nó	Cota (m)	Consumo (L/s)	Id Nó	Cota (m)	Consumo (L/s)	Id Nó	Cota (m)	Consumo (L/s)
2	44,72	0,104	43	44,31	0,335	84	45,2	0,015
3	44,66	0,028	44	41,48	0,12	85	41,7	0,011
4	44,95	0,001	45	38,77	0,001	86	51,2	0,03
5	52,04	0,172	46	45,14	0,153	87	53,2	0,138
6	47,08	0,172	47	49	0,094	88	54,7	0,208
7	47,71	0,038	48	43,35	0,028	89	51,7	0,038
8	47	0,106	49	45,26	0,449	90	53,2	0,069
9	40,21	0,066	50	46,7	0,047	91	47,2	0,051
10	56,09	0,135	51	39	0,095	92	50,2	0,439
11	46,49	0,206	52	45,2	0,028	93	46,2	0,009
12	49,5	0,095	53	56,53	0,577	94	51,7	0,135
13	50,12	0,173	54	56,51	0,245	95	49,7	0,127
14	51,51	0,057	55	54,38	0,197	96	49,2	0,255
15	53,19	0,182	56	52	0,03	97	41,8	0,095
16	53,02	0,132	57	47,2	0,036	98	43,7	0,195
17	43,09	0,054	58	43,01	0,015	99	45,7	0,038
18	47,37	0,094	59	40	0,001	100	46,7	0,047
19	50,44	0,03	60	53	0,001	101	47,2	0,061
20	43,7	0,066	61	57,53	0,001	102	45,7	0,033
21	44,57	0,042	62	57,51	0,001	103	46,7	0,028
22	48,42	0,496	63	55,38	0,001	104	47,2	0,014
23	42,73	0,116	64	42	0,001	105	45,2	0,048
24	50,87	0,255	65	50,5	0,001	106	45,8	0,001
25	41,17	0,195	66	44,01	0,001	107	45,2	0,01
26	43,36	0,142	67	45,7	0,043	108	46,2	0,01
27	46,31	0,197	68	44,7	0,015	109	42,2	0,016
28	47,9	0,088	69	42,8	0,066	110	43,2	0,001
29	47,83	0,061	70	48,2	0,12	111	44,7	0,122
30	46,72	0,125	71	48,2	0,028	112	45,7	0,019
31	46,4	0,08	72	49,2	0,022	113	45,2	0,033
32	46,2	0,095	73	50,7	0,012	114	44,7	0,073
33	46	0,067	74	51,7	0,021	115	43,7	0,02
34	47,1	0,07	75	52,7	0,054	116	46,7	0,019
35	44,2	0,103	76	53,2	0,033	117	46,2	0,001
36	44,68	0,155	77	52,2	0,03	118	46,2	0,047
37	45,45	0,086	78	45,2	0,028	119	46,7	0,028
38	44,95	0,682	79	47,2	0,047	120	47,2	0,079
39	46,08	0,104	80	49,8	0,449	121	48,2	0,001
40	46,4	0,088	81	50,7	0,095	122	47,2	0,074
41	52,25	0,282	82	46,7	0,042	123	42,2	0,016
42	41	0,011	83	49,2	0,022			

Tabela 5.11. Dados relativos aos trechos da rede de abastecimento de água modelada do município de Natal

Id Trecho	Nó Inicial	Nó Final	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Id Trecho	Nó Inicial	Nó Final	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)
1	6	7	16	75	68	47	71	35	75
2	7	57	24	75	69	58	66	1	100
3	7	89	50	75	70	71	48	35	75
4	89	54	69	75	71	13	72	37	75
5	56	86	40	75	72	72	47	28	75
6	64	42	1	100	73	13	73	20	75
7	86	47	25	75	74	73	14	26	75
8	97	51	44	75	75	14	74	13	75
9	94	10	45	75	76	74	41	14	75
10	38	98	30	60	77	41	75	20	75
11	98	25	50	60	78	75	15	24	75
12	39	112	11	50	79	76	15	13	75
13	112	37	11	50	80	16	76	13	75
14	83	14	30	75	81	16	77	10	75
15	12	65	1	100	82	77	19	10	75
16	4	99	20	50	83	78	18	40	75
17	37	113	11	50	84	17	78	70	75
18	12	22	15	75	85	22	79	15	60
19	113	36	12	50	86	79	50	15	60
20	36	114	4	50	87	22	80	100	60
21	114	35	20	50	88	80	38	90	60
22	35	115	15	75	89	23	91	69	75
23	115	26	7	50	90	91	5	75	75
24	30	116	11	50	91	49	92	48	75
25	116	31	11	50	92	92	53	87	75
26	31	117	17	50	93	49	93	5	75
27	46	97	44	75	94	93	2	10	75
28	2	20	70	75	95	6	94	55	75
29	20	23	34	75	96	11	95	50	75
30	2	52	30	75	97	95	55	90	75
31	3	6	15	75	98	43	96	83	75
32	117	32	6	50	99	96	24	80	75
33	32	118	8	50	100	55	90	20	75
34	52	3	21	75	101	90	16	39	75
35	118	33	18	50	102	53	87	40	75
36	34	119	11	50	103	87	13	50	75
37	119	8	11	50	104	54	88	47	75
38	8	120	14	50	105	88	41	43	75
39	120	40	14	50	106	47	84	40	75
40	57	11	24	75	107	84	17	22	75
41	11	67	15	75	108	17	85	13	75
42	29	121	10	50	109	85	42	13	75
43	121	28	10	50	110	18	83	30	75
44	28	122	38	50	111	18	82	12	75
45	122	27	45	50	112	82	21	16	75
46	1	49	60	100	113	15	81	60	75
47	99	39	20	50	114	81	12	31	75
48	67	46	13	75	115	31	103	5	75
49	51	45	40	75	116	103	34	10	50
50	46	68	6	75	117	34	104	4	50
51	68	43	7	75	118	104	28	14	50
52	39	100	18	50	119	36	105	18	50
53	100	30	8	50	120	105	32	8	50
54	30	101	12	50	121	32	106	7	50
55	101	29	24	50	122	106	8	7	50
56	43	69	22	75	123	35	107	14	50
57	37	102	8	50	124	107	33	12	50
58	5	56	25	75	125	33	108	5	50
59	102	31	18	50	126	108	40	7	50
60	69	9	22	75	127	123	109	11	50
61	5	70	40	75	128	109	58	20	50
62	51	59	1	100	129	26	111	20	50
63	56	60	1	100	130	111	27	30	50
64	53	61	1	100	131	58	110	4	50
65	54	62	1	100	132	110	26	5	50
66	55	63	1	100	133	25	123	10	50
67	70	44	35	75	134	38	4	10	50

* Rugosidade (ϵ): 0,02 mm

Tabela 5.12. Dados relativos à EE da rede de abastecimento de água modelada do município de Natal (Fonte: CAERN)

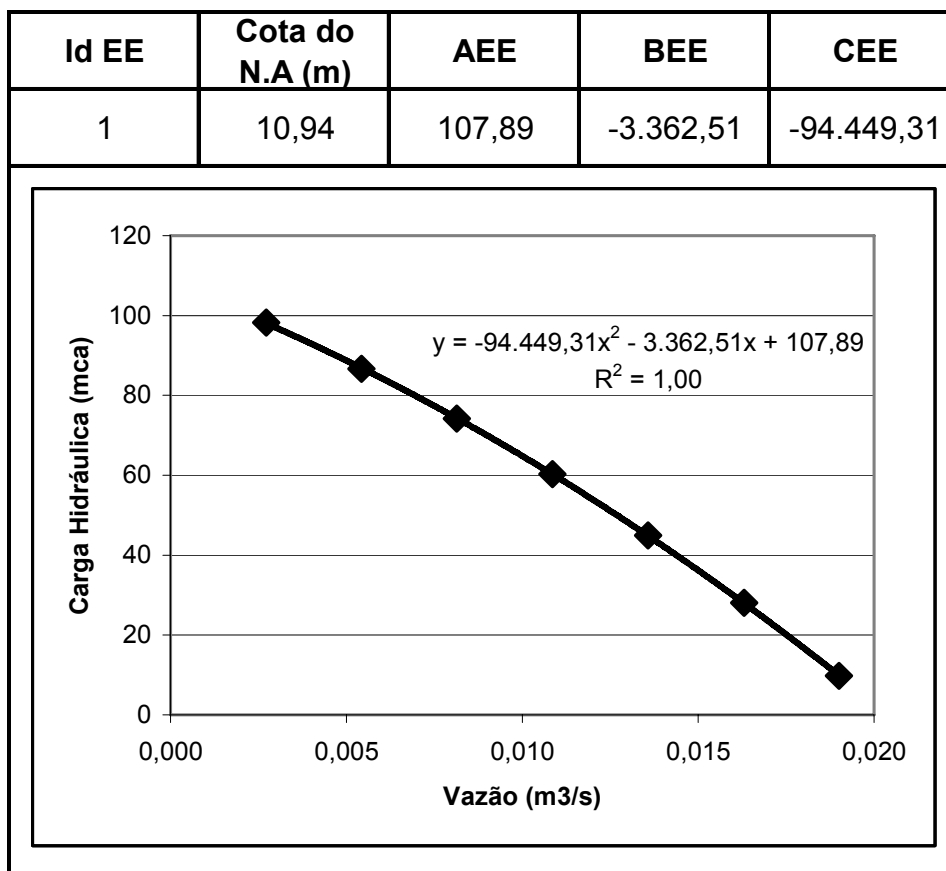
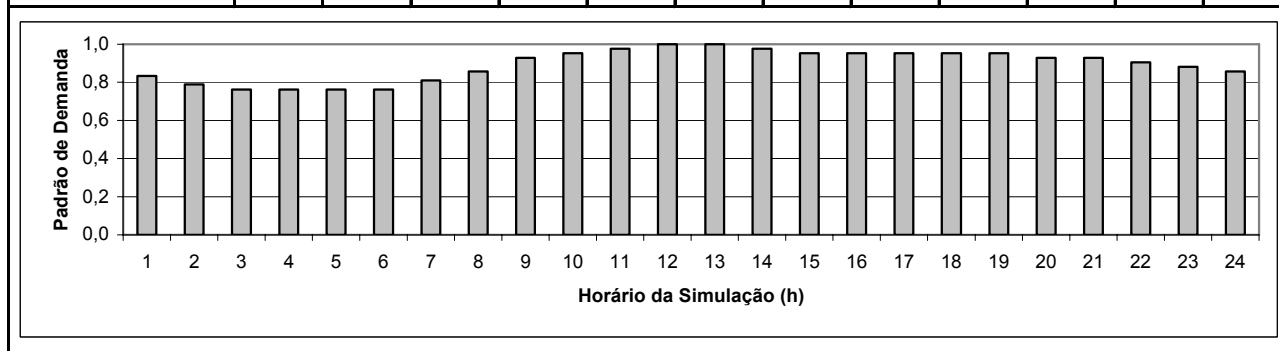


Tabela 5.13. Dados relativos aos padrões de consumo da rede de abastecimento de água modelada do município de Natal (Fonte: CAERN)

Horário da Simulação (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Padrão de demanda	0.833	0.788	0.762	0.762	0.762	0.762	0.809	0.857	0.929	0.952	0.976	1,00
Horário da Simulação (h)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Padrão de demanda	1,00	0.976	0.952	0.952	0.952	0.952	0.952	0.929	0.929	0.905	0.881	0.857



Foram realizadas simulações com o MOC considerando diferentes valores da celeridade padrão: 25 m/s, 100 m/s, 1000 m/s e, em seguida, realizadas comparações com os resultados do EPANET, conforme ilustra a Tabela 5.14.

Observou-se que os resultados da simulação do MOC que utilizou como valor da celeridade padrão 25 m/s apresentaram-se significativamente diferentes das soluções do EPANET, sendo que o erro relativo máximo dos valores de pressão (no primeiro horário da simulação) foi de -82,3% e o médio de -52,3%.

Já em relação às simulações do MOC utilizando celeridade padrão de 100 m/s e 1.000 m/s os valores foram praticamente iguais. Em comparação aos resultados do EPANET, os erros relativos máximo e médio foram respectivamente 0,75% e 0,25%.

Assim, verificou-se que a celeridade padrão de 100 m/s é adequada como parâmetro numérico do MOC para o problema em questão. Este foi o valor adotado para prosseguir com as análises de desempenho e convergência do MOC.

Tabela 5.14. Resultados das Simulações (pressões nodais na primeira hora da simulação) no EPANET e no MOC considerando diferentes valores de celeridade

Id Nó	Pressão (mca)				Id Nó	Pressão (mca)			
	EPANET	MOC celeridade 25m/s	MOC celeridade 100m/s	MOC celeridade 1000m/s		EPANET	MOC celeridade 25m/s	MOC celeridade 100m/s	MOC celeridade 1000m/s
1*	-66,02	-58,97	-66,18	-66,19	63	18,85	11,07	19,03	19,03
2	30,98	23,59	31,16	31,16	64	32,81	25,15	32,99	32,99
3	30,4	22,83	30,60	30,57	65	22,65	14,63	22,83	22,83
4	23,84	14,95	24,03	24,03	66	24,42	15,43	24,61	24,61
5	22,98	15,38	23,16	23,16	67	28,72	20,99	28,89	28,90
6	27,79	20,17	27,98	27,97	68	29,7	21,97	29,87	29,88
7	26,99	19,33	27,19	27,17	69	31,59	23,85	31,80	31,77
8	21,37	12,36	21,56	21,56	70	26,82	19,21	26,99	26,99
9	34,18	26,44	34,40	34,36	71	26,67	19,03	26,85	26,85
10	18,78	11,19	18,82	18,94	72	25,67	18,03	25,85	25,85
11	27,95	20,22	28,13	28,13	73	24,09	16,43	24,26	24,26
12	23,65	15,63	23,83	23,83	74	22,9	15,21	23,08	23,08
13	24,75	17,11	24,92	24,92	75	21,65	13,90	21,83	21,83
14	23,18	15,50	23,35	23,35	76	20,97	13,17	21,15	21,15
15	20,97	13,17	21,15	21,15	77	21,98	14,18	22,16	22,16
16	21,16	13,36	21,34	21,34	78	29,55	21,88	29,73	29,73
17	31,72	24,06	31,90	31,90	79	25,8	17,75	25,98	25,98
18	27,35	19,68	27,53	27,53	80	20,8	12,31	20,99	20,99
19	23,74	15,94	23,92	23,92	81	22,79	14,84	22,97	22,97
20	31,79	24,34	31,96	31,97	82	28,02	20,35	28,20	28,20
21	30,15	22,48	30,33	30,33	83	25,5	17,83	25,68	25,68
22	24,58	16,53	24,76	24,76	84	29,63	21,98	29,81	29,81
23	32,66	25,18	32,83	32,84	85	33,11	25,45	33,29	33,29
24	23,5	15,74	23,68	23,66	86	23,71	16,08	23,89	23,89
25	27,46	18,53	27,65	27,65	87	21,86	14,28	22,03	22,03
26	25,03	16,04	25,22	25,22	88	19,84	12,13	20,01	20,02
27	22,06	13,06	22,25	22,25	89	22,94	15,26	23,14	23,12
28	20,47	11,47	20,66	20,66	90	21,01	13,22	21,19	21,19
29	20,54	11,54	20,73	20,73	91	28,01	20,47	28,18	28,19
30	21,66	12,67	21,85	21,86	92	25,54	18,16	25,70	25,71
31	21,97	12,98	22,16	22,16	93	29,76	22,45	29,94	29,94
32	22,17	13,16	22,36	22,36	94	23,17	15,57	23,25	23,33
33	22,37	13,36	22,56	22,56	95	24,66	16,91	24,84	24,84
34	21,27	12,27	21,46	21,46	96	25,18	17,44	25,37	25,36
35	24,18	15,19	24,37	24,37	97	32,6	24,87	32,77	32,78
36	23,69	14,70	23,89	23,89	98	25,07	16,18	25,26	25,26
37	22,93	13,94	23,13	23,13	99	22,91	13,97	23,10	23,10
38	23,93	15,07	24,12	24,12	100	21,7	12,71	21,89	21,89
39	22,35	13,38	22,55	22,55	101	21,18	12,19	21,37	21,36
40	21,97	12,96	22,16	22,16	102	22,68	13,69	22,87	22,87
41	22,26	14,55	22,44	22,44	103	21,67	12,68	21,86	21,86
42	33,81	26,15	33,99	33,99	104	21,17	12,17	21,36	21,36
43	30,08	22,35	30,26	30,26	105	23,17	14,16	23,36	23,36
44	33,54	25,93	33,71	33,71	106	22,57	13,56	22,76	22,76
45	35,63	27,88	35,81	35,81	107	23,17	14,17	23,36	23,36
46	29,26	21,53	29,43	29,44	108	22,17	13,16	22,36	22,36
47	25,87	18,23	26,05	26,05	109	26,32	17,36	26,52	26,52
48	31,52	23,88	31,70	31,70	110	25,21	16,22	25,40	25,40
49	30,83	23,55	31,00	31,01	111	23,68	14,68	23,87	23,87
50	26,3	18,25	26,48	26,48	112	22,71	13,72	22,90	22,90
51	35,4	27,65	35,58	35,58	113	23,18	14,19	23,37	23,37
52	30,12	22,63	30,32	30,30	114	23,67	14,68	23,87	23,87
53	18,69	11,16	18,87	18,87	115	24,68	15,69	24,87	24,87
54	18,06	10,36	18,24	18,24	116	21,68	12,68	21,87	21,87
55	19,85	12,07	20,03	20,03	117	22,17	13,16	22,36	22,36
56	22,98	15,36	23,16	23,16	118	22,17	13,16	22,36	22,36
57	27,37	19,67	27,56	27,55	119	21,67	12,66	21,86	21,86
58	25,42	16,43	25,61	25,61	120	21,17	12,16	21,36	21,36
59	34,4	26,65	34,58	34,58	121	20,17	11,17	20,36	20,36
60	21,98	14,36	22,16	22,16	122	21,17	12,17	21,36	21,36
61	17,69	10,16	17,87	17,87	123	26,38	17,43	26,57	26,57
62	17,06	9,36	17,24	17,24					

* Para o Nó 1 o valor apresentado é referente à perda de carga da bomba (mca)

Para melhor visualização dos resultados do EPANET e do MOC apresentam-se a seguir, nas Figuras 5.15 a 5.18, séries temporais dos valores de pressão (nós 49 e 38) e vazão (trecho 46 e 88) da rede simulada.

Destaca-se que o nó 49 e o trecho 46 estão localizados logo após a estação elevatória. Já o nó 38 e o trecho 88 estão localizados imediatamente antes da malha de nós concentrados no setor sudeste da rede (Figura 5.14).

Nos gráficos (Figuras 5.15 a 5.18) observa-se que a sobreposição das linhas quase não permite distinguir os valores do MOC e do EPANET, indicativo de que os resultados das simulações em ambos os modelos são compatíveis.

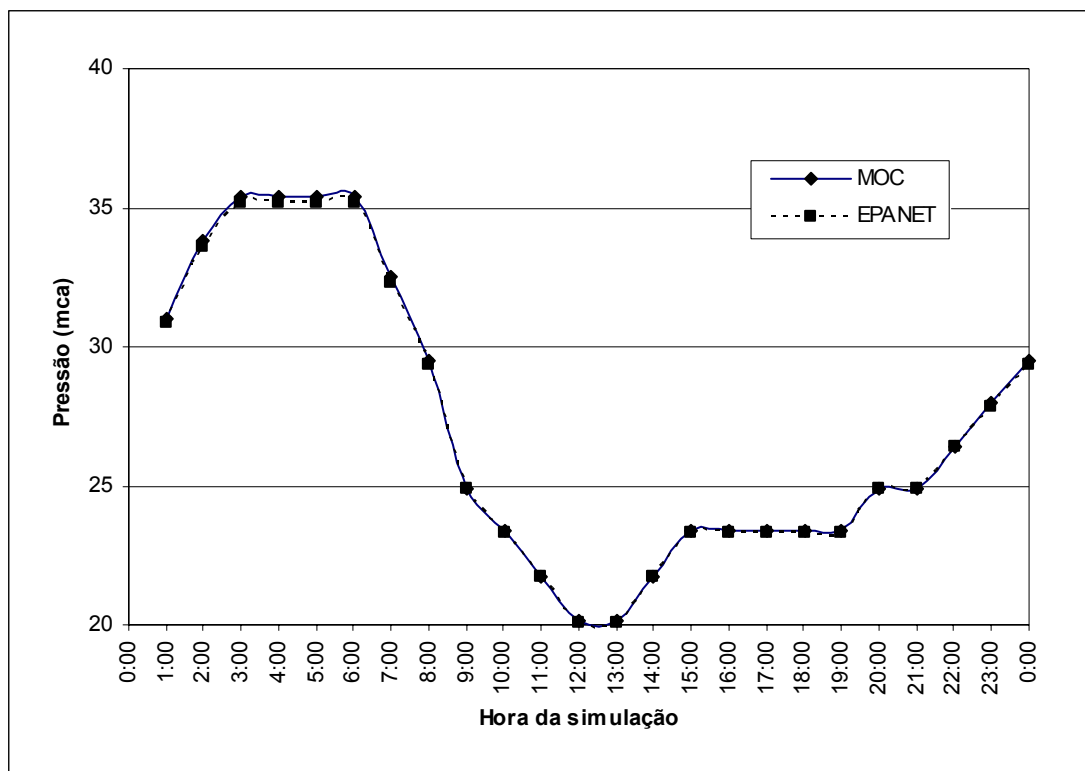


Figura 5.15. Série temporal dos valores de pressão no Nó 49

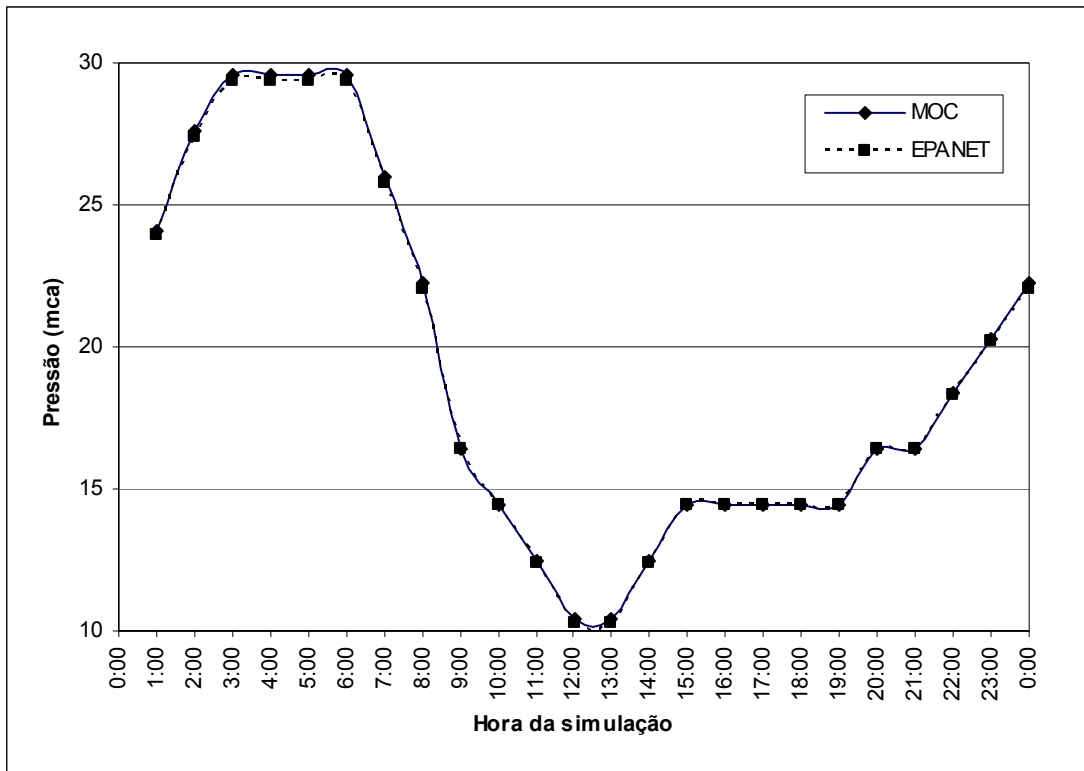


Figura 5.16. Série temporal dos valores de pressão no Nó 38

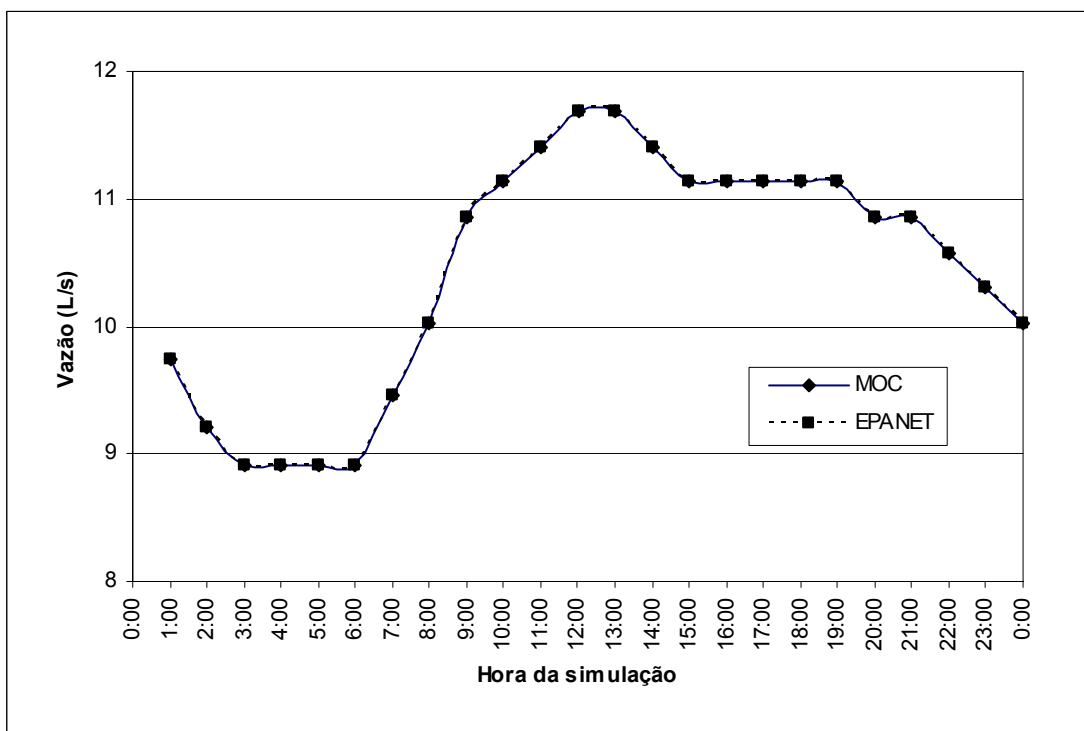


Figura 5.17. Série temporal dos valores de vazão no trecho 46

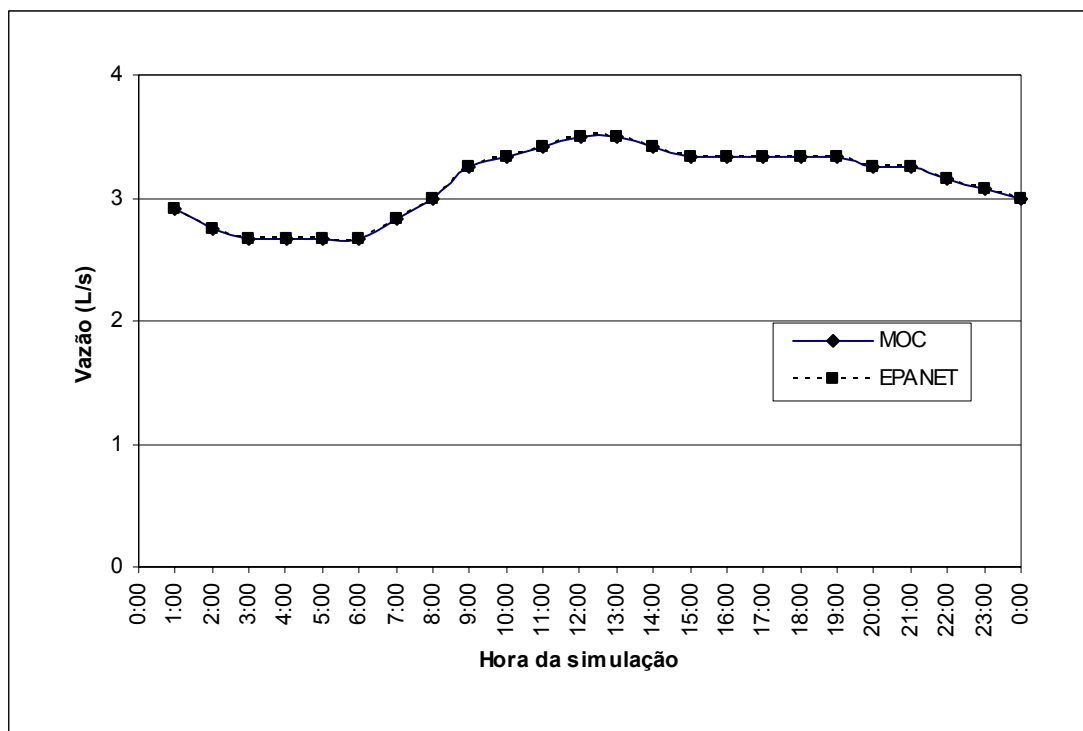


Figura 5.18. Série temporal dos valores de vazão no trecho 88

Destaca-se que o passo de tempo do cálculo numérico foi de 0,25291 s (celeridade padrão adotada = 100 m/s), resultando em 14.234 iterações para cada horário da simulação (3.600 s). O tempo total da simulação no MOC foi de 1 min e 26 s, enquanto no EPANET foi de menos de 1 s.

O tempo total da simulação elevado no MOC se deve ao fato da rede obter uma grande quantidade de tubulações e de comprimentos heterogêneos, o que resulta em um valor baixo para o passo de tempo do cálculo hidráulico e, conseqüentemente, um valor elevado do número de iterações. Uma forma de tratar este problema seria agrupar trechos de comprimento reduzido, redistribuindo as demandas dos nós, o que normalmente não provoca uma forte alteração na precisão da modelagem. Outro aspecto que impacta o tempo de processamento é o critério de parada do MOC, assunto que já foi discutido previamente nos itens 3.3 e 5.1.

De fato, a heterogeneidade das tubulações da rede impacta o processo de convergência, conforme já apontava Luvizotto Jr (1995), embora o resultado final do processo, que deve convergir para o valor associado ao regime permanente do sistema, apresentou resultados corretos, conforme foi possível concluir a partir de análises com os

resultados do modelo EPANET.

Gráficos do processo de convergência dos nós 49 e 38 e dos trechos 46 e 88, no primeiro horário da simulação, são apresentados a seguir nas Figuras 5.19 a 5.22. Conforme é possível observar, o processo de convergência, no caso de uma rede de abastecimento real que apresenta topologia complexa, requer um esforço computacional superior ao observado quando das análises das redes tomadas como exemplo nos itens 5.1 a 5.4, que tratavam-se de redes virtuais com configuração simplificada.

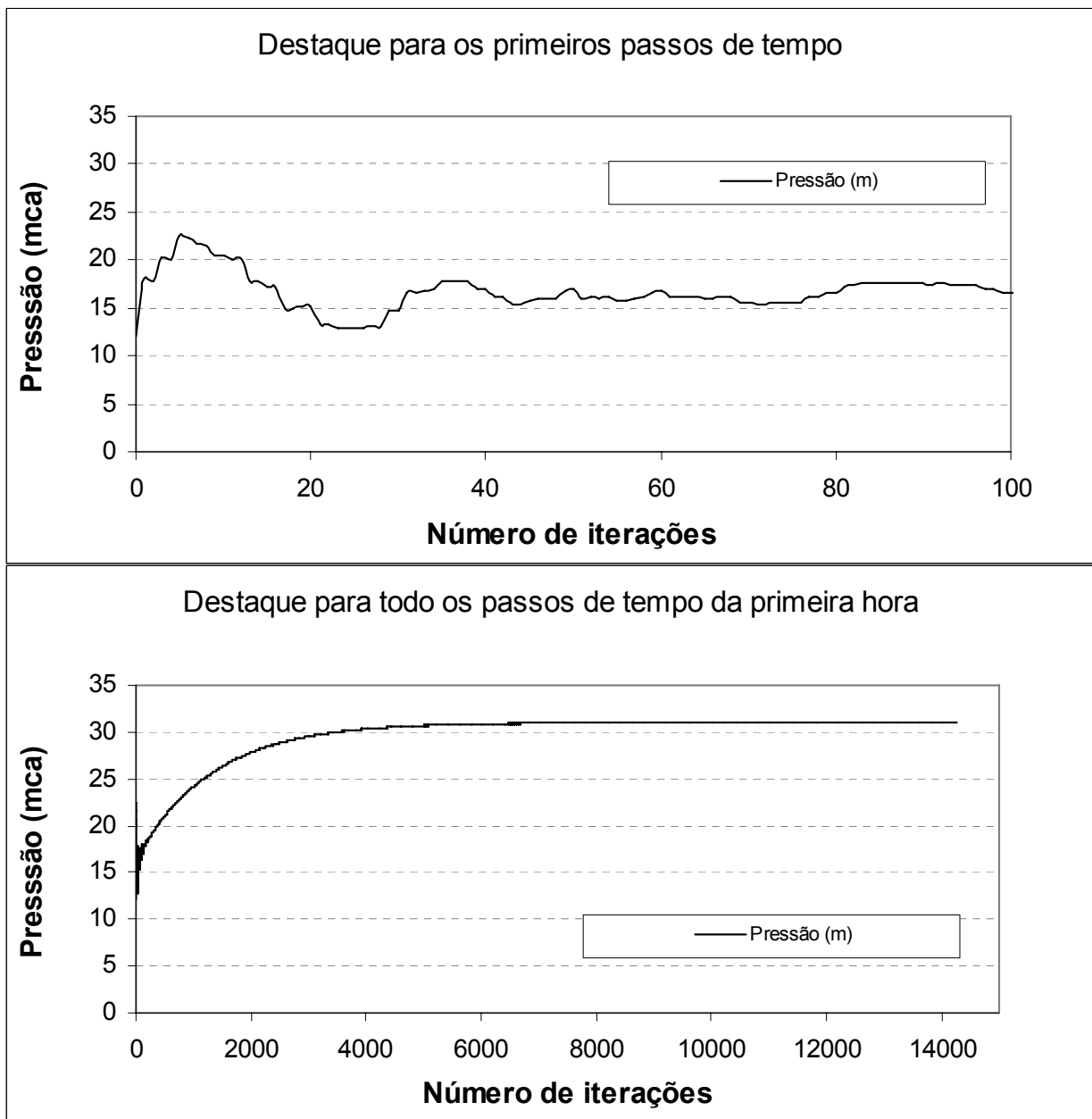


Figura 5.19. Convergência do MOC durante a primeira hora de simulação para o valor de pressão do Nó 49

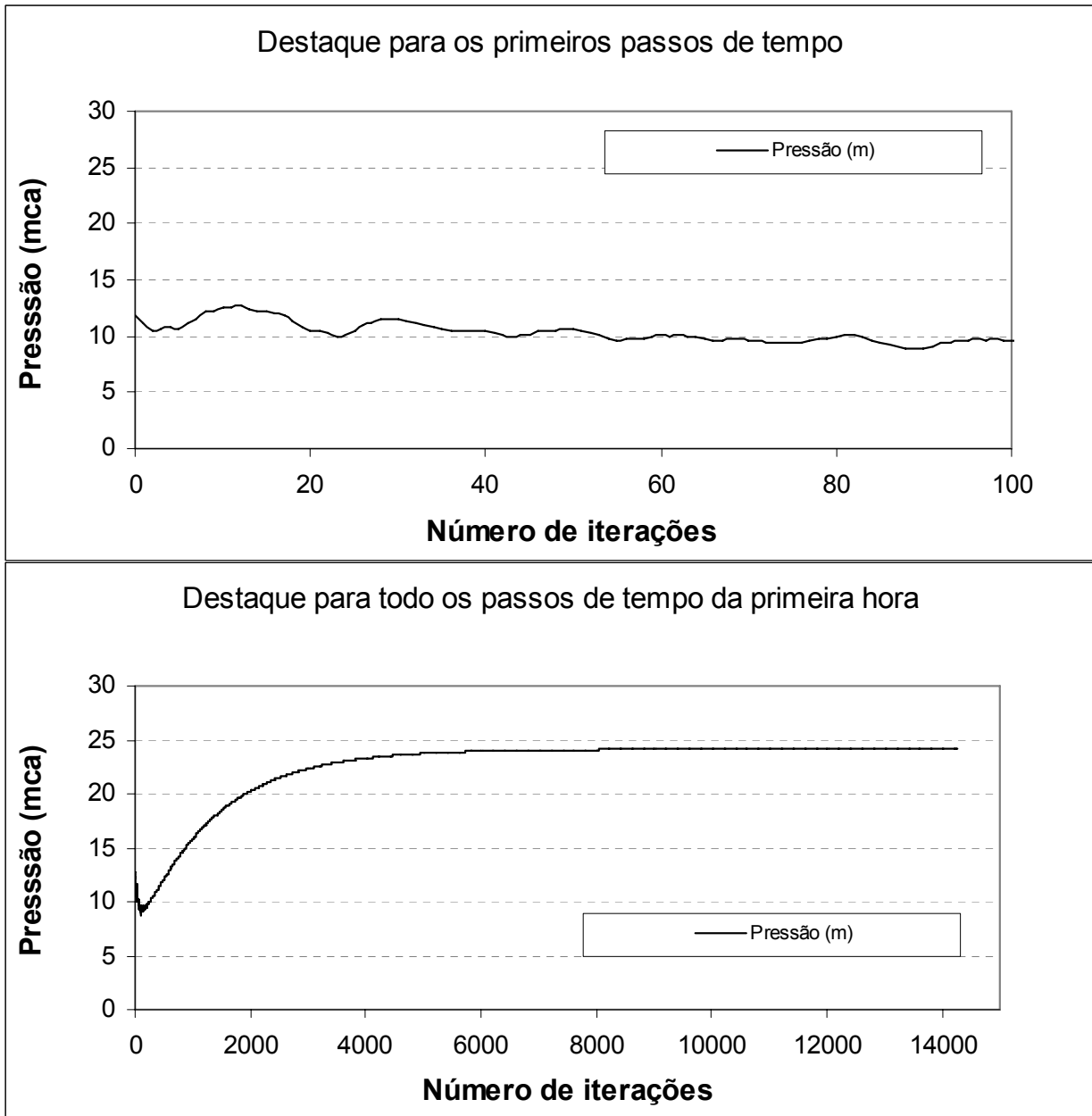


Figura 5.20. Convergência do MOC durante a primeira hora de simulação para o valor de pressão do Nó 38

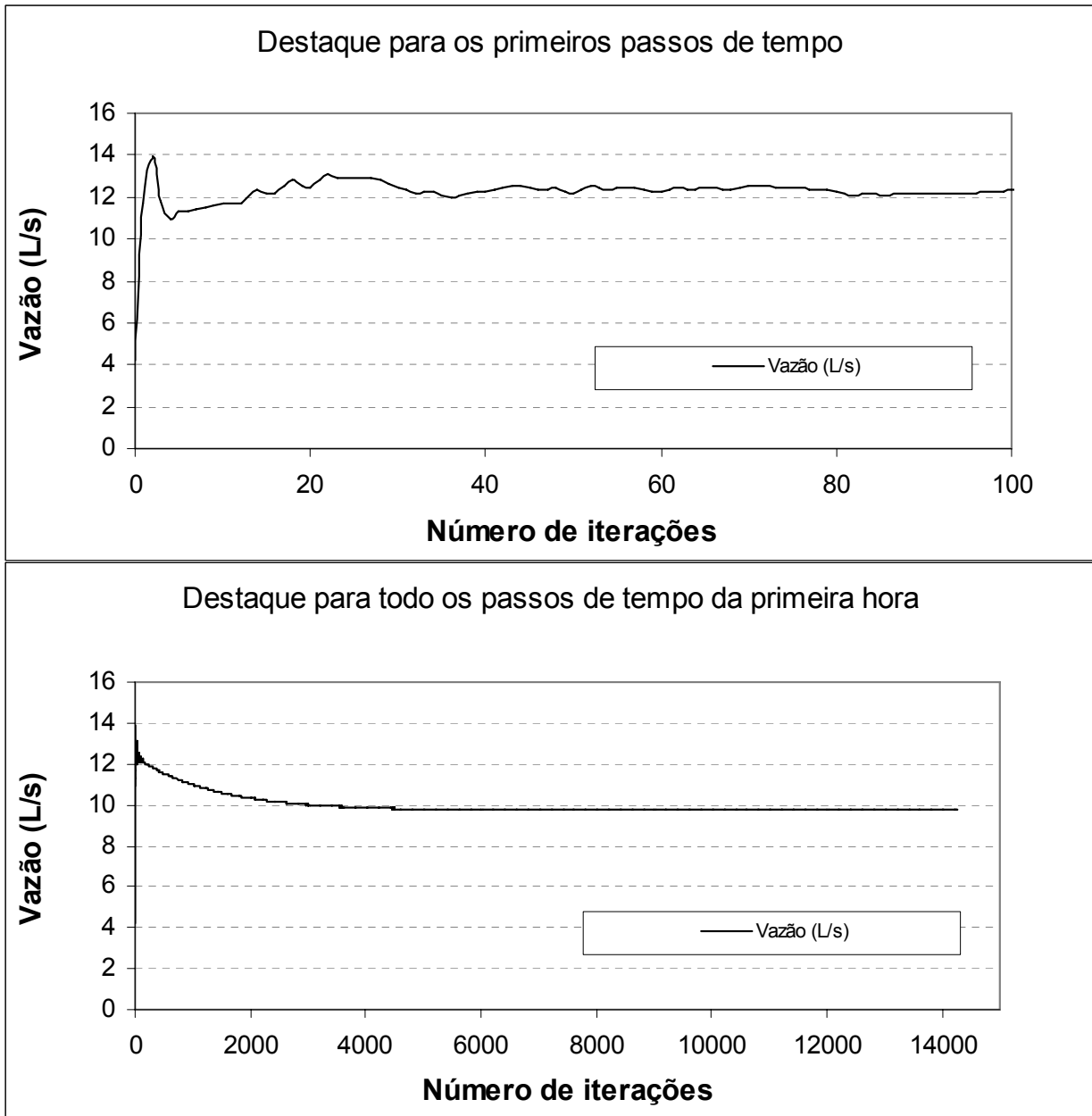


Figura 5.21. Convergência do MOC durante a primeira hora de simulação para o valor de vazão do Trecho 46

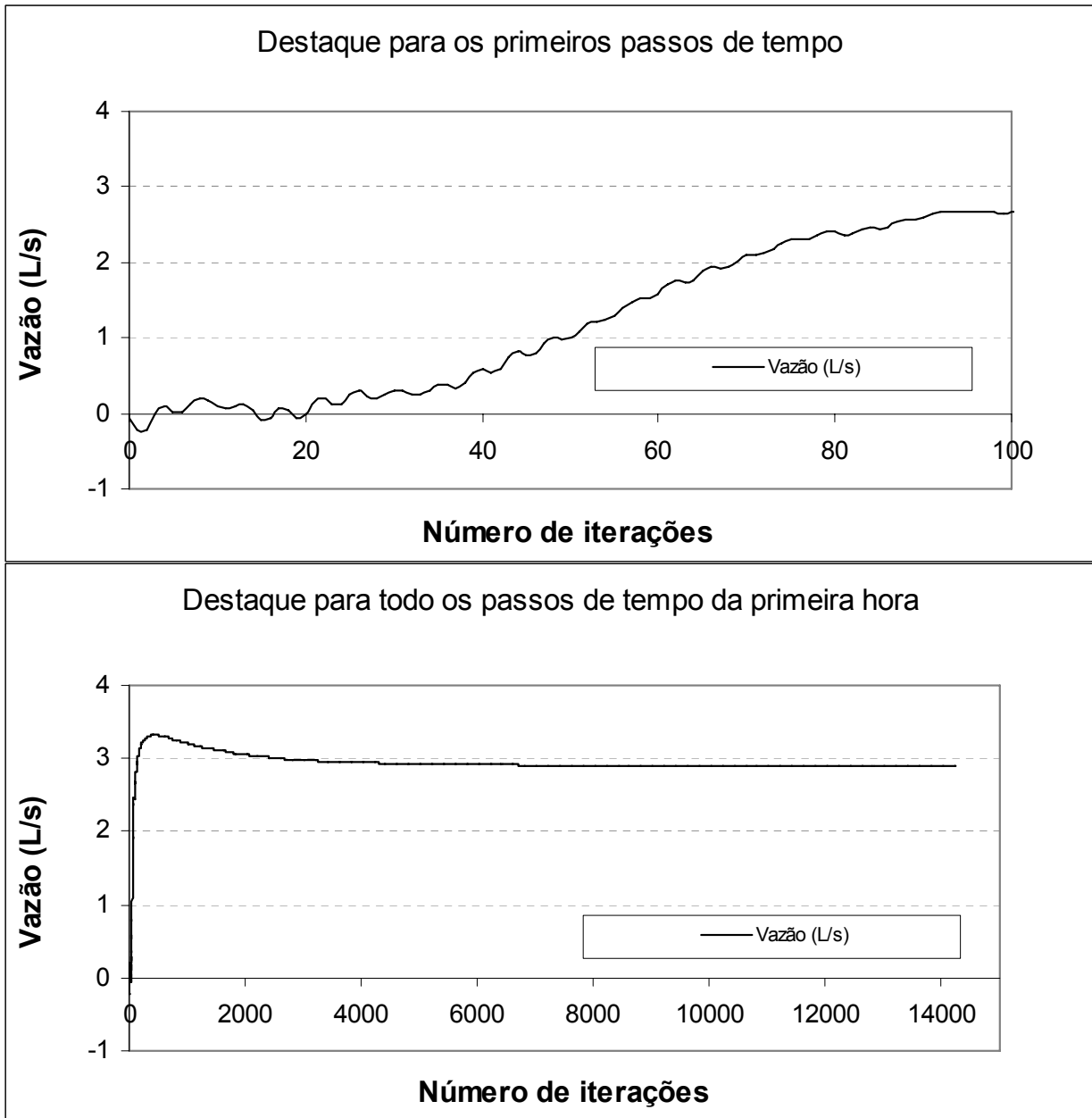


Figura 5.22. Convergência do MOC durante a primeira hora de simulação para o valor de vazão do Trecho 88

5.6. Modelagem de Caso Real 2

O poço BAN-I, localizado no município de Porto do Mangue – RN, e próximo a vários assentamentos rurais, foi perfurado no ano de 1985, dentro do programa Petrobras Fome Zero e Programa Molhar a Terra.

Em 1996, o poço foi cedido ao INCRA, que desenvolveu um projeto de sistema adutor dimensionado em função das disponibilidades de tubos da Petrobras de aço carbono de 3½” e 4½” de diâmetro. A vazão de projeto contemplava a irrigação de 70 ha e o atendimento de uma população de 2.163 habitantes, resultando no valor de 150 m³/h. As localidades contempladas foram Planalto, Canto Comprido, Canto das Pedras, Vassouras, Morada do Sol e Cavaco.

O sistema apresentava um primeiro trecho que bombeava água do poço BAN-I a um reservatório de 1.000 m³, enquanto o segundo trecho escoava água por gravidade para as comunidades, por meio de uma linha principal e de derivações que terminavam nas caixas d’água das comunidades. O sistema de distribuição a partir desses pontos (caixas d’água) era de responsabilidade das prefeituras.

O projeto foi parcialmente implantado até que em 2008 a Petrobras financiou melhorias no sistema adutor, contemplando a troca de equipamentos do sistema, como a estação elevatória do poço, as tubulações de aço carbono por tubulações de ferro fundido, no trecho bombeado, e de PEAD – Polietileno de Alta de Densidade, no trecho gravitário e a instalação de uma torre de resfriamento para reduzir a temperatura da água que emana do poço a uma temperatura de 65°C para 35°C.

Neste estudo, foi simulado o trecho do sistema adutor BAN-I entre o poço e o reservatório de 1.000 m³, que conta atualmente com uma tubulação de 250 mm de ferro fundido e se estende por 7 km, sendo a diferença de altitude de cerca de 90 m entre a cabeça do poço e o reservatório.

A bomba do poço está situada a uma profundidade de 250 m, tomando como referência a cabeça do poço. O ensaio de bombeamento realizado em 2004 pela Petrobras possibilitou determinar o nível estático do poço, situado a uma profundidade de 107 m e a vazão específica do poço, cujo valor é de 1,9 m³/h/m.

Um dos fatos que motivaram a realizar a simulação desta adutora foi que a mesma é equipada com um medidor de pressão na cabeça do poço, de modo que foi possível comparar os resultados do modelo com dados reais de campo, diferentemente das comparações realizadas nos demais exemplos, que foram com o modelo EPANET.

A simulação considerou o regime permanente. Um desenho esquemático da adutora é apresentado a seguir na Figura 5.23. A curva característica da estação elevatória é apresentada na Figura 5.24. Os resultados da simulação para nós e trechos são apresentados nas Tabelas 5.15 e 5.16. Já a Figura 5.25 apresenta o gráfico da linha piezométrica do sistema.

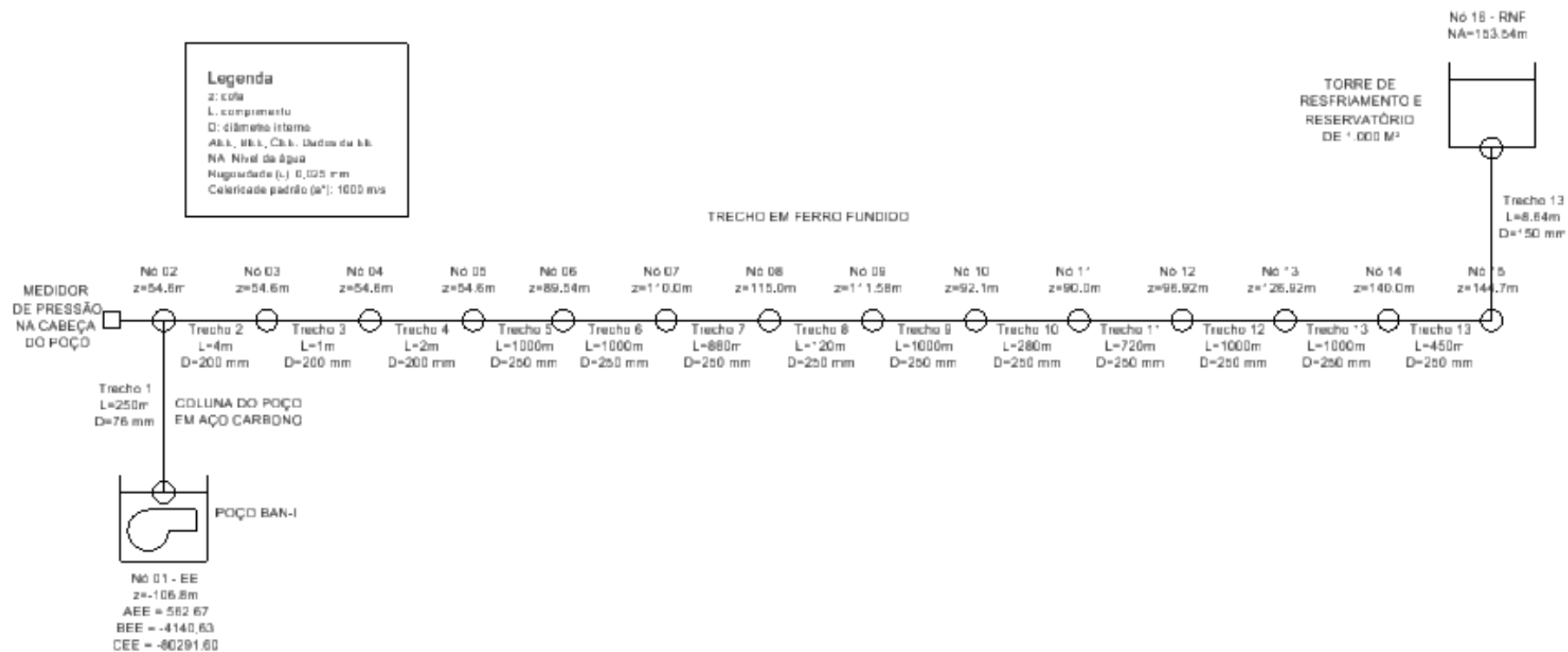


Figura 5.23. Configuração da adutora entre o poço BAN-I e o reservatório de 1.000 m³

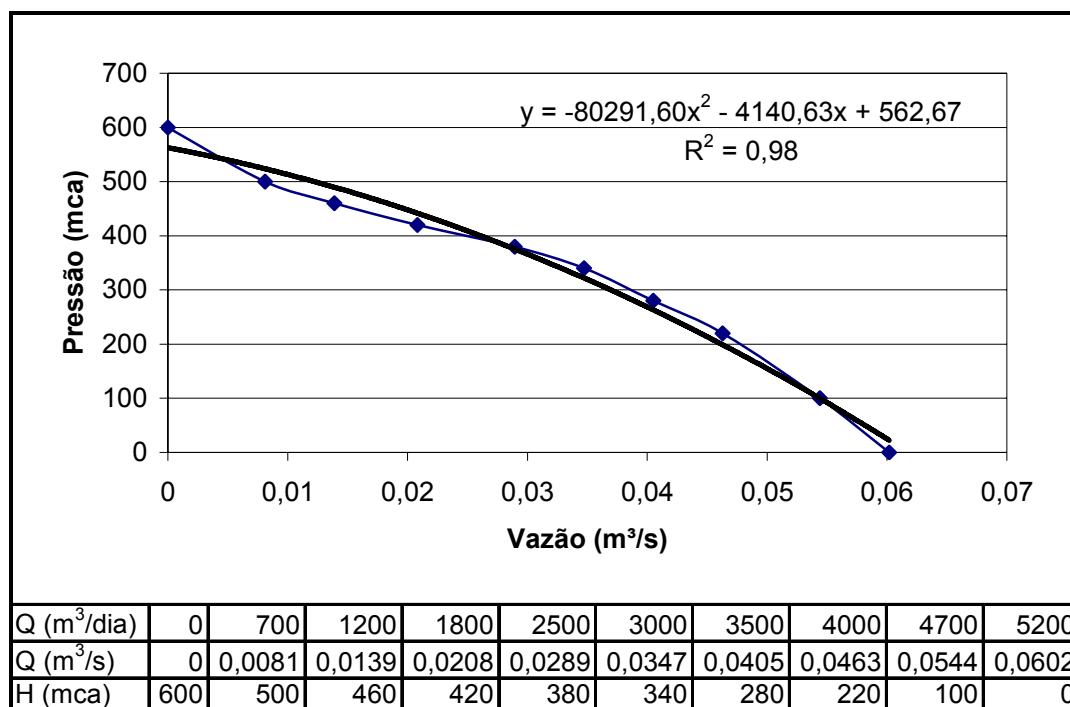


Figura 5.24. Dados da estação elevatória do poço BAN-I

Tabela 5.15. Dados e resultados das simulações dos nós

Nó	Cota (m)	Pressão (mca)	Carga Hidráulica (mca)
1	-106,8	379,4	272,6
2	54,6	107,7	162,3
3	54,6	107,7	162,3
4	54,6	107,7	162,3
5	54,6	107,7	162,3
6	89,54	71,6	161,1
7	110	49,9	159,9
8	115	43,9	158,9
9	111,58	47,2	158,8
10	92,1	65,5	157,6
11	90	67,2	157,2
12	96,92	59,5	156,4
13	126,92	28,3	155,2
14	140	14,0	154,0
15	144,7	8,8	153,5
16	153,34	0,0	153,3

Tabela 5.16. Dados e resultados das simulações dos trechos

Trecho	Diâmetro (mm)	Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)
1	76	28,5	6,28
2	200	28,5	0,91
3	200	28,5	0,91
4	200	28,5	0,91
5	250	28,5	0,58
6	250	28,5	0,58
7	250	28,5	0,58
8	250	28,5	0,58
9	250	28,5	0,58
10	250	28,5	0,58
11	250	28,5	0,58
12	250	28,5	0,58
13	250	28,5	0,58
14	250	28,5	0,58
15	150	28,5	1,61

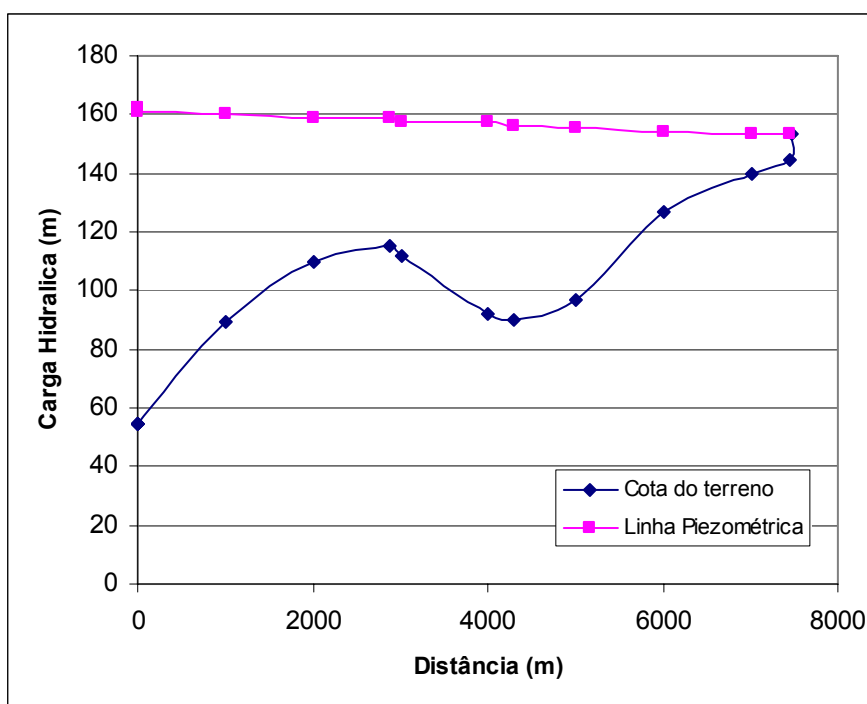


Figura 5.25. Gráfico da Linha Piezométrica na Adutora BAN-I (Nó 02 a Nó 16)

Conforme resultados da simulação, a vazão na adutora foi de 28,5 L/s, enquanto que a pressão na cabeça do poço (nó 2) foi de 107,7 mca. Este último resultado foi compatível com a leitura do medidor de pressão, cuja medição apontou o valor de 11 kgf/cm², cuja conversão resulta em 110 mca. A diferença entre simulado e observado foi de 2%, considerada satisfatória.

As Figuras 5.26 a 5.30 apresentam os registros fotográficos da adutora durante a pré-operação do sistema, ou seja, o primeiro enchimento da adutora e do reservatório após a implantação da tubulação de ferro fundido, e inclui a fotografia do momento em que foi realizada a medição utilizada como base de comparação com o MOC.



Figura 5.26. Cabeça do Poço e tubulação de ferro fundido no início da adutora



Figura 5.27. Medidor de pressão em três momentos: 1) com a bomba desligada (pressão nula); 2) durante o enchimento da adutora (pressão 8 kgf/cm²) e 3) durante o enchimento do reservatório, quando a pressão se estabilizou em 11 kgf/cm²



Figura 5.28. Final da adutora de ferro fundido, chegando à torre de resfriamento



Figura 5.29. Torre de Resfriamento e Reservatório de 1.000 m³



Figura 5.30. Adutora de PEAD no trecho gravitário a jusante do Reservatório

5.7. Otimizando a Operação de EE com AG

Foi realizada uma aplicação do algoritmo de otimização baseado em AG para minimizar custos energéticos na operação de redes de abastecimento considerando um sistema composto por 2 EE, 2 RNV, 12 pontos de consumo e 21 tubulações, conforme ilustra a Figura 5.31. A simulação considerou um período de 24 horas. Os padrões de demanda utilizados foram os mesmos do item 5.5 (Tabela 5.13).

A rede apresentada foi utilizada para avaliar aspectos relacionados ao desempenho do AG e o comportamento da função objetivo a partir de:

- Uso de diferentes critérios de tarifação das EEs;
- Variação dos valores do tamanho da população, taxa de mutação e número de gerações;

Para análise da fórmula de tarifação das EEs, foram considerados os critérios da tarifa convencional A e das tarifas horo-sazonal verde e azul. Para os valores associados às taxas dessas tarifas foram usados os preços referenciais da CAERN, apresentados anteriormente na Tabela 3.1.

No caso da tarifa convencional A, os custos associados ao consumo e à demanda são de 0,15 R\$/kWh e 28,72 R\$/KW, independentemente do horário. Para a tarifa horo-sazonal verde, os custos associados ao consumo são de 1,06439 R\$/kWh e 0,12705 R\$/kWh, respectivamente para horário de ponta e fora de ponta, e para demanda o valor é de 9,29 R\$/KW. Já em relação à tarifa horo-sazonal azul, os custos associados ao consumo são de 0,20841 R\$/kWh e 0,12705 R\$/kWh, respectivamente para horário de ponta e fora de ponta, e para demanda são de 36,86 R\$/kW e 9,29 R\$/KW. A configuração do AG utilizada para as simulações é apresentada a seguir na Tabela 5.17.

Os resultados da solução ótima encontrada pelo AG para os casos avaliados são apresentados a seguir nas Tabelas 5.18 a 5.20. Já os valores de pressão e vazão para os nós e trechos da rede nessas simulações encontram-se apresentados nos Anexos. Deve-se frisar que pelas características de potência e horário de funcionamento das EEs, o sistema seria enquadrado na tarifação horo-sazonal verde.

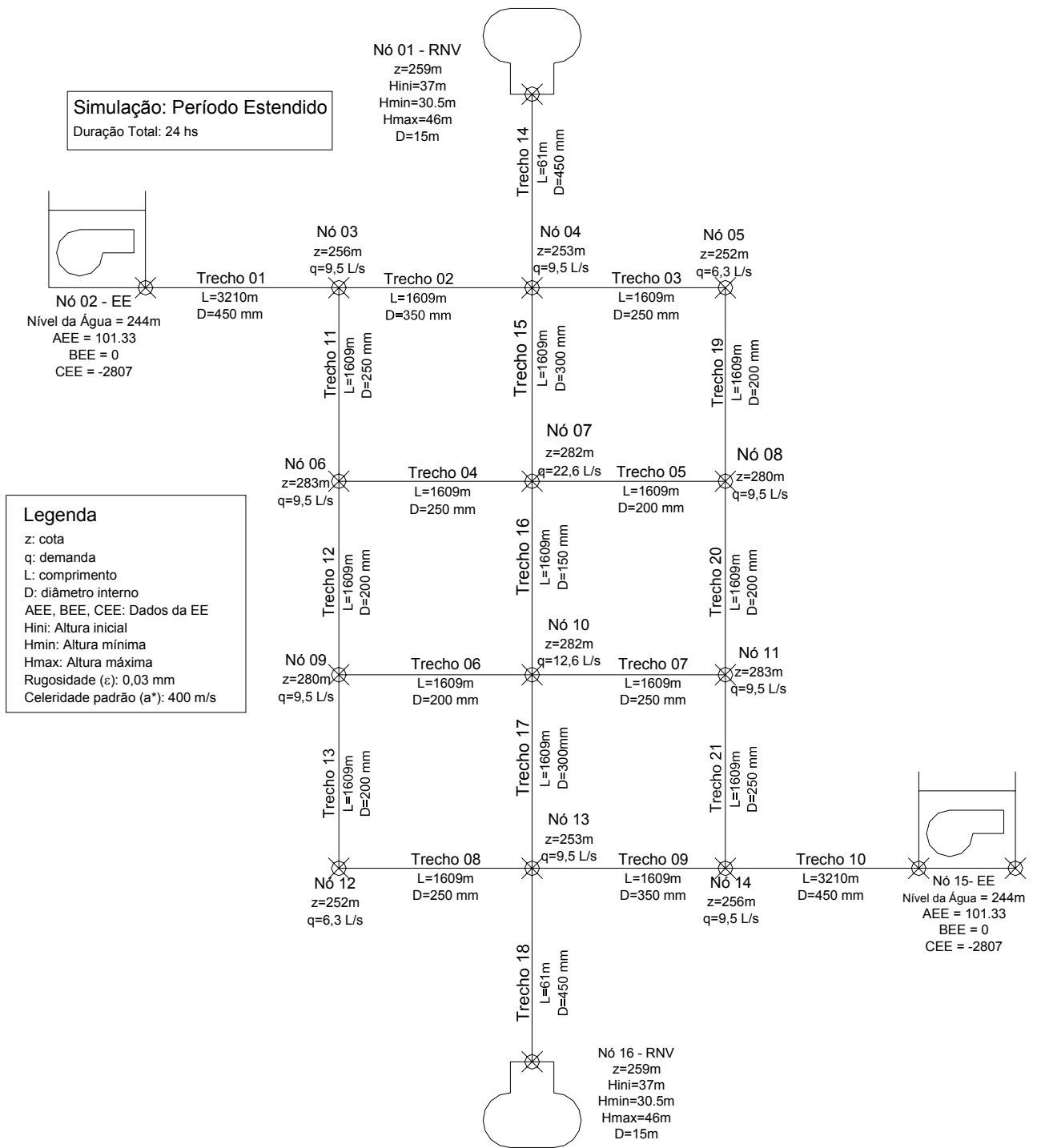


Figura 5.31. Configuração da rede utilizada para aplicação do algoritmo de otimização

Tabela 5.17. Configuração do AG para avaliar diferentes critérios de tarifação das EE

Tamanho da população:	30
Taxa de mutação:	2%
Número de gerações:	20
Pressão máxima admissível (mca):	100,00
Pressão mínima admissível (mca):	5,00
Velocidade máxima admissível (m/s):	3,00
Velocidade mínima admissível (m/s):	-3,00
Penalidade para violação de pressão admissível (R\$):	100,00
Penalidade para violação de velocidade admissível (R\$):	100,00
Penalidade para violação de nível da água em RNV (R\$):	1000,00
Penalidade para manobra liga/desliga em EE (R\$):	100,00
Rendimento das Estações Elevatórias	60%

Tabela 5.18. Resultados obtidos para a operação ótima das EEs considerando a tarifação convencional A

Horário da Simulação	EE N° 02			EE N° 15			Custo R\$		
	Pressão (mca)	Vazão (L/s)	Pot (kW)	Pressão (mca)	Vazão (L/s)	Pot (kW)	Energia EE N° 02	Energia EE N° 15	Penalidade Manobra
1	50,73	0,00	0,00	50,78	0	0,00	0,00	0,00	
2	49,74	0,00	0,00	49,81	0	0,00	0,00	0,00	
3	49,30	0,00	0,00	57,23	125,34	119,55	0,00	17,93	100,00
4	49,03	0,00	0,00	57,95	124,31	120,07	0,00	18,01	
5	48,89	0,00	0,00	58,56	123,44	120,47	0,00	18,07	
6	57,67	124,71	119,87	59,48	122,1	121,04	17,98	18,16	100,00
7	50,83	0,00	0,00	59,98	121,37	121,33	0,00	18,20	
8	50,60	0,00	0,00	60,38	120,79	121,55	0,00	18,23	
9	50,35	0,00	0,00	60,62	120,43	121,68	0,00	18,25	
10	50,13	0,00	0,00	60,82	120,13	121,78	0,00	18,27	
11	49,92	0,00	0,00	60,96	119,93	121,85	0,00	18,28	
12	58,00	124,25	120,10	53,63	0	0,00	18,02	0,00	100,00
13	58,83	123,04	120,65	52,57	0	0,00	18,10	0,00	
14	59,38	122,25	120,98	51,94	0	0,00	18,15	0,00	
15	59,79	121,64	121,22	51,51	0	0,00	18,18	0,00	
16	60,10	121,20	121,40	51,19	0	0,00	18,21	0,00	
17	60,33	120,85	121,52	50,95	0	0,00	18,23	0,00	
18	52,65	0,00	0,00	50,49	0	0,00	0,00	0,00	
19	50,99	0,00	0,00	49,80	0	0,00	0,00	0,00	
20	49,53	0,00	0,00	48,96	0	0,00	0,00	0,00	
21	48,20	0,00	0,00	47,96	0	0,00	0,00	0,00	
22	47,54	0,00	0,00	55,49	127,79	118,19	0,00	17,73	100,00
23	47,10	0,00	0,00	56,17	126,84	118,75	0,00	17,81	
24	46,51	0,00	0,00	48,22	0	0,00	0,00	0,00	
Sub-Total - Custos de Consumo e Penalidades							R\$ 126,86	R\$ 198,94	R\$ 400,00
Custo de Demanda Fora de Ponta (R\$)							R\$ 3.490,14	R\$ 3.499,45	-
Custo de Demanda de Ponta (R\$)							R\$ 0,00	R\$ 0,00	-
Total							R\$ 7.715,40		
Tarifa Horo-Sazona Azul				Consumo (R\$/kWh)	Ponta	0,15	Demanda (R\$/kW)	Ponta	28,72
					FPonta	0,15		FPonta	28,72

Tabela 5.19. Resultados obtidos para a operação ótima das EEs considerando a tarifação horo-sazonal verde

Horário da Simulação	EE Nó 02			EE Nó 15			Custo R\$		
	Pressão (mca)	Vazão (L/s)	Pot (kW)	Pressão (mca)	Vazão (L/s)	Pot (kW)	Energia EE Nó 02	Energia EE Nó 15	Penalidade Manobra
1	50,73	0,00	0,00	50,78	0	0,00	0,00	0,00	
2	49,74	0,00	0,00	49,81	0	0,00	0,00	0,00	
3	48,79	0,00	0,00	48,86	0	0,00	0,00	0,00	
4	47,83	0,00	0,00	47,90	0	0,00	0,00	0,00	
5	46,87	0,00	0,00	46,95	0	0,00	0,00	0,00	
6	54,62	129,00	117,43	46,58	0	0,00	14,92	0,00	100,00
7	55,25	128,13	117,99	46,32	0	0,00	14,99	0,00	
8	55,72	127,47	118,37	46,13	0	0,00	15,04	0,00	
9	56,46	126,43	118,98	55,01	128,46	117,77	15,12	14,96	100,00
10	57,31	125,23	119,62	56,49	126,39	119,00	15,20	15,12	
11	57,73	124,63	119,92	49,52	0	0,00	15,24	0,00	
12	58,50	123,52	120,43	57,57	124,86	119,80	15,30	15,22	100,00
13	58,88	122,98	120,67	50,75	0	0,00	15,33	0,00	
14	59,66	121,84	121,15	58,68	123,26	120,55	15,39	15,32	100,00
15	60,54	120,54	121,63	60,05	121,26	121,37	15,45	15,42	
16	60,99	119,88	121,86	53,57	0	0,00	15,48	0,00	
17	61,34	119,36	122,03	53,15	0	0,00	15,50	0,00	
18	53,93	0,00	0,00	52,51	0	0,00	0,00	0,00	
19	52,40	0,00	0,00	51,68	0	0,00	0,00	0,00	
20	51,04	0,00	0,00	50,72	0	0,00	0,00	0,00	
21	49,77	0,00	0,00	49,66	0	0,00	0,00	0,00	
22	48,59	0,00	0,00	48,58	0	0,00	0,00	0,00	
23	47,99	0,00	0,00	56,03	127,04	118,62	0,00	15,07	100,00
24	47,60	0,00	0,00	56,70	126,09	119,16	0,00	15,14	
Sub-Total - Custos de Consumo e Penalidades							R\$ 182,96	R\$ 106,25	R\$ 500,00
Custo de Demanda Fora de Ponta (R\$)							R\$ 1.133,62	R\$ 1.127,49	-
Custo de Demanda de Ponta (R\$)							R\$ 0,00	R\$ 0,00	-
Total							R\$ 3.050,32		
Tarifa Horo-Sazonal Azul				Consumo (R\$/kWh)	Ponta	1,06439	Demanda (R\$/kW)	Ponta	9,29
					FPonta	0,12705		FPonta	9,29

Tabela 5.20. Resultados obtidos para a operação ótima das EEs considerando a tarifação horo-sazonal azul

Horário da Simulação	EE Nó 02			EE Nó 15			Custo R\$		
	Pressão (mca)	Vazão (L/s)	Pot (kW)	Pressão (mca)	Vazão (L/s)	Pot (kW)	Energia EE Nó 02	Energia EE Nó 15	Penalidade Manobra
1	50,72	0,00	0,00	50,78	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	58,46	123,58	120,42	58,55	123,45	120,46	15,30	15,30	200,00
3	59,81	121,61	121,23	59,92	121,46	121,29	15,40	15,41	0,00
4	60,58	120,48	121,65	63,50	0	0,00	15,46	0,00	0,00
5	61,67	118,87	122,18	61,16	119,62	121,94	15,52	15,49	100,00
6	62,78	117,19	122,62	62,58	117,5	122,55	15,58	15,57	0,00
7	63,35	116,31	122,81	56,48	0	0,00	15,60	0,00	0,00
8	63,75	115,70	122,93	56,13	0	0,00	15,62	0,00	0,00
9	56,68	0,00	0,00	55,46	0	0,00	0,00	0,00	0,00
10	62,63	117,42	122,56	54,99	0	0,00	15,57	0,00	100,00
11	63,27	116,43	122,78	62,32	117,89	122,44	15,60	15,56	100,00
12	63,98	115,34	123,00	63,51	116,08	122,87	15,63	15,61	0,00
13	64,32	114,83	123,09	57,43	0	0,00	15,64	0,00	0,00
14	57,44	0,00	0,00	56,59	0	0,00	0,00	0,00	0,00
15	56,03	0,00	0,00	55,64	0	0,00	0,00	0,00	0,00
16	54,71	0,00	0,00	54,56	0	0,00	0,00	0,00	0,00
17	53,46	0,00	0,00	53,43	0	0,00	0,00	0,00	0,00
18	52,23	0,00	0,00	52,26	0	0,00	0,00	0,00	0,00
19	51,01	0,00	0,00	51,08	0	0,00	0,00	0,00	0,00
20	49,85	0,00	0,00	49,93	0	0,00	0,00	0,00	0,00
21	48,67	0,00	0,00	48,77	0	0,00	0,00	0,00	0,00
22	47,54	0,00	0,00	47,64	0	0,00	0,00	0,00	0,00
23	46,44	0,00	0,00	46,54	0	0,00	0,00	0,00	0,00
24	45,38	0,00	0,00	45,47	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Sub-Total - Custos de Consumo e Penalidades							R\$ 170,92	R\$ 92,94	R\$ 500,00
Custo de Demanda Fora de Ponta (R\$)							R\$ 1.143,51	R\$ 1.141,43	-
Custo de Demanda de Ponta (R\$)							R\$ 0,00	R\$ 0,00	-
Total							R\$ 3.048,80		
Tarifa Horo-Sazonal Azul				Consumo (R\$/kWh)	Ponta	0,20841	Demanda (R\$/kW)	Ponta	36,86
					FPonta	0,12705		FPonta	9,29

Verifica-se que no caso da tarifação convencional A, o valor ótimo foi de R\$7.715,40, sendo R\$126,86 o gasto relativo ao consumo na EE do Nó 02, R\$ 198,84 o gasto de consumo da EE do Nó 15 e R\$ 400,00 o custo associado às penalidades de acionamento das EE. Os custos associados à demanda foram de R\$3.490,14 e R\$3.499,45 respectivamente para a EE 02 e EE 15.

Na tarifação horo-sazonal verde, o valor ótimo foi de R\$3.050,32, sendo R\$182,96 o gasto relativo ao consumo na EE do Nó 02, R\$ 106,25 o gasto de consumo da EE do Nó 15 e R\$ 500,00 o custo associado às penalidades de acionamento das EE. Os custos associados à demanda foram de R\$1.133,62 e R\$1.127,49 respectivamente para a EE 02 e EE 15. Destaca-se que não houve bombeamento durante o horário de ponta.

Já no caso da tarifação horo-sazonal azul, o valor ótimo foi de R\$3.048,80, sendo R\$170,92 o gasto relativo ao consumo na EE do Nó 02, R\$ 92,94 o gasto de consumo da EE do Nó 15 e R\$ 500,00 o custo associado às penalidades de acionamento

das EE. Os custos associados à demanda foram de R\$1.143,51 e R\$1.143,43 respectivamente para a EE 02 e EE 15. Destaca-se que não houve bombeamento durante o horário de ponta.

A Figura 5.32 a seguir apresenta um gráfico ilustrando o valor da função objetivo ao final de cada geração durante o processo evolutivo do AG. Verifica que os valores de FO das tarifas horo-sazonal verde e azul são próximos, pois o AG procura evitar o bombeamento no horário de ponta, e no horário fora de ponta, as tarifas de consumo e demanda são iguais para o verde e o azul.

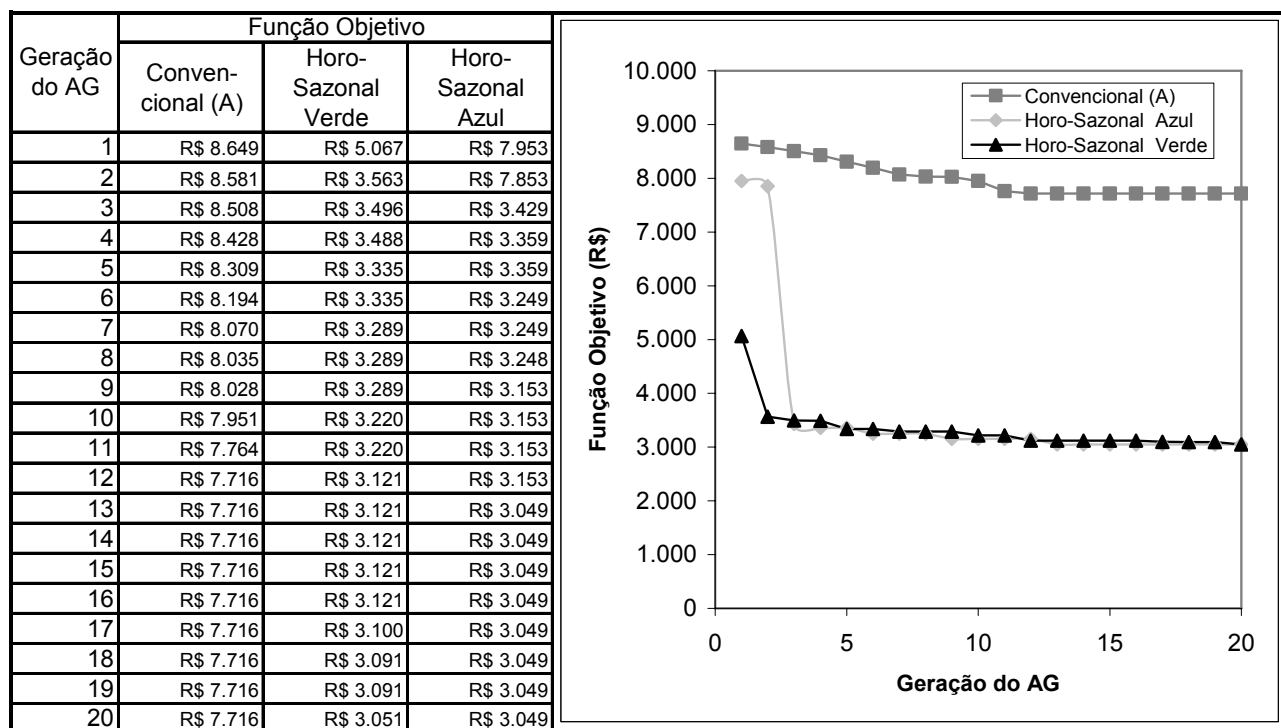


Figura 5.32. Valor da função objetivo ao final de cada geração durante o processo evolutivo do AG

Realizou-se em seguida uma nova simulação para a tarifa horo-sazonal verde, desta vez sem utilizar a opção de penalizar as manobras de EE. O valor da FO foi de R\$ 2.508,11, que é menor do que o valor obtido da Tabela 5.19 (R\$ 3.050,32) subtraído do custo associado às penalidades de manobra (R\$ 500,00), valor que resulta R\$ 2.550,32.

Todavia, apesar de ter sido obtido um valor mais otimizado da FO, as EEs apresentaram um comportamento de acionamento/desligamento mais repetitivo, o que é prejudicial para a vida útil das bombas. A Figura 5.33 ilustra a seqüência de operação nos dois casos. Observa-se que com a penalização, a quantidade de manobras do

conjunto de EEs foi de 5, enquanto que sem a penalização a quantidade de manobras do conjunto de EEs foi de 12.

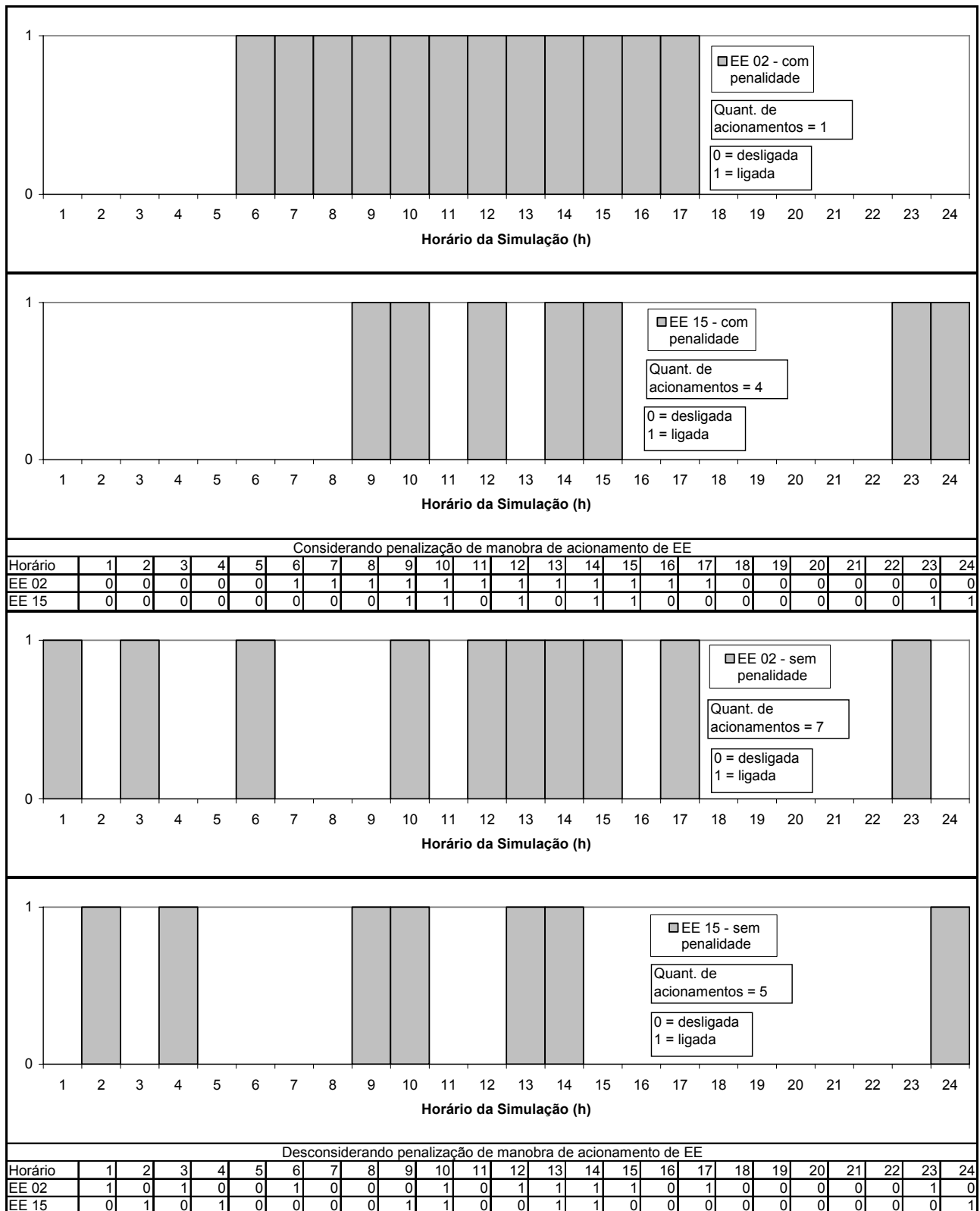


Figura 5.33. Seqüência de operação das EE sem e com a penalização por manobra

Visando verificar a influência dos parâmetros tamanho da população, taxa de mutação e número de gerações no processo evolutivo do AG, foram realizadas simulações considerando as configurações apresentadas na Tabela 5.21. Destaca-se que para o elitismo não se trabalhou com taxas, apenas manteve-se a solução mais forte de cada população preservada na geração seguinte.

Tabela 5.21. Configurações do AG para verificar a influência de parâmetros no seu desempenho

Parâmetro do AG	Variando a população			Variando a taxa de mutação			Variando o número de gerações		
	15	30	45	30	30	30	30	30	30
Tamanho da população:	15	30	45	30	30	30	30	30	30
Taxa de mutação:	2%	2%	2%	1%	2%	4%	2%	2%	2%
Número de gerações:	20	20	20	20	20	20	10	20	30
Pressão máxima admissível (mca):	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Pressão mínima admissível (mca):	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Velocidade máxima admissível (m/s):	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Velocidade mínima admissível (m/s):	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00
Violação de pressão admissível (R\$):	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Violação de velocidade admissível (R\$):	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Violação de nível de RNV (R\$):	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00
Manobra liga/desliga em EE (R\$):	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Rendimento das Estações Elevatórias	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%
Consumo Ponta (R\$/kWh)	1,06439	1,06439	1,06439	1,06439	1,06439	1,06439	1,06439	1,06439	1,06439
Consumo Fora de Ponta (R\$/kWh)	0,12705	0,12705	0,12705	0,12705	0,12705	0,12705	0,12705	0,12705	0,12705
Demanda (R\$/kW)	9,29	9,29	9,29	9,29	9,29	9,29	9,29	9,29	9,29

A Figura 5.34 apresenta o tempo de processamento e o valor da função objetivo ao final de cada geração considerando a variação do tamanho das populações em 15, 30 e 45. Para o tamanho da população igual a 15, o tempo gasto foi de 4 min e 19 s e a FO de R\$ 3.128; para a população igual a 30, o tempo foi de 8 min e 31 s e a FO de R\$ 3.051; para a população igual a 45, o tempo foi de 15min e 35 s e a FO de R\$3.083.

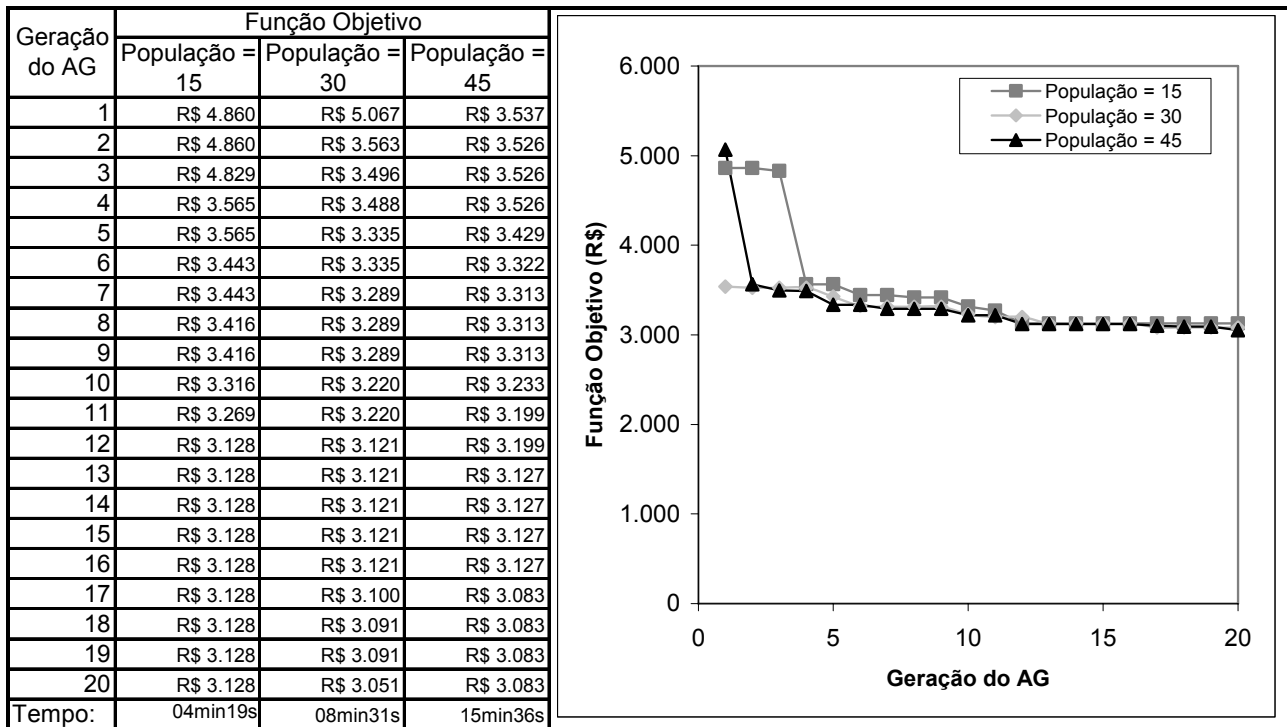


Figura 5.34. Tempo de processamento e o valor da função objetivo ao final de cada geração considerando a variação do tamanho das populações

A Figura 5.35 apresenta o tempo de processamento e o valor da função objetivo ao final de cada geração considerando a variação da taxa de em 1%, 2% e 4%. Para a taxa de mutação igual a 1%, o tempo gasto foi de 8 min e 33 s e a FO de R\$ 3.151; a taxa de mutação igual a 2%, o tempo foi de 8 min e 31 s e a FO de R\$ 3.051; a taxa de mutação igual a 4%, o tempo foi de 8min e 31 s e a FO de R\$3.040.

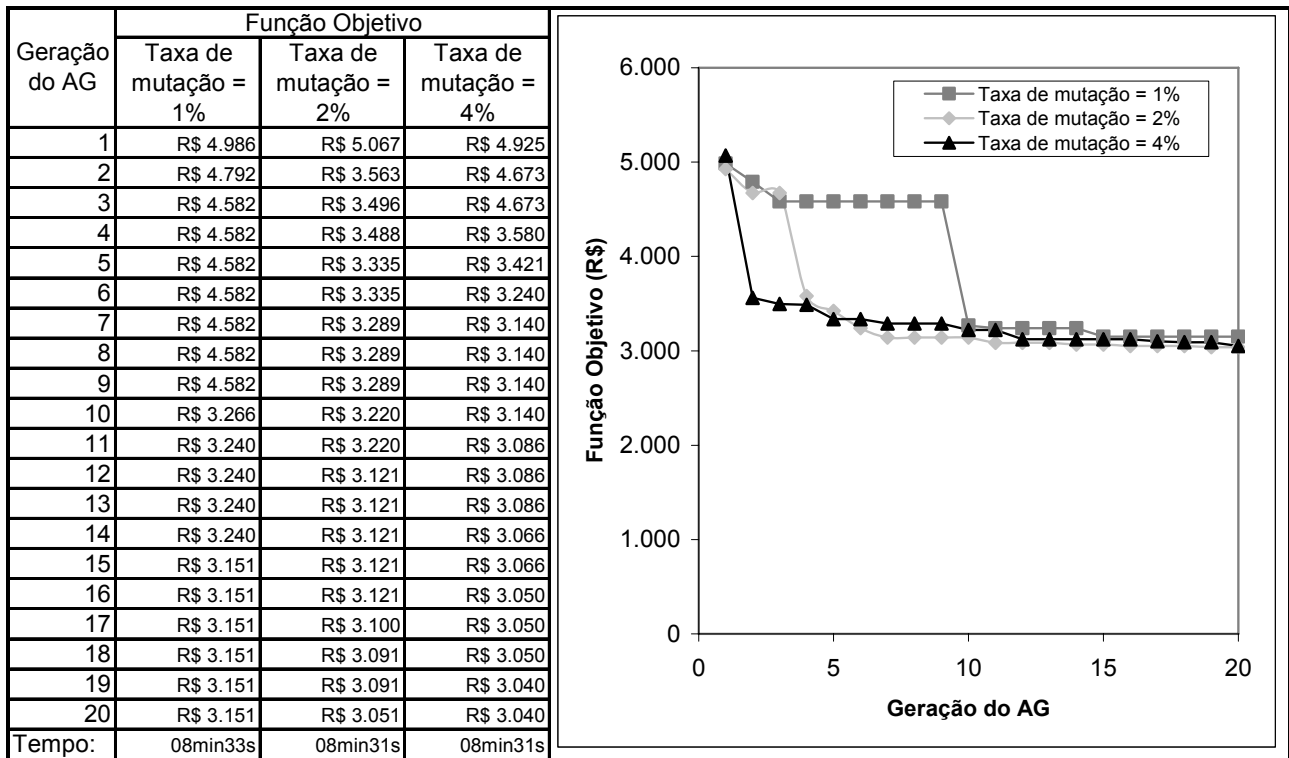


Figura 5.35. Tempo de processamento e o valor da função objetivo ao final de cada geração considerando a variação da taxa de mutação

A Figura 5.36 apresenta o tempo de processamento e o valor da função objetivo ao final de cada geração considerando a variação do número de gerações em 10, 20 e 30. Para o número de gerações igual a 10, o tempo gasto foi de 4 min e 12 s e a FO de R\$ 3.067; o número de gerações igual a 20, o tempo foi de 8 min e 31 s e a FO de R\$ 3.051; o número de gerações igual a 30, o tempo foi de 12min e 42 s e a FO de R\$3.020.

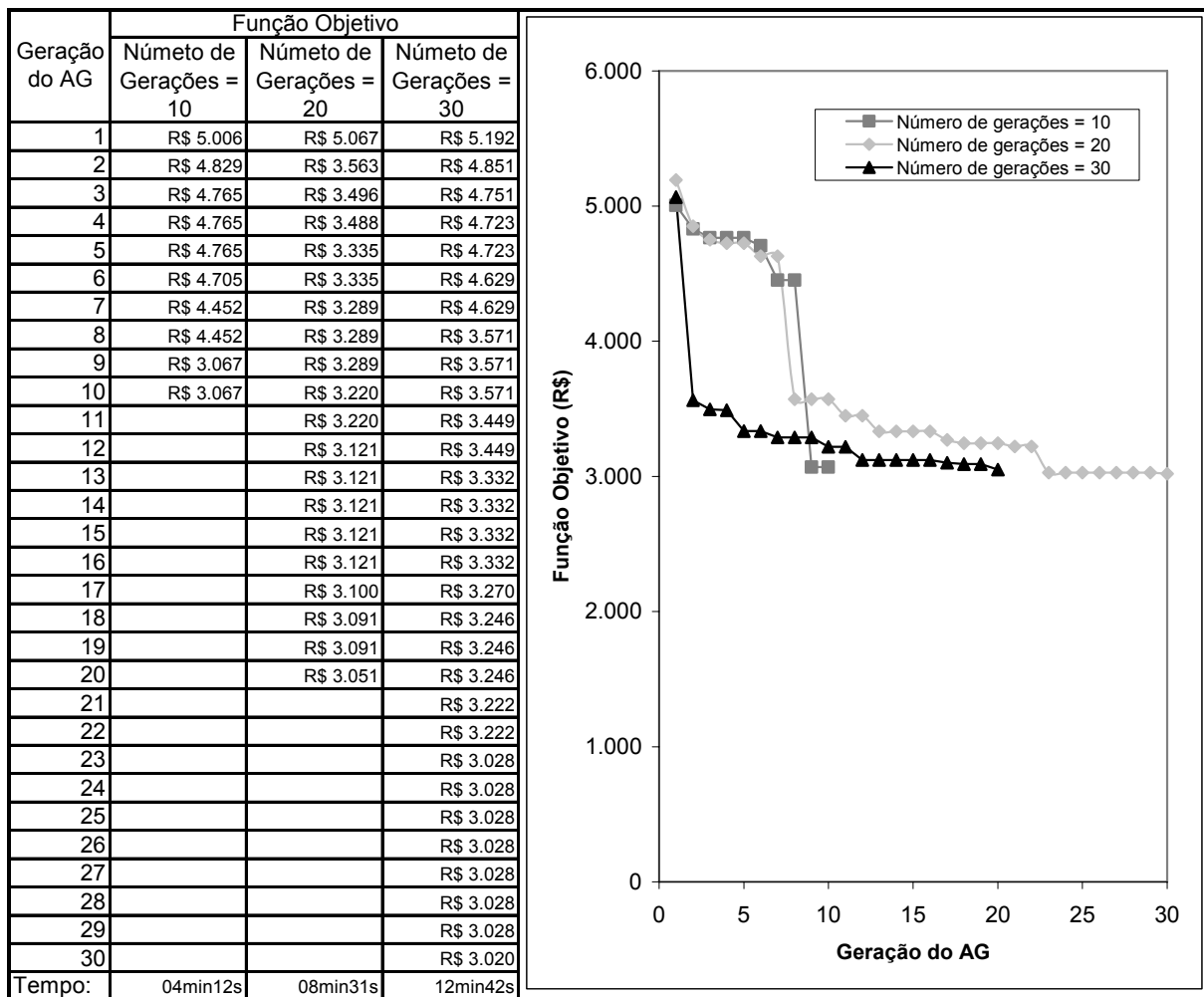


Figura 5.36. Tempo de processamento e o valor da função objetivo ao final de cada geração considerando a variação do número de gerações

Constatou-se que, dentro dos limites estudados, a variação dos parâmetros do AG resultou em uma diferença no valor da FO de 4,33%. O menor valor da FO foi de R\$ 3.020, quando se considerou o número de gerações igual a 30, enquanto o maior valor de R\$ 3.151, quando foi considerada a taxa de mutação igual a 1%.

Vale ressaltar que o valor da FO depende em parte de processos aleatórios. Todavia, sabe-se que quanto maior o número de gerações e o tamanho da população, maiores as chances de se encontrar valores mais próximos ao ótimo global. Já em relação à taxa de mutação, é mais difícil estabelecer uma relação. No estudo do problema específico, o aumento da taxa de mutação, dentro do limite estudado, resultou em melhora no desempenho do AG, entretanto, os percentuais de ganho foram pequenos e podem estar relacionados aos processos aleatórios.

Para obtenção de conclusões mais respaldadas sobre a influência dos parâmetros do AG no desempenho da FO, seria necessário trabalhar estatisticamente com um grande número de situações e outras configurações de redes de abastecimento. A análise de sensibilidade dos parâmetros do AG em relação ao desempenho da FO é um tema que já foi abordado em diversos estudos, inclusive nos que se encontram listados nas referências bibliográficas, mas, deve-se frisar, o objetivo do presente trabalho foi a implementação do algoritmo de otimização e sua aplicação em um caso hipotético, visando criar mais funcionalidade prática ao modelo hidráulico baseado no MOC.

Já em relação ao tempo de processamento, o valor variou de 04min e 12 s, na simulação em que o número de gerações foi de 10, até 15 min 36 s, na simulação em que a população foi de 45.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi desenvolvido e validado um modelo pseudo-transitório que utiliza o MOC para simulação hidráulica de redes de abastecimento de água, tendo sido o mesmo acoplado em uma rotina de otimização em AG para minimização de custos energéticos, configurando-se como uma ferramenta analítica que apresenta potencial para aplicações em operação de estações elevatórias de sistemas de distribuição em tempo real.

O MOC foi testado, a partir de comparação dos seus resultados com simulações realizadas no modelo EPANET, para verificar se havia compatibilidade satisfatória. Foram utilizados exemplos com redes fictícias equipadas com RNF, EE, RNV e booster, além de dois casos de redes reais, um subsistema de abastecimento do município de Natal e uma adutora no município de Porto do Mangue – RN, sendo que neste último dispunha-se de um medidor de pressão, que foi utilizado para experimento de campo.

Destaca-se que o EPANET é um modelo especialista e concebido para otimizar o número de iterações em função da convergência para uma solução final no regime permanente, o que traz uma vantagem em termos de tempo de processamento nestes casos. Já o MOC pseudo-transiente foi desenvolvido visando aplicação em operação de redes equipadas com RNV, onde não existe a estabilização de valores de pressão e vazão ao longo do tempo, processo que representa de uma maneira mais fidedigna a dinâmica do comportamento hidráulico em redes reais de abastecimento, sujeitas a variações de demanda ao longo do tempo, assim como dos níveis dos tanques de armazenamento e das regras operacionais de bombeio no sistema.

Verificou-se que na modelagem de RNF, EE e booster foram obtidos erros relativos, na comparação entre MOC e EPANET, inferiores a 1% nas determinações de vazão e pressão. Já a modelagem de RNV apresentou, para as vazões, erros relativos da mesma ordem de grandeza dos demais elementos da rede, entretanto, para os valores de pressão, obteve-se um erro relativo máximo de 6,61%. Destaca-se que a diferença na determinação das pressões para o RNV não foi acumulativa ao longo da simulação. Além disso, os modelos EPANET e MOC apresentam metodologias de cálculo que embutem diferenças para simulação de RNV, o que explica o desvio mais acentuado.

Foram avaliados aspectos de convergência do MOC. Verificou-se que, quando o

consumo dos nós varia gradualmente de um valor nulo para a demanda nodal, obtém-se convergência mais rápida do que quando se utiliza o valor da demanda nodal já nos primeiros passos de tempo, o que já havia sido apontado por Righetto (1994). Foi observado ainda que diferenças grandes no comprimento das tubulações, que geram celeridades de cálculo variadas, afetam o processo de convergência, o que já havia sido constatado por Luvizotto Jr. (1995), mas já o resultado final do exemplo estudado, quando se atingiu o regime permanente, não foi alterado. Finalmente, foi verificado que, reduzindo-se o valor da celeridade, dentro de certos limites, pode-se atingir o resultado final com menor número de iterações, diminuindo o esforço computacional. O valor da celeridade é uma variável com função apenas numérica, que pode ser arbitrado pelo usuário. Valores entre 100 e 1.000 m/s mostraram-se adequados para os exemplos analisados neste estudo.

Destaca-se que o modelo utilizado apresenta como vantagem o equacionamento explícito que permite a realização dos cálculos hidráulicos por meio de um procedimento simplificado, o que é vantajoso em termos de implementação computacional, e cujo passo de tempo é função direta do parâmetro celeridade fictícia, de modo que a escolha do mesmo impacta no tempo de processamento do algoritmo hidráulico, assim como no número de iterações para se atingir a convergência.

Em relação às simulações de casos reais, para o primeiro exemplo, um subsistema de abastecimento do município de Natal, cuja composição da rede incluía 122 pontos de consumo, 134 tubulações e 01 EE, foram obtidos resultados compatíveis entre MOC e EPANET. Para o segundo caso, que tratou de uma adutora de ferro fundido no município de Porto do Mangue – RN, foi possível comparar o dado de pressão medido em campo (11 kgf/cm^2), pois se dispunha de um manômetro na “cabeça” do poço, com os valores simulados no MOC (107,7 mca), obtendo-se uma diferença de apenas 2% entre os respectivos valores. Esta simulação foi particularmente importante, tendo em vista que experimentos de campo permitem comparar o modelo com situações reais, sendo esta a forma mais valiosa e fidedigna de se realizar testes de validação.

Foi implementada uma rotina em Algoritmos Genéticos ao modelo. A rotina de otimização baseada em AG apresenta uma função objetivo que considera a minimização dos custos energéticos associados às estações elevatórias (consumo e demanda) e inclui formas de penalizar aspectos indesejados da operação, como pressões e

velocidades elevadas, excesso de manobras nas bombas e violação de limites em tanques. Esta rotina foi aplicada a um exemplo contendo 02 EEs e 02 RNVs. Foram realizadas análises quanto às fórmulas de tarifação, utilização de penalidades e variação dos parâmetros do AG, avaliando a influência desses aspectos sobre o valor da função objetivo e o tempo de processamento. Os valores de tarifação utilizados foram os disponibilizados pela CAERN. Verificou-se, nos exemplos estudados, que a variação dos parâmetros do AG resultou em uma diferença no valor da FO de 4,33%.

Com base nas análises descritas anteriormente foi possível concluir que o modelo baseado no MOC demonstrou-se eficaz para solucionar problemas hidráulicos e para otimizar a operação de sistemas de abastecimento de água equipados com EEs. O modelo em questão apresenta excelente flexibilidade para incorporar diferentes configurações de redes, o que o torna apto para ser aplicado em sistemas reais de distribuição, geralmente de topologia complexa.

Já a rotina de algoritmos genéticos foi estruturada de modo a poder facilmente acoplar o modelo hidráulico, configurando-se como um módulo a parte. Isto permitirá que, caso venha a incorporar-se ao programa uma nova metodologia de cálculo hidráulico, seja possível utilizar-se da mesma estrutura desenvolvida para o AG, substituindo-se apenas a função de simulação.

Uma das potencialidades do método é que o mesmo, embora trabalhe com valores de celeridade fictícia, se baseia em um procedimento de cálculo que envolve os transitórios hidráulicos, ou seja, considera pseudo-transientes. Os transitórios hidráulicos são a representação mais precisa do comportamento de redes de distribuição, uma vez nas mesmas ocorrem constantemente perturbações e variações das pressões e vazões.

Assim, uma questão importante a responder é apontar quais as modificações que devem ser incorporadas ao modelo de forma que o mesmo seja capaz de simular transitórios reais. Dentre condições necessárias, porém não obrigatoriamente suficientes, pode-se citar a adoção de um valor real para a celeridade da onda a ser embutida nos procedimentos de cálculo, a necessidade de discretização espacial das tubulações em sub-trechos, assim como a garantia de que condições de estabilidade numérica serão atendidas, o que é influenciado em parte pela adoção de um valor adequado para o passo de tempo da simulação. Além disso, existem trabalhos apresentando resultados de

laboratório e de campo indicando que uma das tarefas mais complexas na modelagem dos transitórios hidráulicos reais é a dissipação da energia, que é impactada pelo fator de atrito no regime variável, a viscoelasticidade em tubos plásticos, o ar aprisionado nas tubulações, a existência de vazamentos na rede, dentre outros fenômenos. Outro aspecto que se deve considerar é que os procedimentos de cálculo tornam-se bastante pesados, havendo necessidade de grande esforço em termos de tempo de processamento e memória requerida.

Possíveis contribuições para melhorar a eficiência do AG são técnicas clássicas já apontadas na literatura científica, como introduzir na população inicial uma solução ótima pré-determinada a partir de outra técnica de otimização e a realização de processamento paralelo, para permitir ao AG trabalhar simultaneamente com um maior número de indivíduos e gerações. É interessante também explorar novas opções de processos evolutivos no algoritmo, como introduzir recombinações com mais de um ponto de corte, considerar populações que mudam de tamanho ao longo das gerações, ou habilitar critério de parada a partir de convergência da solução entre gerações consecutivas, dentre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J.; CABRERA, E.; IZQUIERDO, J.; GARCÍA-SERRA, J. (1999). Flow Modeling in Pressurized Systems Revisited. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 11, p. 1154-1169, Nov.
- ALENCAR NETO, M. F (2003). Otimização de redes de distribuição de água por algoritmos genéticos. Fortaleza. 194 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará.
- ALMEIDA, A.B.; KOELLE, E. (1992). *Fluid Transients in Pipe Networks*. Computational Mechanics Publications, Glasgow.
- AMADO, J.M.P. & MARQUES, J.A.S (2004). Modelação Hidráulica de Escoamentos Permanentes e Variáveis em Pressão, Método das Características “Adaptado”. *Anais do 7º Congresso da Água*. Lisboa, Portugal.
- ANJO, L.F.R.S.; LUVIZOTTO Jr, E.; RIBEIRO, L.C.J. (2008). Utilizando um Modelo Dinâmico Inercial Rígido para Analisar a Dispersão de um Componente em Sistemas Hidráulicos. In: Ramos, H.M., Covas, D.I.C., Gonçalves, F.V., e Soares, A.K.: *Alterações Climáticas e Gestão da Água e Energia em Sistemas de Abastecimento e Drenagem*, Portugal: Dossier, p.361-373.
- ARAÚJO, J. K.; CHAUDHRY, F. H. (2002). Um Estudo da Conveniência da Calibração das Rugosidades Absolutas e Fatores de Atrito de Tubos de Uma Rede de Distribuição de Água com Dados Transientes. In: *Seminário: Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água, O Estado da Arte e Questões Avançadas*, 2002, João Pessoa.
- ARAÚJO, J. K. (2003). Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado à escoamento transiente. São Carlos. 166 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; ARAÚJO, R.; FERNANDEZ Y FERNANDEZ, M.; ITO, A. E. (1998). *Manual de Hidráulica*. 8º ed. São Paulo: Edgard Blücher.
- BARBOSA, M. P. R. (2006). *Modelagem Computacional de Chaminés de Equilíbrio e*

Tanques de Alimentação Unidirecional como mecanismos de Alívio do Golpe de Aríete em Adutoras. Fortaleza, 171p Dissertação de Mestrado. DEHA, Universidade Federal do Ceará.

BHAVE, P.R. (1991). Analysis of Flow in Water Distribution Networks. Technomic Publishing. Lancaster, PA.

CARRIJO, I. B.; REIS, L. F. R.; CHEUNG, P. B.; SOARES, A. K.; SILVA, F. G. B. (2003). “Otimização da Operação de Sistemas de Distribuição de Água Utilizando Algoritmos Genéticos Multiobjetivo”. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Desafios à Gestão da Água no Limiar do Século XXI. CD. 20pgs.

CHAUDHRY, M.H. (1979). Applied Hydraulic Transients. Van Nostrand Reinhold Company, New York.

CHAUDHRY, M.H. (1987). Applied Hydraulic Transients. 2nd edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York.

CHEUNG, P. B. (2004). Análise de Reabilitação de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento via Algoritmos Genéticos Multi-objetivo. Tese. Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo.

DARWIN, C. R. (1859). Origin of Species. Londres, Inglaterra.

DUNLOP, E.J. (1991). WADI Users Manual. Local Government Computer Services Board, Dublin, Ireland.

FILION, Y. R.; KARNEY, B. W. (2002). Extended-Period Analysis with a Transient Model. Journal of Hydraulic Engineering, v. 128, n. 6, p. 616-624, June.

FLETCHER, C.A.J. - Computational Techniques for Fluid Dynamics: Vol 1 e 2. Springer-Verlag, New York, 1988.

FOX, J.A.; KEECH, A.E (1975). Pipe Network Analysis – a Novel Steady State Technique, Journal Inst. Water Engrs & Sci., 29, pp. 183-194.

GOLDBERG, D. E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization and machine

- learning. 412 pp., Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass.
- ISAACS, L. T.; MILLS, K. G (1980). Linear Theory Methods for Pipe Networks. Journal of the Hydraulics Division, 106, 7, pp. 1191-1201.
- KARNEY, B. W. (2000). Hydraulics of Pressurized Flow. In: Mays, L. W. (ed.): Water Distribution Systems Handbook, McGraw-Hill, USA, p. 2.1-2.43.
- KOELLE, E. (1983). Transientes Hidráulicos em Instalações de Conduitos Forçados. São Paulo. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- LACERDA, E. G. M, CARVALHO, A.C.P.L. (1999) “Introdução aos algoritmos genéticos. In: Galvão, C.O., Valença, M.J.S. (orgs.) Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais”. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. p. 99-150.
- LESSA, R. C. (1984). Transientes Hidráulicos em Sistemas Complexos de Adução de Água. Dissertação de Mestrado. EESC/USP.
- LESSA, R. C. (1990). Análise do Funcionamento de Acessórios Durante a Ocorrência de Transitórios Hidráulicos. Tese de Doutorado. EESC/USP.
- LUVIZOTTO Jr, E. (1995). Controle Operacional de Redes de Abastecimento de Água Auxiliado por Computador. São Paulo. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- LUVIZOTTO Jr, E.; ANJO, L.F.R.S. (2004). Utilizando a Estrutura do Método Gradiente na Elaboração de um Modelo para Analisar Transitórios Lentos. Anais do XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro, SP, Brasil.
- MICHALEWICZ, Z. (1994). Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. 2ª ed., Springer-Verlag, USA.
- NEIVA, R. M. S. (2000). Modelagem Computacional do Golpe de Aríete em Aduções. Fortaleza. Dissertação de Mestrado. DEHA, Universidade Federal do Ceará.
- NOVAKOSKI, M. J. (2005). Cálculo de Pressões e Vazões em Redes Hidráulicas.

Curitiba. 85 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná.

PEROBA JÚNIOR, F. (2007). Modelagem Computacional de Ventosas de Duplo Efeito como Mecanismo de Alívio do Golpe de Aríete. Fortaleza, 152p. Dissertação de Mestrado. DEHA, Universidade Federal do Ceará.

REIS, L. F. R., PORTO, R. M., CHAUDHRY, F. H. (1997) Optimal Location of Control Valves in Pipe Networks by Genetic Algorithms. *Journal of the Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 123, n. 6, p. 317-326.

RIGHETTO, A.M. (1994). Cálculo Hidráulico de Rede de Distribuição de Água a partir de Condições Transitórias: Adequação e Estudo de Casos. São Carlos. 118p. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

RIGHETTO, A.M. (2002). Operação Ótima de Sistema Urbano de Distribuição de Água. Anais do Seminário - Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água. O Estado da Arte e Questões Avançadas. João Pessoa. CD. 16pgs.

RODRIGUES, M. V. S. (2008). Modelagem Computacional de Ventosas Automáticas de Duplo Efeito com Abertura e Fechamento Não Instantâneos como Mecanismo de Alívio do Golpe de Aríete. Fortaleza, 167p Dissertação de Mestrado. DEHA, Universidade Federal do Ceará.

ROSSMAN, L. A. (2000) "EPANET 2 User's Manual". U.S. Environmental Protection Agency." EPA/600/R-00/057. Cincinnati, OH. USA.

SHAMIR U.; HOWARD, C.D.D. (1968). Water Distribution Systems Analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, 94, 1, pp. 219-234.

SHIMADA, M. (1988). Time-Marching Approach for Pipe Steady Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 114, n. 11, p. 1301-1320, Nov.

SILVA, A. C. A. (2006). Calibração Automática de Rugosidades de Tubulações em Sistemas de Distribuição de Água com Aplicação de Algoritmos Genéticos.

Fortaleza. 177 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará.

SIMPSON, A. R.; G. C. DANDY; MURPHY L. J. (1994). Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *J. Water Resour. Plann. Manage*, ASCE, 120(4), 423-443.

SOARES, A. K. (2003). Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento Considerando Vazamentos e Demandas Dirigidas pela Pressão. São Carlos. 178p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SOARES, A.K (2007). Calibração e Detecção de Vazamentos em Modelos de Sistemas Hidráulicos no escoamento Transitório. São Carlos. 332p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SOARES, A.K.; REIS, L.F.R.; COVAS, D.I.C. (2008). Análise Hidráulica de Sistemas de Distribuição de Água Utilizando o MOC-EPANET. In: Ramos, H.M., Covas, D.I.C., Gonçalves, F.V., e Soares, A.K.: Alterações Climáticas e Gestão da Água e Energia em Sistemas de Abastecimento e Drenagem, Lisboa, Portugal: Dossier, p.401-417.

TODINI, E.; PILATI, S. (1988). A Gradient Algorithm for the Analysis of Pipe Networks. In: Coulbeck, K.B., e Orr, C.H.: *Computer Applications in Water Supply: System Analysis and Simulation*, vol. 1, John Willey & Sons, p.1-20.

VARDY, A.E.; CHAN, L. (1983). Rapidly Attenuated Water Hammer and Steel Hammer. In: 4 th Int. Conf. on Pressure Surges, paper A1, British Hydromechanics Research Association, Univ. of Bath, England.

WALTERS, G. A.; LOHBECK, T. (1993). Optimal Layout of Tree Networks Using Genetic Algorithms. *Engineering Optimization*, v. 22, p. 27-48.

WOOD, D.J.; CHARLES, C.O.A (1972). Hydraulic Network Analysis Using Linear Theory. *Journal of the Hydraulics Division*, 98, 7, pp. 1157-1170.

WYLIE, E. B.; STREETER, V.L (1978, 1983). *Fluid Transients*. Mc Graw-Hill New York (U.S.A.), and FEB Press, Ann Arbor, Michigan (U.S.A.).

WYLIE, E.B.; STREETER, V.L. (1993). Fluid Transients in Systems. Prentice-Hall, New Jersey.

ANEXOS

Anexo A – Arquivo de Entrada da Modelagem de RNF

[TÍTULO]
Rede Exemplo 01: 5 trechos e 5 nós - 1 reservatório de nível constante

[JUNÇÕES]

4
;ID Cota(m) Consumo(m³/s)
2 40 0.050
3 35 0.050
4 30 0.050
5 35 0.050

[RESERVATÓRIOS DE NÍVEL FIXO]

1
;ID Carga(m)
1 60

[ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS]

0
;ID Cota(m) AEE BEE CEE

[RESERVATÓRIOS DE NÍVEL VARIÁVEL- TANQUES]

0
;ID COTA(m) HINICIAL(m) HMÍNIMA(m) HMÁXIMA(m) DIÂMETRO(m)

[TUBOS]

5
;ID NÓINICIAL NÓFINAL COMPRIMENTO(m) DIÂMETRO(m) ATRITO CELERIDADE(m/s)
1 1 2 500 0.400 0.02 1000
2 2 3 500 0.300 0.02 1000
3 4 5 500 0.200 0.02 1000
4 2 4 500 0.300 0.02 1000
5 3 5 500 0.200 0.02 1000

[BOOSTER]

0
;ID Node1 Node2 Parameters

[VÁLVULAS]

0
;ID Node1 Node2 Diameter Type Setting MinorLoss

[Nº de Simulações e Padrões de Demanda]

1
;Multiplicadores
1.0

[Controles]

0
;IDCONTROLE TIPO IDTANQUE LIGAR(nivel(m)/hora) DESLIGAR(nivel(m)/hora)

Anexo B – Arquivo de Entrada da Modelagem de EE

```
[TÍTULO]
Rede Exemplo 02: 12 trechos e 10 nós - 1 RNF e 1 EE
-----

[JUNÇÕES]
8
;ID Cota(m) Consumo(m³/s)
3 256 0.0095
4 253 0.0095
5 252 0.0063
6 253 0.0095
7 252 0.0126
8 250 0.0095
9 253 0.0063
10 256 0.0063
-----

[RESERVATÓRIOS DE NÍVEL FIXO]
1
ID Carga(m)
1 270
-----

[ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS]
1
ID Cota(m) AEE BEE CEE Controle
2 235 40 0 -16000 1
-----

[RESERVATÓRIOS DE NÍVEL VARIÁVEL- TANQUES]
0
ID COTA(m) HINICIAL(m) HMÍNIMA(m) HMÁXIMA(m) DIÂMETRO(m)
-----

[TUBOS]
12
ID NÓINICIAL NÓFINAL COMPRIMENTO(m) DIÂMETRO(m) ATRITO CELERIDADE(m/s)
1 2 3 1609 0.450 0.03 1000
2 3 4 1609 0.350 0.03 1000
3 4 5 1609 0.250 0.03 1000
4 6 7 1609 0.250 0.03 1000
5 7 8 1609 0.300 0.03 1000
6 9 10 1609 0.150 0.03 1000
7 3 6 1609 0.250 0.03 1000
8 6 9 1609 0.200 0.03 1000
9 1 4 1609 0.450 0.03 1000
10 4 7 1609 0.300 0.03 1000
11 7 10 1609 0.150 0.03 1000
12 5 8 1609 0.200 0.03 1000
-----

[BOOSTER]
0
ID NÓINICIAL NÓFINAL COMPRIMENTO(m) DIÂMETRO(m) ATRITO CELERIDADE(m/s) ABO BBO CBO
-----

[VÁLVULAS]
0
;ID Node1 Node2 Diameter Type Setting MinorLoss
-----

[Nº de Simulações e Padrões de Demanda]
24
;Multiplicadores
0.7 0.6 0.6 0.7 0.9 1.0 1.3 1.2 1.1 1.0 1.1 1.2 1.2 1.1 1.1 1.0 1.1 1.2 1.2 1.1 1.0 0.9
0.8 0.8
-----

[Controles]!Tipo 1: EE e RNV / Tipo 2: EE e HORA
1
;IDCONTROLE TIPO SEQUENCIA (LIGA (1)/ DESLIGA (0))
1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1
-----
```

Anexo C – Arquivo de Entrada da Modelagem de Booster

```
[TÍTULO]
Rede Exemplo 03: 6 trechos e 6 nós - 1 RNF e 1 booster
-----
[JUNÇÕES]
5
;ID Cota(m) Consumo(m³/s)
2 40 0.050
3 35 0.050
4 30 0.050
5 27 0.050
6 60 0.075
-----
[RESERVATÓRIOS DE NÍVEL FIXO]
1
;ID Carga(m)
1 80
-----
[ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS]
0
;ID Cota(m) AEE BEE CEE Controle
-----
[RESERVATÓRIOS DE NÍVEL VARIÁVEL- TANQUES]
0
;ID COTA(m) HINICIAL(m) HMÍNIMA(m) HMÁXIMA(m) DIÂMETRO(m)
-----
[TUBOS]
5
;ID NÓINICIAL NÓFINAL COMPRIMENTO(m) DIÂMETRO(m) ATRITO CELERIDADE(m/s)
1 1 2 1000 0.400 0.02 1000
2 2 3 1000 0.300 0.02 1000
3 4 5 1000 0.200 0.02 1000
5 2 4 1000 0.300 0.02 1000
6 3 5 1000 0.200 0.02 1000
-----
[BOOSTER]
1
;ID NÓINICIAL NÓFINAL COMPRIMENTO(m) DIÂMETRO(m) ATRITO CELERIDADE(m/s) ABO BBO CBO
4 5 6 1000 0.200 0.02 1000 80 0 -500
-----
[VÁLVULAS]
0
;ID Node1 Node2 Diameter Type Setting MinorLoss
-----
[Nº de Simulações e Padrões de Demanda]
24
;Multiplicadores
0.7 0.6 0.6 0.7 0.9 1.0 1.3 1.2 1.1 1.0 1.1 1.2 1.2 1.1 1.1 1.0 1.1 1.2 1.2 1.1 1.0 0.9
0.8 0.8
-----
[Controles]
0
;IDCONTROLE TIPO IDTANQUE LIGAR(nivel(m)/hora) DESLIGAR(nivel(m)/hora)
```

Anexo D – Arquivo de Entrada da Modelagem de RNV

```
[TÍTULO]
Rede Exemplo 04: 11 trechos e 9 nós - 1 RNV
-----
[JUNÇÕES]
8
;ID Cota(m) Consumo(m³/s)
2 256 0.0095
3 253 0.0095
4 252 0.0063
5 253 0.0095
6 252 0.0126
7 250 0.0095
8 253 0.0063
9 256 0.0063
-----
[RESERVATÓRIOS DE NÍVEL FIXO]
0
ID Carga(m)
-----
[ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS]
0
ID Cota(m) AEE BEE CEE Controle
-----
[RESERVATÓRIOS DE NÍVEL VARIÁVEL- TANQUES]
1
ID COTA(m) HINICIAL(m) HMÍNIMA(m) HMÁXIMA(m) DIÂMETRO(m)
1 250 29 10 30 25
-----
[TUBOS]
11
ID NÓINICIAL NÓFINAL COMPRIMENTO(m) DIÂMETRO(m) ATRITO CELERIDADE(m/s)
1 2 3 1609 0.350 0.03 1000
2 3 4 1609 0.250 0.03 1000
3 5 6 1609 0.250 0.03 1000
4 6 7 1609 0.300 0.03 1000
5 8 9 1609 0.150 0.03 1000
6 2 5 1609 0.250 0.03 1000
7 5 8 1609 0.200 0.03 1000
8 1 3 1609 0.450 0.03 1000
9 3 6 1609 0.300 0.03 1000
10 6 9 1609 0.150 0.03 1000
11 4 7 1609 0.200 0.03 1000
-----
[BOOSTER]
0
ID NÓINICIAL NÓFINAL COMPRIMENTO(m) DIÂMETRO(m) ATRITO CELERIDADE(m/s) ABO BBO CBO
-----
[VÁLVULAS]
0
;ID Nodel Node2 Diameter Type Setting MinorLoss
----- [Nº de
Simulações e Padrões de Demanda]
24
;Multiplicadores
0.7 0.6 0.6 0.7 0.9 1.0 1.3 1.2 1.1 1.0 1.1 1.2 1.2 1.1 1.1 1.0 1.1 1.2 1.2 1.1 1.0 0.9
0.8 0.8
-----
[Controles]
0
;IDCONTROLE TIPO SEQUENCIA (LIGA (1)/ DESLIGA (0))
```

Anexo E – Arquivo de Entrada da Modelagem de Caso Real 1 no MOC

[TÍTULO]

Rede Exemplo 5: Sub-sistema do Município de Natal: 134 trechos e 122 nós - 1 EE

[JUNÇÕES]

122

;ID Cota(m) Consumo(m³/s)

2	44.72	0.000104
3	44.66	0.000028
4	44.95	0.000001
5	52.04	0.000172
6	47.08	0.000172
7	47.71	0.000038
8	47	0.000106
9	40.21	0.000066
10	56.09	0.000135
11	46.49	0.000206
12	49.5	0.000095
13	50.12	0.000173
14	51.51	0.000057
15	53.19	0.000182
16	53.02	0.000132
17	43.09	0.000054
18	47.37	0.000094
19	50.44	0.00003
20	43.7	0.000066
21	44.57	0.000042
22	48.42	0.000496
23	42.73	0.000116
24	50.87	0.000255
25	41.17	0.000195
26	43.36	0.000142
27	46.31	0.000197
28	47.9	0.000088
29	47.83	0.000061
30	46.72	0.000125
31	46.4	0.00008
32	46.2	0.000095
33	46	0.000067
34	47.1	0.00007
35	44.2	0.000103
36	44.68	0.000155
37	45.45	0.000086
38	44.95	0.000682
39	46.08	0.000104
40	46.4	0.000088
41	52.25	0.000282
42	41	0.000011
43	44.31	0.000335
44	41.48	0.00012
45	38.77	0.000001
46	45.14	0.000153
47	49	0.000094
48	43.35	0.000028
49	45.26	0.000449
50	46.7	0.000047
51	39	0.000095
52	45.2	0.000028
53	56.53	0.000577
54	56.51	0.000245
55	54.38	0.000197
56	52	0.00003
57	47.2	0.000036
58	43.01	0.000015
59	40	0.000001

60 53 0.000001
61 57.53 0.000001
62 57.51 0.000001
63 55.38 0.000001
64 42 0.000001
65 50.5 0.000001
66 44.01 0.000001
67 45.7 0.000043
68 44.7 0.000015
69 42.8 0.000066
70 48.2 0.00012
71 48.2 0.000028
72 49.2 0.000022
73 50.7 0.000012
74 51.7 0.000021
75 52.7 0.000054
76 53.2 0.000033
77 52.2 0.00003
78 45.2 0.000028
79 47.2 0.000047
80 49.8 0.000449
81 50.7 0.000095
82 46.7 0.000042
83 49.2 0.000022
84 45.2 0.000015
85 41.7 0.000011
86 51.2 0.00003
87 53.2 0.000138
88 54.7 0.000208
89 51.7 0.000038
90 53.2 0.000069
91 47.2 0.000051
92 50.2 0.000439
93 46.2 0.000009
94 51.7 0.000135
95 49.7 0.000127
96 49.2 0.000255
97 41.8 0.000095
98 43.7 0.000195
99 45.7 0.000038
100 46.7 0.000047
101 47.2 0.000061
102 45.7 0.000033
103 46.7 0.000028
104 47.2 0.000014
105 45.2 0.000048
106 45.8 0.000001
107 45.2 0.00001
108 46.2 0.00001
109 42.2 0.000016
110 43.2 0.000001
111 44.7 0.000122
112 45.7 0.000019
113 45.2 0.000033
114 44.7 0.000073
115 43.7 0.00002
116 46.7 0.000019
117 46.2 0.000001
118 46.2 0.000047
119 46.7 0.000028
120 47.2 0.000079
121 48.2 0.000001
122 47.2 0.000074
123 42.2 0.000016

[RESERVATÓRIOS DE NÍVEL FIXO]

0

;ID Carga(m)

[ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS]

1

;ID Cota(m) AEE BEE CEE

1 10.94 107.89 -3362.51 -94449.31 1

[RESERVATÓRIOS DE NÍVEL VARIÁVEL- TANQUES]

0

;ID COTA(m) HINICIAL(m) HMÍNIMA(m) HMÁXIMA(m) DIÂMETRO(m)

[TUBOS]

134

;ID NÓINICIAL NÓFINAL COMPRIMENTO(m) DIÂMETRO(m) ATRITO CELERIDADE(m/s)

1 6 7 16 0.075 0.02 100.00
2 7 57 24 0.075 0.02 100.00
3 7 89 50 0.075 0.02 100.00
4 89 54 69 0.075 0.02 100.00
5 56 86 40 0.075 0.02 100.00
6 64 42 1 0.1 0.02 100.00
7 86 47 25 0.075 0.02 100.00
8 97 51 44 0.075 0.02 100.00
9 94 10 45 0.075 0.02 100.00
10 38 98 30 0.06 0.02 100.00
11 98 25 50 0.06 0.02 100.00
12 39 112 11 0.05 0.02 100.00
13 112 37 11 0.05 0.02 100.00
14 83 14 30 0.075 0.02 100.00
15 12 65 1 0.1 0.02 100.00
16 4 99 20 0.05 0.02 100.00
17 37 113 11 0.05 0.02 100.00
18 12 22 15 0.075 0.02 100.00
19 113 36 12 0.05 0.02 100.00
20 36 114 4 0.05 0.02 100.00
21 114 35 20 0.05 0.02 100.00
22 35 115 15 0.075 0.02 100.00
23 115 26 7 0.05 0.02 100.00
24 30 116 11 0.05 0.02 100.00
25 116 31 11 0.05 0.02 100.00
26 31 117 17 0.05 0.02 100.00
27 46 97 44 0.075 0.02 100.00
28 2 20 70 0.075 0.02 100.00
29 20 23 34 0.075 0.02 100.00
30 2 52 30 0.075 0.02 100.00
31 3 6 15 0.075 0.02 100.00
32 117 32 6 0.05 0.02 100.00
33 32 118 8 0.05 0.02 100.00
34 52 3 21 0.075 0.02 100.00
35 118 33 18 0.05 0.02 100.00
36 34 119 11 0.05 0.02 100.00
37 119 8 11 0.05 0.02 100.00
38 8 120 14 0.05 0.02 100.00
39 120 40 14 0.05 0.02 100.00
40 57 11 24 0.075 0.02 100.00
41 11 67 15 0.075 0.02 100.00
42 29 121 10 0.05 0.02 100.00
43 121 28 10 0.05 0.02 100.00
44 28 122 38 0.05 0.02 100.00
45 122 27 45 0.05 0.02 100.00
46 1 49 60 0.1 0.02 100.00
47 99 39 20 0.05 0.02 100.00
48 67 46 13 0.075 0.02 100.00
49 51 45 40 0.075 0.02 100.00
50 46 68 6 0.075 0.02 100.00
51 68 43 7 0.075 0.02 100.00
52 39 100 18 0.05 0.02 100.00
53 100 30 8 0.05 0.02 100.00
54 30 101 12 0.05 0.02 100.00
55 101 29 24 0.05 0.02 100.00

56 43 69 22 0.075 0.02 100.00
57 37 102 8 0.05 0.02 100.00
58 5 56 25 0.075 0.02 100.00
59 102 31 18 0.05 0.02 100.00
60 69 9 22 0.075 0.02 100.00
61 5 70 40 0.075 0.02 100.00
62 51 59 1 0.1 0.02 100.00
63 56 60 1 0.1 0.02 100.00
64 53 61 1 0.1 0.02 100.00
65 54 62 1 0.1 0.02 100.00
66 55 63 1 0.1 0.02 100.00
67 70 44 35 0.075 0.02 100.00
68 47 71 35 0.075 0.02 100.00
69 58 66 1 0.1 0.02 100.00
70 71 48 35 0.075 0.02 100.00
71 13 72 37 0.075 0.02 100.00
72 72 47 28 0.075 0.02 100.00
73 13 73 20 0.075 0.02 100.00
74 73 14 26 0.075 0.02 100.00
75 14 74 13 0.075 0.02 100.00
76 74 41 14 0.075 0.02 100.00
77 41 75 20 0.075 0.02 100.00
78 75 15 24 0.075 0.02 100.00
79 76 15 13 0.075 0.02 100.00
80 16 76 13 0.075 0.02 100.00
81 16 77 10 0.075 0.02 100.00
82 77 19 10 0.075 0.02 100.00
83 78 18 40 0.075 0.02 100.00
84 17 78 70 0.075 0.02 100.00
85 22 79 15 0.06 0.02 100.00
86 79 50 15 0.06 0.02 100.00
87 22 80 100 0.06 0.02 100.00
88 80 38 90 0.06 0.02 100.00
89 23 91 69 0.075 0.02 100.00
90 91 5 75 0.075 0.02 100.00
91 49 92 48 0.075 0.02 100.00
92 92 53 87 0.075 0.02 100.00
93 49 93 5 0.075 0.02 100.00
94 93 2 10 0.075 0.02 100.00
95 6 94 55 0.075 0.02 100.00
96 11 95 50 0.075 0.02 100.00
97 95 55 90 0.075 0.02 100.00
98 43 96 83 0.075 0.02 100.00
99 96 24 80 0.075 0.02 100.00
100 55 90 20 0.075 0.02 100.00
101 90 16 39 0.075 0.02 100.00
102 53 87 40 0.075 0.02 100.00
103 87 13 50 0.075 0.02 100.00
104 54 88 47 0.075 0.02 100.00
105 88 41 43 0.075 0.02 100.00
106 47 84 40 0.075 0.02 100.00
107 84 17 22 0.075 0.02 100.00
108 17 85 13 0.075 0.02 100.00
109 85 42 13 0.075 0.02 100.00
110 18 83 30 0.075 0.02 100.00
111 18 82 12 0.075 0.02 100.00
112 82 21 16 0.075 0.02 100.00
113 15 81 60 0.075 0.02 100.00
114 81 12 31 0.075 0.02 100.00
115 31 103 5 0.075 0.02 100.00
116 103 34 10 0.05 0.02 100.00
117 34 104 4 0.05 0.02 100.00
118 104 28 14 0.05 0.02 100.00
119 36 105 18 0.05 0.02 100.00
120 105 32 8 0.05 0.02 100.00
121 32 106 7 0.05 0.02 100.00
122 106 8 7 0.05 0.02 100.00
123 35 107 14 0.05 0.02 100.00

```
124 107 33 12 0.05 0.02 100.00
125 33 108 5 0.05 0.02 100.00
126 108 40 7 0.05 0.02 100.00
127 123 109 11 0.05 0.02 100.00
128 109 58 20 0.05 0.02 100.00
129 26 111 20 0.05 0.02 100.00
130 111 27 30 0.05 0.02 100.00
131 58 110 4 0.05 0.02 100.00
132 110 26 5 0.05 0.02 100.00
133 25 123 10 0.05 0.02 100.00
134 38 4 10 0.05 0.02 100.00
```

[BOOSTER]

0

;ID Nodel Node2 Parameters

[VÁLVULAS]

0

;ID Nodel Node2 Diameter Type Setting MinorLoss

[N° de Simulações e Padrões de Demanda]

1

;Multiplicadores

0.833 0.788 0.762 0.762 0.762 0.762 0.809 0.857 0.929 0.952 0.976 1 1 0.976 0.952 0.952
0.952 0.952 0.952 0.929 0.929 0.905 0.881 0.857

[Controles]

0

;IDCONTROLE TIPO IDTANQUE LIGAR(nivel(m)/hora) DESLIGAR(nivel(m)/hora)

Anexo F – Arquivo de Entrada da Modelagem de Caso Real 2 no MOC

[TÍTULO]

Adutora do PoçoBAN-I

[JUNÇÕES]

14

;ID Cota(m) Consumo(m³/s)

2 54.60 0

3 54.60 0

4 54.60 0

5 54.60 0

6 89.54 0

7 110.0 0

8 115.0 0

9 111.58 0

10 92.1 0

11 90.0 0

12 96.92 0

13 126.92 0

14 140.0 0

15 144.7 0

[RESERVATÓRIOS DE NÍVEL FIXO]

1

;ID Carga(m)

16 153.34

[ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS]

1

;ID Cota(m) AEE BEE CEE

1 -106.8 562.67 -4140.63 -80291.60 1

[RESERVATÓRIOS DE NÍVEL VARIÁVEL- TANQUES]

0

;ID COTA(m) HINICIAL(m) HMÍNIMA(m) HMÁXIMA(m) DIÂMETRO(m)

[TUBOS]

15

;ID NÓINICIAL NÓFINAL COMPRIMENTO(m) DIÂMETRO(m) ATRITO CELERIDADE(m/s)

1 1 2 250 0.076 0.025 1000

2 2 3 4 0.200 0.025 1000

3 3 4 1 0.200 0.025 1000

4 4 5 2 0.200 0.025 1000

5 5 6 1000 0.250 0.025 1000

6 6 7 1000 0.250 0.025 1000

7 7 8 880 0.250 0.025 1000

8 8 9 120 0.250 0.025 1000

9 9 10 1000 0.250 0.025 1000

10 10 11 280 0.250 0.025 1000

11 11 12 720 0.250 0.025 1000

12 12 13 1000 0.250 0.025 1000

13 13 14 1000 0.250 0.025 1000

14 14 15 450 0.250 0.025 1000

15 16 15 8.64 0.150 0.025 1000

[BOOSTER]

0

;ID Node1 Node2 Parameters

[VÁLVULAS]

0

;ID Node1 Node2 Diameter Type Setting MinorLoss

[Nº de Simulações e Padrões de Demanda]

1

;Multiplicadores

1

[Controles] !Tipo 1: EE e RNV / Tipo 2: BOOSTER e RNV /Tipo 3: EE e HORA /Tipo 4: BOOSTER
e HORA

0

;IDCONTROLE TIPO IDTANQUE LIGAR(nivel(m)/hora) DESLIGAR(nivel(m)/hora)

Anexo G – Arquivo de Saída da Modelagem de RNF

16/10/2009 17:32:35
Passo da Operação: 1
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 17.8366
3 21.4030
4 26.4030
5 20.0292
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.20000
2 0.07500
3 0.02500
4 0.07500
5 0.02500
16/10/2009 17:32:35

Anexo H – Arquivo de Saída da modelagem de EE

2/10/2009 08:43:31
Passo da Operação: 1
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.9198
3 13.8717
4 16.8714
5 17.6811
6 16.5519
7 17.5658
8 19.5502
9 16.2411
10 13.1495
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.01782
2 0.00058
3 0.00792
4 -0.00178
5 0.00314
6 0.00131
7 0.01059
8 0.00572
9 0.03083
10 0.01684
11 0.00310
12 0.00351
Passo da Operação: 2
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.9723
3 13.9246
4 16.9182
5 17.7745
6 16.6784
7 17.6881
8 19.6760
9 16.4420
10 13.3717
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.01773
2 0.00287
3 0.00677
4 -0.00145
5 0.00271
6 0.00112
7 0.00915
8 0.00490
9 0.02397
10 0.01438
11 0.00266
12 0.00299
Passo da Operação: 3
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.9723
3 13.9246
4 16.9182
5 17.7745
6 16.6784
7 17.6881
8 19.6760
9 16.4420
10 13.3717
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.01773
2 0.00287

3 0.00677
4 -0.00145
5 0.00271
6 0.00112
7 0.00915
8 0.00490
9 0.02397
10 0.01438
11 0.00266
12 0.00299

Passo da Operação: 4

Nó Pressão(mca)

1 0.0000
2 34.9198
3 13.8717
4 16.8714
5 17.6811
6 16.5519
7 17.5658
8 19.5502
9 16.2411
10 13.1495

Trecho Vazão(m3/s)

1 0.01782
2 0.00058
3 0.00792
4 -0.00178
5 0.00314
6 0.00131
7 0.01059
8 0.00572
9 0.03083
10 0.01684
11 0.00310
12 0.00351

Passo da Operação: 5

Nó Pressão(mca)

1 0.0000
2 34.7879
3 13.7387
4 16.7502
5 17.4499
6 16.2431
7 17.2662
8 19.2425
9 15.7563
10 12.6146

Trecho Vazão(m3/s)

1 0.01805
2 -0.00401
3 0.01023
4 -0.00239
5 0.00399
6 0.00168
7 0.01351
8 0.00735
9 0.04450
10 0.02171
11 0.00399
12 0.00456

Passo da Operação: 6

Nó Pressão(mca)

1 0.0000
2 34.7016
3 13.6517
4 16.6765
5 17.3121
6 16.0586

7 17.0879
8 19.0596
9 15.4706
10 12.3006
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.01820
2 -0.00622
3 0.01139
4 -0.00274
5 0.00441
6 0.00187
7 0.01492
8 0.00817
9 0.05130
10 0.02419
11 0.00443
12 0.00509
Passo da Operação: 7
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.3705
3 13.3178
4 16.4053
5 16.8140
6 15.3908
7 16.4443
8 18.4008
9 14.4486
10 11.1805
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.01876
2 -0.01268
3 0.01490
4 -0.00387
5 0.00564
6 0.00242
7 0.01909
8 0.01061
9 0.07159
10 0.03166
11 0.00577
12 0.00671
Passo da Operação: 8
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.4924
3 13.4407
4 16.5039
5 16.9939
6 15.6320
7 16.6766
8 18.6385
9 14.8163
10 11.5831
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.01855
2 -0.01056
3 0.01373
4 -0.00349
5 0.00523
6 0.00223
7 0.01771
8 0.00979
9 0.06485
10 0.02917
11 0.00533
12 0.00617
Passo da Operação: 9

Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.6029
3 13.5522
4 16.5943
5 17.1600
6 15.8547
7 16.8912
8 18.8582
9 15.1571
10 11.9566
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.01837
2 -0.00840
3 0.01256
4 -0.00311
5 0.00482
6 0.00205
7 0.01632
8 0.00898
9 0.05808
10 0.02667
11 0.00488
12 0.00563
Passo da Operação: 10
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.7016
3 13.6517
4 16.6765
5 17.3121
6 16.0586
7 17.0879
8 19.0596
9 15.4706
10 12.3006
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.01820
2 -0.00622
3 0.01139
4 -0.00274
5 0.00441
6 0.00187
7 0.01492
8 0.00817
9 0.05130
10 0.02419
11 0.00443
12 0.00509
Passo da Operação: 11
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.6029
3 13.5522
4 16.5943
5 17.1600
6 15.8547
7 16.8912
8 18.8582
9 15.1571
10 11.9566
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.01837
2 -0.00840
3 0.01256
4 -0.00311
5 0.00482
6 0.00205

7 0.01632
8 0.00898
9 0.05808
10 0.02667
11 0.00488
12 0.00563

Passo da Operação: 12

Nó Pressão(mca)

1 0.0000
2 34.4924
3 13.4407
4 16.5039
5 16.9939
6 15.6320
7 16.6766
8 18.6385
9 14.8163
10 11.5831

Trecho Vazão(m3/s)

1 0.01855
2 -0.01056
3 0.01373
4 -0.00349
5 0.00523
6 0.00223
7 0.01771
8 0.00979
9 0.06485
10 0.02917
11 0.00533
12 0.00617

Passo da Operação: 13

Nó Pressão(mca)

1 0.0000
2 33.8682
3 12.8682
4 16.2130
5 16.6741
6 15.2119
7 16.3064
8 18.2736
9 14.4069
10 11.1865

Trecho Vazão(m3/s)

1 0.00000
2 -0.02718
3 0.01415
4 -0.00534
5 0.00481
6 0.00216
7 0.01578
8 0.00972
9 0.08340
10 0.03067
11 0.00540
12 0.00659

Passo da Operação: 14

Nó Pressão(mca)

1 0.0000
2 34.0348
3 13.0348
4 16.3293
5 16.8691
6 15.4742
7 16.5552
8 18.5269
9 14.7861
10 11.5971

Trecho Vazão(m3/s)
1 0.00000
2 -0.02491
3 0.01297
4 -0.00490
5 0.00441
6 0.00198
7 0.01446
8 0.00891
9 0.07645
10 0.02812
11 0.00495
12 0.00604
Passo da Operação: 15
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.0348
3 13.0348
4 16.3293
5 16.8691
6 15.4742
7 16.5552
8 18.5269
9 14.7861
10 11.5971
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.00000
2 -0.02491
3 0.01297
4 -0.00490
5 0.00441
6 0.00198
7 0.01446
8 0.00891
9 0.07645
10 0.02812
11 0.00495
12 0.00604
Passo da Operação: 16
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.1889
3 13.1889
4 16.4368
5 17.0496
6 15.7171
7 16.7856
8 18.7616
9 15.1375
10 11.9777
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.00000
2 -0.02265
3 0.01178
4 -0.00445
5 0.00402
6 0.00180
7 0.01315
8 0.00810
9 0.06950
10 0.02557
11 0.00450
12 0.00548
Passo da Operação: 17
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.0348
3 13.0348

4 16.3293
5 16.8691
6 15.4742
7 16.5552
8 18.5269
9 14.7861
10 11.5971
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.00000
2 -0.02491
3 0.01297
4 -0.00490
5 0.00441
6 0.00198
7 0.01446
8 0.00891
9 0.07645
10 0.02812
11 0.00495
12 0.00604
Passo da Operação: 18
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 33.8682
3 12.8682
4 16.2130
5 16.6741
6 15.2119
7 16.3064
8 18.2736
9 14.4069
10 11.1865
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.00000
2 -0.02718
3 0.01415
4 -0.00534
5 0.00481
6 0.00216
7 0.01578
8 0.00972
9 0.08340
10 0.03067
11 0.00540
12 0.00659
Passo da Operação: 19
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.4924
3 13.4407
4 16.5039
5 16.9939
6 15.6320
7 16.6766
8 18.6385
9 14.8163
10 11.5831
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.01855
2 -0.01056
3 0.01373
4 -0.00349
5 0.00523
6 0.00223
7 0.01771
8 0.00979
9 0.06485
10 0.02917

11 0.00533
12 0.00617
Passo da Operação: 20
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.6029
3 13.5522
4 16.5943
5 17.1600
6 15.8547
7 16.8912
8 18.8582
9 15.1571
10 11.9566
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.01837
2 -0.00840
3 0.01256
4 -0.00311
5 0.00482
6 0.00205
7 0.01632
8 0.00898
9 0.05808
10 0.02667
11 0.00488
12 0.00563
Passo da Operação: 21
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.7016
3 13.6517
4 16.6765
5 17.3121
6 16.0586
7 17.0879
8 19.0596
9 15.4706
10 12.3006
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.01820
2 -0.00622
3 0.01139
4 -0.00274
5 0.00441
6 0.00187
7 0.01492
8 0.00817
9 0.05130
10 0.02419
11 0.00443
12 0.00509
Passo da Operação: 22
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.7879
3 13.7387
4 16.7502
5 17.4499
6 16.2431
7 17.2662
8 19.2425
9 15.7563
10 12.6146
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.01805
2 -0.00401
3 0.01023

4 -0.00239
5 0.00399
6 0.00168
7 0.01351
8 0.00735
9 0.04450
10 0.02171
11 0.00399
12 0.00456
Passo da Operação: 23
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.8611
3 13.8125
4 16.8152
5 17.5730
6 16.4079
7 17.4257
8 19.4062
9 16.0134
10 12.8979
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.01792
2 -0.00175
3 0.00907
4 -0.00206
5 0.00357
6 0.00150
7 0.01207
8 0.00654
9 0.03768
10 0.01926
11 0.00354
12 0.00403
Passo da Operação: 24
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 34.8611
3 13.8125
4 16.8152
5 17.5730
6 16.4079
7 17.4257
8 19.4062
9 16.0134
10 12.8979
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.01792
2 -0.00175
3 0.00907
4 -0.00206
5 0.00357
6 0.00150
7 0.01207
8 0.00654
9 0.03768
10 0.01926
11 0.00354
12 0.00403
2/10/2009 08:43:34

Anexo I – Arquivo de Saída da Modelagem de Booster

10/17/2009 11:33:28 AM

Passo da Operação: 1

Nó Pressão(mca)

1 0.0000
2 35.9714
3 37.8333
4 42.8333
5 38.1163
6 72.9024

Trecho Vazão(m3/s)

1 0.19250
2 0.07875
3 0.04375
4 0.05250
5 0.07875
6 0.04375

Passo da Operação: 2

Nó Pressão(mca)

1 0.0000
2 36.9781
3 39.6183
4 44.6183
5 41.8198
6 79.6756

Trecho Vazão(m3/s)

1 0.16500
2 0.06750
3 0.03750
4 0.04500
5 0.06750
6 0.03750

Passo da Operação: 3

Nó Pressão(mca)

1 0.0000
2 36.9781
3 39.6183
4 44.6183
5 41.8198
6 79.6756

Trecho Vazão(m3/s)

1 0.16500
2 0.06750
3 0.03750
4 0.04500
5 0.06750
6 0.03750

Passo da Operação: 4

Nó Pressão(mca)

1 0.0000
2 35.9714
3 37.8333
4 42.8333
5 38.1163
6 72.9024

Trecho Vazão(m3/s)

1 0.19250
2 0.07875
3 0.04375
4 0.05250
5 0.07875
6 0.04375

Passo da Operação: 5

Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 33.5488
3 33.5436
4 38.5436
5 29.2178
6 56.5959
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.24750
2 0.10125
3 0.05625
4 0.06750
5 0.10125
6 0.05625
Passo da Operação: 6
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 32.1348
3 31.0427
4 36.0427
5 24.0303
6 47.0748
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.27500
2 0.11250
3 0.06250
4 0.07500
5 0.11250
6 0.06250
Passo da Operação: 7
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 27.0894
3 22.1309
4 27.1309
5 5.5461
6 13.0911
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.35750
2 0.14625
3 0.08125
4 0.09750
5 0.14625
6 0.08125
Passo da Operação: 8
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 28.9045
3 25.3353
4 30.3353
5 12.1924
6 25.3191
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.33000
2 0.13500
3 0.07500
4 0.09000
5 0.13500
6 0.07500
Passo da Operação: 9
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 30.5865
3 28.3062
4 33.3062
5 18.3544
6 36.6480
Trecho Vazão(m3/s)

1 0.30250
2 0.12375
3 0.06875
4 0.08250
5 0.12375
6 0.06875
Passo da Operação: 10
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 32.1348
3 31.0427
4 36.0427
5 24.0303
6 47.0748
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.27500
2 0.11250
3 0.06250
4 0.07500
5 0.11250
6 0.06250
Passo da Operação: 11
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 30.5865
3 28.3062
4 33.3062
5 18.3544
6 36.6480
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.30250
2 0.12375
3 0.06875
4 0.08250
5 0.12375
6 0.06875
Passo da Operação: 12
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 28.9045
3 25.3353
4 30.3353
5 12.1924
6 25.3191
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.33000
2 0.13500
3 0.07500
4 0.09000
5 0.13500
6 0.07500
Passo da Operação: 13
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 28.9045
3 25.3353
4 30.3353
5 12.1924
6 25.3191
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.33000
2 0.13500
3 0.07500
4 0.09000
5 0.13500
6 0.07500
Passo da Operação: 14
Nó Pressão(mca)

1 0.0000
2 30.5865
3 28.3062
4 33.3062
5 18.3544
6 36.6480
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.30250
2 0.12375
3 0.06875
4 0.08250
5 0.12375
6 0.06875
Passo da Operação: 15
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 30.5865
3 28.3062
4 33.3062
5 18.3544
6 36.6480
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.30250
2 0.12375
3 0.06875
4 0.08250
5 0.12375
6 0.06875
Passo da Operação: 16
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 32.1348
3 31.0427
4 36.0427
5 24.0303
6 47.0748
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.27500
2 0.11250
3 0.06250
4 0.07500
5 0.11250
6 0.06250
Passo da Operação: 17
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 30.5865
3 28.3062
4 33.3062
5 18.3544
6 36.6480
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.30250
2 0.12375
3 0.06875
4 0.08250
5 0.12375
6 0.06875
Passo da Operação: 18
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 28.9045
3 25.3353
4 30.3353
5 12.1924
6 25.3191
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.33000

2 0.13500
3 0.07500
4 0.09000
5 0.13500
6 0.07500
Passo da Operação: 19
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 28.9045
3 25.3353
4 30.3353
5 12.1924
6 25.3191
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.33000
2 0.13500
3 0.07500
4 0.09000
5 0.13500
6 0.07500
Passo da Operação: 20
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 30.5865
3 28.3062
4 33.3062
5 18.3544
6 36.6480
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.30250
2 0.12375
3 0.06875
4 0.08250
5 0.12375
6 0.06875
Passo da Operação: 21
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 32.1348
3 31.0427
4 36.0427
5 24.0303
6 47.0748
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.27500
2 0.11250
3 0.06250
4 0.07500
5 0.11250
6 0.06250
Passo da Operação: 22
Nó Pressão(mca)
1 0.0000
2 33.5488
3 33.5436
4 38.5436
5 29.2178
6 56.5959
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.24750
2 0.10125
3 0.05625
4 0.06750
5 0.10125
6 0.05625
Passo da Operação: 23
Nó Pressão(mca)
1 0.0000

2 34.8280
3 35.8077
4 40.8077
5 33.9143
6 65.2069

Trecho Vazão(m3/s)

1 0.22000
2 0.09000
3 0.05000
4 0.06000
5 0.09000
6 0.05000

Passo da Operação: 24

Nó Pressão(mca)

1 0.0000
2 34.8280
3 35.8077
4 40.8077
5 33.9143
6 65.2069

Trecho Vazão(m3/s)

1 0.22000
2 0.09000
3 0.05000
4 0.06000
5 0.09000
6 0.05000

10/17/2009 11:33:38 AM

Anexo J – Arquivo de Saída da Modelagem de RNV

2/10/2009 08:43:45
Passo da Operação: 1
Nó Pressão(mca)
1 28.6433
2 22.2192
3 25.3496
4 26.1461
5 24.9708
6 26.0075
7 27.9945
8 24.6648
9 21.5792
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.01585
2 0.00823
3 -0.00312
4 0.00283
5 0.00126
6 0.00920
7 0.00567
8 0.04865
9 0.01792
10 0.00315
11 0.00382
Passo da Operação: 2
Nó Pressão(mca)
1 28.3376
2 22.0166
3 25.1156
4 25.9612
5 24.8281
6 25.8561
7 27.8461
8 24.5956
9 21.5301
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.01358
2 0.00704
3 -0.00268
4 0.00243
5 0.00108
6 0.00788
7 0.00486
8 0.04170
9 0.01537
10 0.00270
11 0.00327
Passo da Operação: 3
Nó Pressão(mca)
1 28.0318
2 21.7108
3 24.8098
4 25.6554
5 24.5223
6 25.5504
7 27.5403
8 24.2898
9 21.2243
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.01358
2 0.00704
3 -0.00268
4 0.00243
5 0.00108
6 0.00788
7 0.00486

8 0.04170
9 0.01537
10 0.00270
11 0.00327

Passo da Operação: 4

Nó Pressão(mca)

1 27.6751
2 21.2509
3 24.3814
4 25.1779
5 24.0025
6 25.0393
7 27.0262
8 23.6966
9 20.6110

Trecho Vazão(m3/s)

1 -0.01585
2 0.00823
3 -0.00312
4 0.00283
5 0.00126
6 0.00920
7 0.00567
8 0.04865
9 0.01792
10 0.00315
11 0.00382

Passo da Operação: 5

Nó Pressão(mca)

1 27.2165
2 20.5471
3 23.7520
4 24.4320
5 23.1569
6 24.2139
7 26.1938
8 22.6773
9 19.5445

Trecho Vazão(m3/s)

1 -0.02038
2 0.01059
3 -0.00401
4 0.00362
5 0.00162
6 0.01183
7 0.00729
8 0.06255
9 0.02302
10 0.00405
11 0.00492

Passo da Operação: 6

Nó Pressão(mca)

1 26.7069
2 19.8959
3 23.1437
4 23.7565
5 22.4240
6 23.4925
7 25.4685
8 21.8444
9 18.6846

Trecho Vazão(m3/s)

1 -0.02265
2 0.01178
3 -0.00445
4 0.00402
5 0.00180
6 0.01315

7 0.00810
8 0.06950
9 0.02557
10 0.00450
11 0.00548
Passo da Operação: 7
Nó Pressão(mca)
1 26.0445
2 18.7340
3 22.1326
4 22.5093
5 20.9751
6 22.0839
7 24.0462
8 20.0447
9 16.7908
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.02945
2 0.01534
3 -0.00579
4 0.00520
5 0.00234
6 0.01710
7 0.01053
8 0.09035
9 0.03321
10 0.00585
11 0.00715
Passo da Operação: 8
Nó Pressão(mca)
1 25.4329
2 18.3012
3 21.6460
4 22.1071
5 20.6449
6 21.7394
7 23.7065
8 19.8399
9 16.6195
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.02718
2 0.01415
3 -0.00534
4 0.00481
5 0.00216
6 0.01578
7 0.00972
8 0.08340
9 0.03067
10 0.00540
11 0.00659
Passo da Operação: 9
Nó Pressão(mca)
1 24.8724
2 17.9072
3 21.2016
4 21.7415
5 20.3466
6 21.4276
7 23.3993
8 19.6585
9 16.4695
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.02491
2 0.01297
3 -0.00490
4 0.00441
5 0.00198

6 0.01446
7 0.00891
8 0.07645
9 0.02812
10 0.00495
11 0.00604
Passo da Operação: 10
Nó Pressão(mca)
1 24.3627
2 17.5517
3 20.7996
4 21.4124
5 20.0798
6 21.1484
7 23.1244
8 19.5002
9 16.3405
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.02265
2 0.01178
3 -0.00445
4 0.00402
5 0.00180
6 0.01315
7 0.00810
8 0.06950
9 0.02557
10 0.00450
11 0.00548
Passo da Operação: 11
Nó Pressão(mca)
1 23.8022
2 16.8370
3 20.1315
4 20.6713
5 19.2764
6 20.3575
7 22.3292
8 18.5883
9 15.3993
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.02491
2 0.01297
3 -0.00490
4 0.00441
5 0.00198
6 0.01446
7 0.00891
8 0.07645
9 0.02812
10 0.00495
11 0.00604
Passo da Operação: 12
Nó Pressão(mca)
1 23.1907
2 16.0590
3 19.4037
4 19.8648
5 18.4027
6 19.4972
7 21.4643
8 17.5976
9 14.3773
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.02718
2 0.01415
3 -0.00534
4 0.00481

5 0.00216
6 0.01578
7 0.00972
8 0.08340
9 0.03067
10 0.00540
11 0.00659
Passo da Operação: 13
Nó Pressão(mca)
1 22.5792
2 15.4475
3 18.7922
4 19.2533
5 17.7912
6 18.8856
7 20.8528
8 16.9861
9 13.7658
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.02718
2 0.01415
3 -0.00534
4 0.00481
5 0.00216
6 0.01578
7 0.00972
8 0.08340
9 0.03067
10 0.00540
11 0.00659
Passo da Operação: 14
Nó Pressão(mca)
1 22.0186
2 15.0534
3 18.3479
4 18.8877
5 17.4928
6 18.5739
7 20.5456
8 16.8047
9 13.6157
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.02491
2 0.01297
3 -0.00490
4 0.00441
5 0.00198
6 0.01446
7 0.00891
8 0.07645
9 0.02812
10 0.00495
11 0.00604
Passo da Operação: 15
Nó Pressão(mca)
1 21.4581
2 14.4928
3 17.7873
4 18.3272
5 16.9323
6 18.0133
7 19.9850
8 16.2442
9 13.0552
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.02491
2 0.01297
3 -0.00490

4 0.00441
5 0.00198
6 0.01446
7 0.00891
8 0.07645
9 0.02812
10 0.00495
11 0.00604
Passo da Operação: 16
Nó Pressão(mca)
1 20.9484
2 14.1374
3 17.3852
4 17.9981
5 16.6655
6 17.7341
7 19.7101
8 16.0859
9 12.9261
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.02265
2 0.01178
3 -0.00445
4 0.00402
5 0.00180
6 0.01315
7 0.00810
8 0.06950
9 0.02557
10 0.00450
11 0.00548
Passo da Operação: 17
Nó Pressão(mca)
1 20.3879
2 13.4227
3 16.7172
4 17.2570
5 15.8621
6 16.9432
7 18.9149
8 15.1740
9 11.9850
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.02491
2 0.01297
3 -0.00490
4 0.00441
5 0.00198
6 0.01446
7 0.00891
8 0.07645
9 0.02812
10 0.00495
11 0.00604
Passo da Operação: 18
Nó Pressão(mca)
1 19.7764
2 12.6447
3 15.9894
4 16.4505
5 14.9884
6 16.0828
7 18.0500
8 14.1833
9 10.9630
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.02718
2 0.01415

3 -0.00534
4 0.00481
5 0.00216
6 0.01578
7 0.00972
8 0.08340
9 0.03067
10 0.00540
11 0.00659
Passo da Operação: 19
Nó Pressão(mca)
1 19.1649
2 12.0331
3 15.3779
4 15.8390
5 14.3769
6 15.4713
7 17.4385
8 13.5718
9 10.3514
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.02718
2 0.01415
3 -0.00534
4 0.00481
5 0.00216
6 0.01578
7 0.00972
8 0.08340
9 0.03067
10 0.00540
11 0.00659
Passo da Operação: 20
Nó Pressão(mca)
1 18.6043
2 11.6391
3 14.9336
4 15.4734
5 14.0785
6 15.1596
7 17.1313
8 13.3904
9 10.2014
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.02491
2 0.01297
3 -0.00490
4 0.00441
5 0.00198
6 0.01446
7 0.00891
8 0.07645
9 0.02812
10 0.00495
11 0.00604
Passo da Operação: 21
Nó Pressão(mca)
1 18.0947
2 11.2836
3 14.5315
4 15.1443
5 13.8118
6 14.8803
7 16.8563
8 13.2322
9 10.0724
Trecho Vazão(m3/s)
1 -0.02265

2 0.01178
3 -0.00445
4 0.00402
5 0.00180
6 0.01315
7 0.00810
8 0.06950
9 0.02557
10 0.00450
11 0.00548

Passo da Operação: 22

Nó Pressão(mca)

1 17.6360
2 10.9666
3 14.1716
4 14.8516
5 13.5765
6 14.6334
7 16.6134
8 13.0968
9 9.9640

Trecho Vazão(m3/s)

1 -0.02038
2 0.01059
3 -0.00401
4 0.00362
5 0.00162
6 0.01183
7 0.00729
8 0.06255
9 0.02302
10 0.00405
11 0.00492

Passo da Operação: 23

Nó Pressão(mca)

1 17.2283
2 10.6880
3 13.8537
4 14.5950
5 13.3723
6 14.4187
7 16.4023
8 12.9839
9 9.8759

Trecho Vazão(m3/s)

1 -0.01811
2 0.00941
3 -0.00357
4 0.00323
5 0.00144
6 0.01051
7 0.00648
8 0.05560
9 0.02047
10 0.00360
11 0.00437

Passo da Operação: 24

Nó Pressão(mca)

1 16.8207
2 10.2803
3 13.4461
4 14.1873
5 12.9646
6 14.0110
7 15.9946
8 12.5762
9 9.4682

Trecho Vazão(m3/s)

1 -0.01811
2 0.00941
3 -0.00357
4 0.00323
5 0.00144
6 0.01051
7 0.00648
8 0.05560
9 0.02047
10 0.00360
11 0.00437
2/10/2009 08:43:48

PRESSÃO (MCA) - RESULTADOS DO MOC

Nº	Hora 01	Hora 02	Hora 03	Hora 04	Hora 05	Hora 06	Hora 07	Hora 08	Hora 09	Hora 10	Hora 11	Hora 12	Hora 13	Hora 14	Hora 15	Hora 16	Hora 17	Hora 18	Hora 19	Hora 20	Hora 21	Hora 22	Hora 23	Hora 24
63	19.03	22.01	23.69	23.69	23.69	23.69	20.63	17.42	12.48	10.87	9.16	7.44	7.44	9.16	10.86	10.86	10.86	10.86	10.86	12.48	12.48	14.15	15.79	17.42
64	32.99	35.91	37.56	37.56	37.56	37.56	34.55	31.41	26.56	24.98	23.31	21.63	21.63	23.31	24.98	24.98	24.98	24.98	24.98	26.56	26.56	28.20	29.81	31.41
65	22.83	25.91	27.66	27.66	27.66	27.66	24.48	21.17	16.04	14.37	12.60	10.81	10.81	12.60	14.37	14.37	14.37	14.37	14.37	16.04	16.04	17.77	19.48	21.17
66	24.61	28.14	30.14	30.14	30.14	30.14	26.51	22.69	16.78	14.84	12.79	10.72	10.72	12.79	14.84	14.84	14.84	14.84	14.84	16.78	16.78	18.78	20.75	22.69
67	28.89	31.85	33.53	33.53	33.53	33.53	30.48	27.30	22.38	20.77	19.09	17.38	17.37	19.08	20.78	20.78	20.78	20.78	20.78	22.38	22.38	24.05	25.67	27.31
68	29.87	32.84	34.51	34.51	34.51	34.51	31.46	28.28	23.36	21.75	20.06	18.35	18.35	20.06	21.75	21.75	21.75	21.75	21.75	23.36	23.35	25.03	26.65	28.29
69	31.80	34.73	36.41	36.41	36.41	36.41	33.36	30.17	25.28	23.60	21.90	20.24	20.24	21.95	23.65	23.65	23.65	23.65	23.65	25.24	25.20	26.83	28.56	30.12
70	26.99	29.89	31.53	31.53	31.53	31.53	28.54	25.42	20.60	19.03	17.45	15.74	15.64	17.34	19.03	19.03	19.03	19.03	19.03	20.60	20.60	22.22	23.83	25.42
71	26.85	29.76	31.42	31.42	31.42	31.42	28.41	25.27	20.44	18.86	17.20	15.52	15.51	17.19	18.86	18.86	18.86	18.86	18.86	20.44	20.44	22.07	23.68	25.27
72	25.85	28.76	30.41	30.41	30.41	30.41	27.41	24.27	19.43	17.85	16.19	14.51	14.50	16.19	17.85	17.85	17.85	17.85	17.85	19.43	19.43	21.06	22.67	24.27
73	24.26	27.18	28.84	28.84	28.84	28.84	25.83	22.68	17.83	16.25	14.58	12.89	12.89	14.58	16.25	16.25	16.25	16.25	16.25	17.83	17.83	19.47	21.08	22.68
74	23.08	26.02	27.69	27.69	27.69	27.69	24.66	21.49	16.61	15.01	13.33	11.63	11.64	13.33	15.01	15.01	15.01	15.01	15.01	16.61	16.61	18.25	19.88	21.49
75	21.83	24.79	26.47	26.47	26.47	26.47	23.42	20.22	15.30	13.69	12.00	10.28	10.28	12.00	13.69	13.69	13.69	13.69	13.69	15.30	15.30	16.96	18.60	20.22
76	21.15	24.12	25.82	25.82	25.82	25.82	22.74	19.53	14.58	12.96	11.25	9.53	9.53	11.25	12.96	12.96	12.96	12.96	12.96	14.58	14.58	16.25	17.90	19.53
77	22.16	25.13	26.82	26.82	26.82	26.82	23.75	20.54	15.59	13.97	12.27	10.54	10.54	12.26	13.97	13.97	13.97	13.97	13.97	15.59	15.59	17.26	18.91	20.54
78	29.73	32.65	34.31	34.31	34.31	34.31	31.30	28.15	23.29	21.71	20.04	18.35	18.35	20.03	21.71	21.71	21.71	21.71	21.71	23.29	23.29	24.93	26.55	28.15
79	25.98	29.07	30.82	30.82	30.82	30.82	27.64	24.30	19.15	17.47	15.69	13.90	13.90	15.69	17.47	17.47	17.47	17.47	17.47	19.15	19.15	20.89	22.61	24.30
80	20.99	24.31	26.19	26.19	26.19	26.19	22.77	19.19	13.63	11.82	9.90	7.96	7.96	9.90	11.82	11.82	11.82	11.82	11.82	13.63	13.63	15.51	17.36	19.19
81	22.97	26.01	27.74	27.74	27.74	27.74	24.60	21.32	16.25	14.59	12.85	11.08	11.08	12.85	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	16.25	16.25	17.96	19.65	21.32
82	28.20	31.12	32.79	32.79	32.79	32.79	29.77	26.61	21.75	20.16	18.49	16.80	16.80	18.49	20.16	20.16	20.16	20.16	20.16	21.75	21.75	23.39	25.01	26.61
83	25.68	28.61	30.27	30.27	30.27	30.27	27.25	24.10	19.23	17.64	15.97	14.27	14.27	15.97	17.64	17.64	17.64	17.64	17.64	19.23	19.23	20.87	22.49	24.10
84	29.81	32.73	34.38	34.38	34.38	34.38	31.37	28.23	23.39	21.81	20.14	18.46	18.46	20.14	21.81	21.81	21.81	21.81	21.81	23.39	23.39	25.02	26.64	28.23
85	33.29	36.21	37.86	37.86	37.86	37.86	34.85	31.71	26.86	25.28	23.62	21.93	21.93	23.61	25.28	25.28	25.28	25.28	25.28	26.86	26.86	28.50	30.11	31.71
86	23.89	26.80	28.45	28.45	28.45	28.45	25.45	22.32	17.49	15.91	14.25	12.57	12.57	14.25	15.91	15.91	15.91	15.91	15.91	17.49	17.49	19.11	20.72	22.32
87	22.03	24.93	26.57	26.57	26.57	26.57	23.58	20.47	15.66	14.09	12.43	10.76	10.76	12.43	14.09	14.09	14.09	14.09	14.09	15.66	15.66	17.28	18.88	20.47
88	20.01	22.96	24.63	24.63	24.63	24.63	21.59	18.42	13.53	11.93	10.24	8.54	8.54	10.24	11.93	11.93	11.93	11.93	11.93	13.53	13.53	15.18	16.81	18.42
89	23.14	26.06	27.72	27.72	27.72	27.72	24.70	21.53	16.66	15.07	13.39	11.69	11.69	13.39	15.06	15.06	15.06	15.06	15.06	16.66	16.66	18.28	19.94	21.51
90	21.19	24.17	25.86	25.86	25.86	25.86	22.79	19.58	14.63	13.02	11.31	9.59	9.59	11.31	13.02	13.02	13.02	13.02	13.02	14.63	14.63	16.30	17.95	19.58
91	28.18	31.07	32.70	32.70	32.70	32.70	29.73	26.63	21.85	20.28	18.68	16.98	16.94	18.63	20.28	20.28	20.28	20.28	20.28	21.85	21.85	23.46	25.05	26.63
92	25.70	28.54	30.15	30.15	30.15	30.15	27.23	24.18	19.49	17.95	16.34	14.71	14.71	16.34	17.95	17.95	17.95	17.95	17.95	19.49	19.49	21.07	22.63	24.19
93	29.94	32.74	34.34	34.34	34.34	34.34	31.44	28.42	23.76	22.24	20.63	19.02	19.03	20.64	22.24	22.24	22.24	22.24	22.24	23.76	23.76	25.33	26.88	28.42
94	23.25	26.24	27.90	27.90	27.90	27.90	24.89	21.75	16.92	15.32	13.68	12.00	12.00	13.68	15.34	15.34	15.34	15.34	15.34	16.94	16.91	18.64	20.11	21.88
95	24.84	27.80	29.48	29.48	29.48	29.48	26.42	23.23	18.31	16.70	15.01	13.29	13.29	15.00	16.70	16.70	16.70	16.70	16.70	18.31	18.31	19.97	21.62	23.23
96	25.37	28.31	29.99	29.99	29.99	29.99	26.94	23.75	18.76	17.42	15.76	13.82	13.82	15.53	17.22	17.22	17.22	17.22	17.22	18.87	19.07	20.64	22.15	23.76
97	32.77	35.74	37.42	37.42	37.42	37.42	34.36	31.18	26.26	24.65	22.96	21.25	21.24	22.96	24.65	24.65	24.65	24.65	24.65	26.26	26.26	27.93	29.55	31.19
98	25.26	28.76	30.74	30.74	30.74	30.74	27.13	23.36	17.50	15.58	13.55	11.50	11.50	13.55	15.58	15.58	15.58	15.58	15.58	17.50	17.50	19.48	21.43	23.36
99	23.10	26.61	28.60	28.60	28.60	28.60	24.98	21.19	15.30	13.37	11.34	9.27	9.27	11.34	13.37	13.37	13.37	13.37	13.37	15.30	15.30	17.29	19.25	21.19
100	21.89	25.42	27.42	27.42	27.42	27.42	23.79	19.97	14.05	12.11	10.06	7.98	7.98	10.06	12.11	12.11	12.11	12.11	12.11	14.05	14.05	16.05	18.02	19.97
101	21.37	24.90	26.90	26.90	26.90	26.90	23.26	19.44	13.51	11.57	9.52	7.46	7.46	9.54	11.59	11.59	11.59	11.59	11.59	13.53	13.53	15.53	17.50	19.45
102	22.87	26.41	28.41	28.41	28.41	28.41	24.77	20.95	15.03	13.09	11.04	8.96	8.96	11.04	13.09	13.09	13.09	13.09	13.09	15.03	15.03	17.03	19.00	20.95
103	21.86	25.40	27.40	27.40	27.40	27.40	23.76	19.94	14.02	12.08	10.03	7.95	7.95	10.03	12.08	12.08	12.08	12.08	12.08	14.02	14.02	16.02	17.99	19.94
104	21.36	24.89	26.90	26.90	26.90	26.90	23.26	19.44	13.51	11.57	9.52	7.44	7.44	9.52	11.57	11.57	11.57	11.57	11.57	13.51	13.51	15.51	17.49	19.44
105	23.36	26.89	28.90	28.90	28.90	28.90	25.26	21.44	15.51	13.57	11.52	9.44	9.44	11.52	13.57	13.57	13.57	13.57	13.57	15.51	15.51	17.51	19.49	21.44
106	22.76	26.29	28.30	28.30	28.30	28.30	24.66	20.84	14.91	12.97	10.92	8.84	8.84	10.92	12.97	12.97	12.97	12.97	12.97	14.91	14.91	16.91	18.89	20.84
107	23.36	26.90	28.90	28.90	28.90	28.90	25.26	21.44	15.52	13.58	11.53	9.45	9.45	11.53	13.58	13.58	13.58	13.58	13.58	15.52	15.52	17.52	19.49	21.44
108	22.36	25.89	27.90	27.90	27.90	27.90	24.26	20.44	14.51	12.57	10.52	8.44	8.44	10.52	12.57	12.57	12.57	12.57	12.57	14.51	14.51	16.51	18.49	20.44
109	26.52	30.04	32.03	32.03	32.03	32.03	28.40	24.60	18.70	16.77	14.73	12.66	12.66	14.73	16.77	16.77	16.77	16.77	16.77	18.70	18.70	20.70	22.66	24.60
110	25.40	28.94	30.93	30.93	30.93	30.93	27.30	23.48	17.57	15.63	13.58	11.51	11.51	13.58	15.63	15.63	15.63	15.63	15.63	17.57	17.57			

VAZÃO (L/s) - RESULTADOS DO MOC																								
Trecho	Hora 01	Hora 02	Hora 03	Hora 04	Hora 05	Hora 06	Hora 07	Hora 08	Hora 09	Hora 10	Hora 11	Hora 12	Hora 13	Hora 14	Hora 15	Hora 16	Hora 17	Hora 18	Hora 19	Hora 20	Hora 21	Hora 22	Hora 23	Hora 24
1	3,80	3,60	3,48	3,48	3,48	3,48	3,70	3,92	4,24	4,34	4,45	4,57	4,57	4,46	4,35	4,35	4,35	4,35	4,35	4,25	4,25	4,12	4,01	3,91
2	2,68	2,53	2,45	2,45	2,45	2,45	2,60	2,76	2,99	3,06	3,14	3,22	3,22	3,14	3,06	3,06	3,06	3,06	3,06	2,99	2,99	2,91	2,84	2,76
3	1,10	1,04	1,00	1,00	1,00	1,00	1,07	1,13	1,22	1,25	1,28	1,31	1,31	1,28	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,22	1,22	1,19	1,16	1,13
4	1,07	1,01	0,98	0,98	0,98	0,98	1,03	1,09	1,19	1,21	1,24	1,27	1,27	1,24	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,18	1,18	1,16	1,13	1,10
5	1,35	1,28	1,24	1,24	1,24	1,24	1,31	1,39	1,51	1,54	1,58	1,62	1,62	1,58	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,51	1,51	1,47	1,43	1,39
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	1,33	1,25	1,21	1,21	1,21	1,21	1,29	1,36	1,48	1,52	1,55	1,59	1,59	1,55	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,48	1,48	1,44	1,40	1,36
8	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08
9	0,12	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,14	0,12
10	1,16	1,10	1,07	1,07	1,07	1,07	1,13	1,20	1,30	1,33	1,37	1,40	1,40	1,37	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,30	1,30	1,27	1,23	1,20
11	1,00	0,95	0,92	0,92	0,92	0,92	0,97	1,03	1,12	1,15	1,18	1,20	1,20	1,17	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,12	1,12	1,09	1,06	1,03
12	0,54	0,52	0,50	0,50	0,50	0,50	0,53	0,56	0,61	0,63	0,64	0,66	0,66	0,64	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,61	0,61	0,59	0,58	0,56
13	0,53	0,50	0,49	0,49	0,49	0,49	0,52	0,55	0,59	0,61	0,62	0,64	0,64	0,62	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,59	0,59	0,58	0,56	0,54
14	0,74	0,70	0,68	0,68	0,68	0,68	0,72	0,77	0,84	0,86	0,88	0,91	0,91	0,88	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,84	0,84	0,81	0,79	0,77
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	1,11	1,11	1,08	1,08	1,08	1,08	1,14	1,21	1,31	1,34	1,38	1,41	1,41	1,38	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,31	1,31	1,28	1,25	1,21
17	0,23	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,23	0,25	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23
18	3,78	3,57	3,45	3,45	3,45	3,45	3,67	3,89	4,21	4,32	4,43	4,53	4,53	4,43	4,32	4,32	4,32	4,32	4,32	4,21	4,21	4,10	3,99	3,89
19	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,21	0,21	0,20
20	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04
21	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,11	-0,11	-0,11	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
22	-0,38	-0,36	-0,35	-0,35	-0,35	-0,35	-0,37	-0,39	-0,42	-0,43	-0,44	-0,46	-0,46	-0,45	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,44	-0,43	-0,43	-0,42	-0,41	-0,40
23	-0,40	-0,38	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37	-0,39	-0,41	-0,44	-0,45	-0,46	-0,48	-0,48	-0,47	-0,46	-0,46	-0,46	-0,46	-0,46	-0,45	-0,45	-0,44	-0,42	-0,41
24	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	0,20	0,22	0,24	0,26	0,27	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23	0,22	0,22
25	0,19	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,22	0,24	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,21	0,21	0,20
26	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10
27	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,16
28	1,92	1,81	1,75	1,75	1,75	1,75	1,86	1,97	2,14	2,19	2,25	2,31	2,30	2,23	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,14	2,14	2,08	2,03	1,97
29	1,86	1,76	1,70	1,70	1,70	1,70	1,81	1,91	2,07	2,13	2,18	2,24	2,23	2,17	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,07	2,07	2,02	1,97	1,91
30	4,21	3,99	3,86	3,86	3,86	3,86	4,10	4,34	4,70	4,82	4,94	5,06	5,06	4,94	4,82	4,82	4,82	4,82	4,82	4,71	4,71	4,58	4,45	4,34
31	4,18	3,95	3,82	3,82	3,82	3,82	4,05	4,29	4,66	4,77	4,89	5,01	5,01	4,89	4,77	4,77	4,77	4,77	4,77	4,65	4,65	4,55	4,43	4,30
32	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
33	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
34	4,20	3,97	3,84	3,84	3,84	3,84	4,08	4,32	4,68	4,79	4,91	5,03	5,04	4,91	4,79	4,79	4,79	4,79	4,79	4,68	4,68	4,56	4,44	4,32
35	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,03	-0,04	-0,05	-0,05	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,04	-0,04
36	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08
37	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06
38	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05
39	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02
40	2,66	2,51	2,42	2,42	2,42	2,42	2,57	2,72	2,96	3,03	3,10	3,18	3,18	3,10	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	2,95	2,95	2,89	2,81	2,73
41	1,16	1,09	1,05	1,05	1,05	1,05	1,12	1,18	1,29	1,32	1,35	1,38	1,38	1,35	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,28	1,28	1,26	1,23	1,19
42	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
43	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
44	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
45	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01

VAZAO (L/s) - RESULTADOS DO MOC

Trecho	Hora 01	Hora 02	Hora 03	Hora 04	Hora 05	Hora 06	Hora 07	Hora 08	Hora 09	Hora 10	Hora 11	Hora 12	Hora 13	Hora 14	Hora 15	Hora 16	Hora 17	Hora 18	Hora 19	Hora 20	Hora 21	Hora 22	Hora 23	Hora 24
46	9,74	9,21	8,91	8,91	8,91	8,91	9,46	10,02	10,86	11,13	11,41	11,69	11,69	11,41	11,13	11,13	11,13	11,13	11,13	10,86	10,86	10,58	10,30	10,02
47	1,15	1,08	1,05	1,05	1,05	1,05	1,11	1,18	1,28	1,31	1,34	1,37	1,37	1,34	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,28	1,28	1,25	1,21	1,18
48	1,12	1,05	1,02	1,02	1,02	1,02	1,08	1,15	1,25	1,28	1,31	1,34	1,34	1,30	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,24	1,24	1,22	1,18	1,15
49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	0,82	0,78	0,76	0,76	0,76	0,76	0,80	0,85	0,92	0,94	0,97	0,99	0,99	0,97	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,92	0,92	0,89	0,86	0,84
51	0,79	0,77	0,74	0,74	0,74	0,74	0,79	0,84	0,90	0,93	0,95	0,98	0,98	0,95	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,91	0,91	0,87	0,83	0,82
52	0,51	0,48	0,47	0,47	0,47	0,47	0,50	0,52	0,57	0,58	0,60	0,62	0,62	0,60	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,57	0,57	0,56	0,54	0,53
53	0,48	0,45	0,43	0,43	0,43	0,43	0,46	0,48	0,52	0,54	0,55	0,57	0,57	0,56	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,53	0,53	0,52	0,50	0,49
54	0,16	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
55	0,11	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11
56	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,16	0,16	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,08	0,10	0,07	0,09	0,10
57	0,23	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,24	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25
58	1,38	1,30	1,26	1,26	1,26	1,26	1,34	1,42	1,54	1,57	1,61	1,63	1,65	1,64	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,54	1,54	1,50	1,46	1,42
59	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,21	0,23	0,23	0,24	0,25	0,25	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,21
60	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05
61	0,20	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,21	0,22	0,23	0,24	0,26	0,25	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,21	0,20
62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
67	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10
68	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
71	-0,17	-0,17	-0,16	-0,16	-0,16	-0,16	-0,17	-0,18	-0,19	-0,19	-0,19	-0,20	-0,20	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,18	-0,18	-0,18
72	-0,19	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,19	-0,19	-0,21	-0,21	-0,21	-0,22	-0,22	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,20	-0,20	-0,19
73	2,20	2,08	2,02	2,02	2,02	2,02	2,14	2,26	2,45	2,51	2,57	2,63	2,63	2,57	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,45	2,45	2,39	2,32	2,26
74	2,19	2,07	2,01	2,01	2,01	2,01	2,13	2,25	2,44	2,50	2,56	2,62	2,62	2,56	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,44	2,44	2,38	2,31	2,25
75	2,89	2,73	2,64	2,64	2,64	2,64	2,80	2,97	3,22	3,30	3,39	3,47	3,47	3,39	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,22	3,22	3,14	3,05	2,97
76	2,87	2,71	2,62	2,62	2,62	2,62	2,79	2,95	3,20	3,28	3,37	3,45	3,45	3,37	3,28	3,28	3,28	3,28	3,28	3,20	3,20	3,12	3,04	2,95
77	3,32	3,14	3,04	3,04	3,04	3,04	3,23	3,42	3,70	3,80	3,89	3,99	3,99	3,89	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80	3,70	3,70	3,61	3,51	3,42
78	3,28	3,10	3,00	3,00	3,00	3,00	3,18	3,37	3,65	3,74	3,84	3,93	3,93	3,84	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74	3,65	3,65	3,56	3,46	3,37
79	0,81	0,77	0,74	0,74	0,74	0,74	0,79	0,83	0,90	0,93	0,95	0,97	0,97	0,95	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,90	0,90	0,88	0,86	0,83
80	0,84	0,79	0,77	0,77	0,77	0,77	0,81	0,86	0,94	0,96	0,98	1,01	1,01	0,98	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,94	0,94	0,91	0,89	0,86
81	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05
82	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
83	0,91	0,86	0,83	0,83	0,83	0,83	0,88	0,94	1,02	1,05	1,08	1,11	1,11	1,08	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,02	1,02	0,99	0,97	0,94
84	0,93	0,88	0,85	0,85	0,85	0,85	0,91	0,96	1,05	1,08	1,10	1,13	1,13	1,10	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,05	1,05	1,02	0,99	0,96
85	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08
86	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
87	3,29	3,11	3,01	3,01	3,01	3,01	3,19	3,38	3,66	3,75	3,85	3,94	3,94	3,85	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,66	3,66	3,57	3,47	3,38
88	2,91	2,75	2,66	2,66	2,66	2,66	2,83	3,00	3,25	3,33	3,41	3,49	3,49	3,41	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,25	3,25	3,16	3,08	3,00
89	1,76	1,67	1,61	1,61	1,61	1,61	1,71	1,81	1,97	2,02	2,06	2,12	2,12	2,07	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	1,97	1,97	1,92	1,86	1,81
90	1,72	1,63	1,57	1,57	1,57	1,57	1,67	1,77	1,92	1,97	2,01	2,06	2,07	2,02	1,97	1,97	1,97	1,97	1,97	1,92	1,92	1,87	1,82	1,77

VAZÃO (L/s) - RESULTADOS DO MOC

Trecho	Hora 01	Hora 02	Hora 03	Hora 04	Hora 05	Hora 06	Hora 07	Hora 08	Hora 09	Hora 10	Hora 11	Hora 12	Hora 13	Hora 14	Hora 15	Hora 16	Hora 17	Hora 18	Hora 19	Hora 20	Hora 21	Hora 22	Hora 23	Hora 24
93	6,23	5,89	5,70	5,70	5,70	5,70	6,05	6,41	6,94	7,12	7,30	7,48	7,47	7,29	7,12	7,12	7,12	7,12	7,12	6,95	6,95	6,76	6,58	6,40
94	6,21	5,89	5,69	5,69	5,69	5,69	6,04	6,40	6,94	7,11	7,29	7,48	7,47	7,28	7,11	7,11	7,11	7,11	7,11	6,94	6,94	6,75	6,57	6,39
95	0,25	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,23	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,24	0,24	0,27	0,28	0,25
96	1,33	1,26	1,21	1,21	1,21	1,21	1,29	1,37	1,48	1,52	1,55	1,59	1,59	1,55	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,48	1,48	1,44	1,40	1,37
97	1,22	1,16	1,12	1,12	1,12	1,12	1,19	1,26	1,36	1,40	1,43	1,47	1,47	1,43	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,36	1,36	1,33	1,29	1,26
98	0,43	0,40	0,39	0,39	0,39	0,39	0,41	0,44	0,43	0,45	0,49	0,51	0,51	0,50	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,52	0,50	0,49	0,45	0,43
99	0,21	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,21	0,22	0,22	0,23	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,24	0,22	0,22
100	1,06	1,00	0,97	0,97	0,97	0,97	1,03	1,09	1,18	1,21	1,24	1,27	1,27	1,24	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,18	1,18	1,15	1,12	1,09
101	1,00	0,95	0,91	0,91	0,91	0,91	0,97	1,03	1,11	1,14	1,17	1,20	1,20	1,17	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,11	1,11	1,09	1,06	1,03
102	2,29	2,16	2,09	2,09	2,09	2,09	2,22	2,35	2,55	2,62	2,68	2,75	2,75	2,68	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,55	2,55	2,49	2,42	2,35
103	2,17	2,05	1,99	1,99	1,99	1,99	2,11	2,23	2,42	2,48	2,55	2,61	2,61	2,55	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,42	2,42	2,36	2,30	2,23
104	0,86	0,81	0,79	0,79	0,79	0,79	0,84	0,88	0,96	0,98	1,00	1,03	1,03	1,00	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,96	0,96	0,93	0,91	0,88
105	0,69	0,65	0,63	0,63	0,63	0,63	0,67	0,71	0,76	0,78	0,80	0,82	0,82	0,80	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,76	0,76	0,74	0,72	0,71
106	1,01	0,95	0,92	0,92	0,92	0,92	0,98	1,04	1,13	1,16	1,19	1,23	1,23	1,19	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,13	1,13	1,10	1,07	1,04
107	1,00	0,94	0,91	0,91	0,91	0,91	0,97	1,03	1,12	1,15	1,18	1,21	1,21	1,18	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,12	1,12	1,09	1,06	1,03
108	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
109	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
110	0,76	0,72	0,69	0,69	0,69	0,69	0,74	0,79	0,86	0,88	0,90	0,93	0,93	0,90	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,86	0,86	0,83	0,81	0,79
111	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07
112	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
113	3,94	3,72	3,60	3,60	3,60	3,60	3,82	4,05	4,39	4,50	4,61	4,73	4,73	4,61	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,39	4,39	4,28	4,16	4,05
114	3,86	3,65	3,53	3,53	3,53	3,53	3,75	3,97	4,30	4,41	4,52	4,63	4,63	4,52	4,41	4,41	4,41	4,41	4,41	4,30	4,30	4,19	4,08	3,97
115	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,23	0,26	0,29	0,30	0,31	0,30	0,30	0,29	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,26	0,25	0,24
116	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,21	0,24	0,26	0,27	0,28	0,27	0,27	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,22
117	0,07	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08
118	0,06	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06
119	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
120	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
121	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
122	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
123	0,20	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,21	0,23	0,23	0,24	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,23	0,23	0,22	0,21	0,21
124	0,19	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,20	0,22	0,22	0,23	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,21	0,20	0,20
125	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10
126	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09
127	0,83	0,78	0,76	0,76	0,76	0,76	0,80	0,85	0,92	0,95	0,97	0,99	0,99	0,97	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,92	0,92	0,90	0,87	0,85
128	0,81	0,77	0,74	0,74	0,74	0,74	0,79	0,84	0,91	0,93	0,95	0,98	0,98	0,95	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,91	0,91	0,88	0,86	0,84
129	0,28	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,29	0,32	0,33	0,34	0,34	0,34	0,33	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,31	0,31	0,30	0,30	0,29
130	0,18	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,19	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20	0,19	0,19	0,18
131	0,80	0,76	0,73	0,73	0,73	0,73	0,78	0,82	0,89	0,92	0,94	0,96	0,96	0,94	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,89	0,89	0,87	0,85	0,82
132	0,80	0,76	0,73	0,73	0,73	0,73	0,78	0,82	0,89	0,91	0,94	0,96	0,96	0,94	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,89	0,89	0,87	0,84	0,82
133	0,84	0,80	0,77	0,77	0,77	0,77	0,82	0,86	0,94	0,96	0,99	1,01	1,01	0,98	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,94	0,94	0,91	0,89	0,86
134	1,18	1,11	1,08	1,08	1,08	1,08	1,14	1,21	1,31	1,35	1,38	1,41	1,41	1,38	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,31	1,31	1,28	1,25	1,21

Anexo L – Arquivo de Saída da Modelagem de Caso Real 2 no MOC

```
9/12/2009 15:05:35
Passo da Operação: 1
Nó Pressão(mca)
1 379.4064
2 107.7466
3 107.7325
4 107.7289
5 107.7219
6 71.5931
7 49.9444
8 43.8983
9 47.1757
10 65.4670
11 67.2341
12 59.4583
13 28.2695
14 14.0008
15 8.7659
16 0.0000
Trecho Vazão(m3/s)
1 0.02850
2 0.02850
3 0.02850
4 0.02850
5 0.02850
6 0.02850
7 0.02850
8 0.02850
9 0.02850
10 0.02850
11 0.02850
12 0.02850
13 0.02850
14 0.02850
15 -0.02850
9/12/2009 15:05:35
```

Anexo M – Arquivo de Entrada da Otimização (Dados hidráulicos)

[TÍTULO]

Rede para Otimização: 02 EE e 02 RNV

[JUNÇÕES]

12

;ID Cota(m) Consumo(m³/s)

3 256 0.0095

4 253 0.0095

5 252 0.0063

6 283 0.0095

7 282 0.0226

8 280 0.0095

9 280 0.0095

10 282 0.0126

11 283 0.0095

12 252 0.0063

13 253 0.0095

14 256 0.0095

[RESERVATÓRIOS DE NÍVEL FIXO]

0

;ID Carga(m)

[ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS]

2

;ID Cota(m) AEE BEE CEE Controle

2 244 101.33 0 -2807 1

15 244 101.33 0 -2807 2

[RESERVATÓRIOS DE NÍVEL VARIÁVEL - TANQUE]

2

;ID COTA(m) HINICIAL(m) HMÍNIMA(m) HMÁXIMA(m) DIÂMETRO(m)

1 259 37 30.5 46 15

16 259 37 30.5 46 15

[TUBOS]

21

;ID NÓINICIAL NÓFINAL COMPRIMENTO(m) DIÂMETRO(m) ATRITO CELERIDADE(m/s)

1 2 3 3210 0.450 0.03 400

2 3 4 1609 0.350 0.03 400

3 4 5 1609 0.250 0.03 400

4 6 7 1609 0.250 0.03 400

5 7 8 1609 0.200 0.03 400

6 9 10 1609 0.200 0.03 400

7 10 11 1609 0.250 0.03 400

8 12 13 1609 0.250 0.03 400

9 13 14 1609 0.350 0.03 400

10 15 14 3210 0.450 0.03 400

11 3 6 1609 0.250 0.03 400

12 6 9 1609 0.200 0.03 400

13 9 12 1609 0.200 0.03 400

14 1 4 61 0.450 0.03 400

15 4 7 1609 0.300 0.03 400

16 7 10 1609 0.150 0.03 400

17 10 13 1609 0.300 0.03 400

18 16 13 61 0.450 0.03 400

19 5 8 1609 0.200 0.03 400

20 8 11 1609 0.200 0.03 400

21 11 14 1609 0.250 0.03 400

[BOOSTER]

0

;ID NÓINICIAL NÓFINAL COMPRIMENTO(m) DIÂMETRO(m) ATRITO CELERIDADE(m/s) ABO BBO CBO

[VÁLVULAS]

0

;ID Node1 Node2 Diameter Type Setting MinorLoss

[N° de Simulações e Padrões de Demanda]

24

;Multiplicadores

0.833 0.788 0.762 0.762 0.762 0.762 0.809 0.857 0.929 0.952 0.976 1 1 0.976 0.952 0.952

0.952 0.952 0.952 0.929 0.929 0.905 0.881 0.857

[Controles] !Tipo 1: EE e RNV / Tipo 2: BOOSTER e RNV /Tipo 3: EE e HORA /Tipo 4: BOOSTER e HORA

0

;IDCONTROLE TIPO IDTANQUE LIGAR(nivel(m)/hora) DESLIGAR(nivel(m)/hora)

Anexo N – Arquivo de Saída da Otimização na Tarifa Convencional A (Formatado em Excel)

PRESSAO (MCA) - RESULTADOS DO MOC																								
Nó	Hora 01	Hora 02	Hora 03	Hora 04	Hora 05	Hora 06	Hora 07	Hora 08	Hora 09	Hora 10	Hora 11	Hora 12	Hora 13	Hora 14	Hora 15	Hora 16	Hora 17	Hora 18	Hora 19	Hora 20	Hora 21	Hora 22	Hora 23	Hora 24
1	35,88	34,88	34,33	34,03	33,89	36,10	35,84	35,61	35,36	35,14	34,93	36,78	38,02	38,77	39,31	39,71	40,01	38,05	36,31	34,79	33,42	32,60	32,12	31,57
2	50,73	49,74	49,30	49,03	48,89	57,67	50,83	50,60	50,35	50,13	49,92	58,00	58,83	59,38	59,79	60,10	60,33	52,65	50,99	49,53	48,20	47,54	47,10	46,51
3	38,72	37,74	37,30	37,03	36,89	42,37	38,83	38,60	38,35	38,13	37,92	42,72	43,61	44,20	44,64	44,97	45,22	40,65	38,99	37,53	36,20	35,54	35,10	34,51
4	41,87	40,87	40,32	40,03	39,89	42,14	41,84	41,61	41,36	41,14	40,93	42,81	44,03	44,77	45,31	45,71	46,01	44,02	42,28	40,77	39,40	38,60	38,12	37,56
5	42,63	41,65	41,32	41,04	40,91	43,15	42,85	42,62	42,36	42,14	41,94	43,75	44,70	45,18	45,59	45,89	46,12	44,26	42,70	41,32	40,04	39,56	39,11	38,50
6	11,50	10,54	10,31	10,07	9,97	13,81	11,89	11,68	11,43	11,22	11,02	13,88	14,23	14,50	14,77	14,97	15,13	12,73	11,31	10,05	8,82	8,53	8,12	7,49
7	12,50	11,54	11,30	11,04	10,91	13,45	12,84	12,62	12,36	12,14	11,94	13,82	14,74	15,15	15,49	15,73	15,92	13,75	12,32	11,05	9,82	9,51	9,10	8,46
8	14,48	13,52	13,47	13,34	13,31	15,55	15,17	15,01	14,79	14,61	14,44	15,81	16,48	16,51	16,64	16,74	16,82	15,25	14,03	12,90	11,76	11,64	11,34	10,52
9	14,49	13,53	14,16	14,61	15,03	17,08	16,71	16,89	16,93	16,98	16,99	16,93	16,52	16,00	15,67	15,43	15,25	14,52	13,75	12,82	11,73	12,20	12,55	11,16
10	12,59	11,63	12,91	13,63	14,23	15,49	15,86	16,21	16,39	16,55	16,64	15,11	14,50	13,95	13,54	13,22	13,00	12,50	11,77	10,87	9,81	10,98	11,62	9,68
11	11,57	10,61	12,27	12,88	13,42	14,74	15,04	15,34	15,49	15,62	15,70	14,00	13,46	12,94	12,54	12,23	12,01	11,50	10,76	9,86	8,78	10,33	10,86	8,61
12	42,66	41,70	42,71	43,46	44,10	45,40	45,73	46,14	46,37	46,56	46,69	45,42	44,53	43,94	43,52	43,20	42,97	42,48	41,75	40,87	39,85	40,76	41,45	39,90
13	41,91	40,93	42,15	43,05	43,79	44,72	45,42	45,95	46,31	46,59	46,78	44,92	43,69	42,99	42,54	42,21	41,97	41,54	40,88	40,07	39,10	40,26	41,11	39,48
14	38,78	37,81	41,90	42,67	43,32	44,31	44,84	45,27	45,53	45,74	45,89	41,63	40,57	39,94	39,51	39,19	38,95	38,49	37,80	36,96	35,96	40,04	40,77	36,22
15	50,78	49,81	57,23	57,95	58,56	59,48	59,98	60,38	60,62	60,82	60,96	53,63	52,57	51,94	51,51	51,19	50,95	50,49	49,80	48,96	47,96	55,49	56,17	48,22
16	35,93	34,94	36,13	37,04	37,79	38,71	39,42	39,95	40,31	40,58	40,78	38,95	37,70	36,99	36,54	36,21	35,97	35,54	34,89	34,08	33,11	34,25	35,10	33,50
VAZÃO (L/s) - RESULTADOS DO MOC																								
Trecho	Hora 01	Hora 02	Hora 03	Hora 04	Hora 05	Hora 06	Hora 07	Hora 08	Hora 09	Hora 10	Hora 11	Hora 12	Hora 13	Hora 14	Hora 15	Hora 16	Hora 17	Hora 18	Hora 19	Hora 20	Hora 21	Hora 22	Hora 23	Hora 24
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	124,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	124,25	123,04	122,25	121,64	121,20	120,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	-16,65	-15,61	-6,37	-3,64	-2,31	92,02	-3,65	-3,46	-3,91	-3,71	-3,65	87,00	81,55	78,80	77,21	75,89	74,93	-28,11	-25,06	-22,16	-20,38	-10,47	-5,93	-9,98
3	9,04	8,47	1,03	-0,71	-1,81	-1,77	-0,78	-1,12	-0,95	-1,20	-1,33	3,88	10,77	14,89	16,61	17,84	18,67	17,04	14,81	12,72	11,27	3,19	0,74	4,18
4	0,05	0,16	1,84	3,04	4,13	23,56	3,52	4,15	4,38	4,76	5,00	20,62	13,49	11,23	9,88	8,93	8,26	-2,20	-1,07	-0,30	-0,17	2,05	2,49	2,53
5	1,25	1,15	-4,12	-5,57	-6,58	-3,07	-5,96	-6,53	-6,81	-7,20	-7,47	-0,19	4,97	8,51	9,99	10,92	11,55	7,44	5,53	3,84	2,28	-3,48	-5,00	-2,19
6	-3,06	-3,03	-9,37	-11,09	-12,13	-6,72	-11,83	-12,76	-13,53	-14,05	-14,47	-4,42	0,59	2,10	3,58	4,51	5,09	1,31	-0,63	-1,93	-2,61	-9,49	-11,36	-7,65
7	2,43	2,31	-11,33	-9,29	-7,94	-9,20	-7,73	-6,42	-5,27	-4,56	-3,99	6,07	3,49	1,08	0,07	-1,37	-1,99	0,32	0,66	1,48	2,45	-11,14	-9,08	4,53
8	-9,32	-8,93	-12,62	-14,83	-16,21	-10,68	-16,20	-17,76	-19,27	-20,12	-20,85	-13,75	-7,39	-3,84	-2,15	-1,27	-0,57	-4,13	-6,36	-7,92	-9,16	-13,58	-15,86	-14,71
9	16,25	15,49	-84,40	-82,22	-80,60	-81,54	-78,74	-76,89	-75,07	-74,04	-73,17	25,04	15,57	9,48	6,45	5,73	4,91	8,32	12,12	14,28	16,33	-84,85	-82,83	23,29
10	0,00	0,00	125,34	124,31	123,44	122,10	121,37	120,79	120,43	120,13	119,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	127,79	126,84	0,00
11	8,74	8,13	-0,87	-3,60	-4,93	25,45	-4,04	-4,68	-4,92	-5,33	-5,62	27,74	31,99	34,18	35,39	36,26	36,87	19,07	16,02	13,35	11,56	1,88	-2,44	1,84
12	0,78	0,49	-9,95	-13,88	-16,30	-5,36	-15,24	-16,97	-18,12	-19,13	-19,90	-2,38	9,00	13,68	16,47	18,28	19,56	12,23	8,05	4,82	2,91	-8,77	-13,30	-8,83
13	-4,07	-3,97	-7,81	-10,03	-11,41	-5,88	-11,10	-12,36	-13,41	-14,12	-14,70	-7,45	-1,09	2,31	3,84	4,73	5,43	1,87	-0,36	-2,07	-3,30	-7,88	-10,31	-9,32
14	52,23	48,98	19,26	10,18	4,42	-103,35	10,01	8,89	10,64	9,63	9,26	-77,60	-44,98	-29,67	-22,56	-17,05	-13,24	90,98	80,56	70,69	64,35	30,87	18,98	31,24
15	18,70	17,47	4,65	0,03	-3,31	-16,93	-0,53	-1,57	-1,13	-1,92	-2,31	-4,08	16,25	24,93	28,97	31,93	33,96	36,90	31,76	27,08	23,96	8,66	3,97	8,98
16	-1,33	-1,32	-6,61	-8,59	-9,83	-7,53	-9,33	-10,27	-10,93	-11,48	-11,89	-5,87	2,17	5,59	7,34	8,43	9,17	5,76	3,64	1,94	0,52	-6,26	-8,44	-5,67
17	-17,32	-16,58	-14,25	-19,99	-23,62	-14,65	-23,62	-27,40	-30,90	-32,96	-34,68	-28,96	-13,32	-5,68	-1,14	2,31	4,26	-5,24	-9,63	-13,17	-16,24	-16,02	-21,83	-28,64
18	50,74	48,42	-50,23	-40,11	-33,48	-48,91	-31,20	-23,56	-16,05	-11,89	-8,36	77,16	45,73	28,24	18,77	13,72	10,25	26,71	37,11	44,15	50,48	-46,60	-36,73	74,70
19	3,79	3,51	-3,77	-5,51	-6,61	-6,57	-5,88	-6,52	-6,80	-7,20	-7,48	-2,43	4,47	8,74	10,61	11,84	12,67	11,05	8,81	6,86	5,42	-2,52	-4,81	-1,21
20	-2,87	-2,83	-15,13	-18,32	-20,42	-16,88	-19,52	-21,19	-22,44	-23,44	-24,23	-12,11	-0,06	7,98	11,56	13,72	15,17	9,44	5,30	1,88	-1,13	-14,59	-18,18	-11,54
21	-8,34	-8,00	-33,70	-34,84	-35,60	-33,32	-34,94	-35,75	-36,53	-37,05	-37,49	-15,55	-6,08	-0,21	2,59	3,31	4,14	0,72	-3,08	-5,46	-7,50	-34,33	-35,64	-15,16

Anexo O – Arquivo de Saída da Otimização na Tarifa Horo-Sazonal Verde (Formatado em Excel)

PRESSÃO (MCA) - RESULTADOS DO MOC																								
Nó	Hora 01	Hora 02	Hora 03	Hora 04	Hora 05	Hora 06	Hora 07	Hora 08	Hora 09	Hora 10	Hora 11	Hora 12	Hora 13	Hora 14	Hora 15	Hora 16	Hora 17	Hora 18	Hora 19	Hora 20	Hora 21	Hora 22	Hora 23	Hora 24
1	35,88	34,88	33,92	32,96	32,00	33,18	34,03	34,66	35,41	36,31	36,95	37,71	38,28	39,02	39,94	40,61	41,07	39,28	37,68	36,27	34,98	33,77	33,04	32,61
2	50,73	49,74	48,79	47,83	46,87	54,62	55,25	55,72	56,46	57,31	57,73	58,50	58,88	59,66	60,54	60,99	61,34	53,93	52,40	51,04	49,77	48,59	47,99	47,60
3	38,72	37,74	36,79	35,83	34,87	39,11	39,78	40,28	41,08	41,98	42,44	43,26	43,66	44,50	45,45	45,93	46,30	41,93	40,39	39,04	37,77	36,59	35,99	35,60
4	41,87	40,87	39,91	38,95	37,99	39,19	40,03	40,66	41,42	42,32	42,96	43,72	44,28	45,03	45,95	46,61	47,08	45,25	43,65	42,25	40,96	39,76	39,04	38,61
5	42,63	41,65	40,71	39,75	38,79	39,77	40,43	40,92	42,04	43,06	43,27	44,41	44,56	45,71	46,74	47,00	47,33	45,62	44,16	42,87	41,63	40,47	40,01	39,61
6	11,50	10,54	9,60	8,64	7,69	9,33	9,80	10,14	11,31	12,43	12,54	13,70	13,78	14,99	16,14	16,27	16,47	14,20	12,85	11,64	10,44	9,31	8,99	8,63
7	12,50	11,54	10,60	9,64	8,69	9,85	10,43	10,84	11,96	13,03	13,21	14,34	14,47	15,64	16,72	16,95	17,22	15,20	13,85	12,64	11,44	10,31	9,97	9,60
8	14,48	13,52	12,59	11,63	10,67	11,25	11,59	11,83	13,72	14,95	14,43	16,22	15,68	17,51	18,68	18,27	18,35	16,86	15,67	14,56	13,40	12,27	12,11	11,87
9	14,49	13,53	12,60	11,64	10,68	10,73	10,56	10,44	12,59	14,25	13,64	15,47	14,86	16,73	18,26	17,66	17,32	16,48	15,56	14,52	13,39	12,28	12,76	13,13
10	12,59	11,63	10,70	9,74	8,78	8,60	8,35	8,18	10,58	12,25	11,54	13,48	12,76	14,74	16,29	15,58	15,18	14,49	13,60	12,59	11,48	10,38	11,56	12,21
11	11,57	10,61	9,67	8,72	7,76	7,60	7,36	7,20	10,68	12,05	11,54	13,28	11,76	14,55	15,91	14,58	14,18	13,49	12,59	11,57	10,45	9,36	10,90	11,44
12	42,66	41,70	40,75	39,80	38,84	38,60	38,33	38,14	40,30	42,12	41,53	43,35	42,75	44,60	46,20	45,57	45,16	44,48	43,60	42,62	41,54	40,45	41,35	42,04
13	41,91	40,93	39,98	39,02	38,06	37,60	37,33	37,14	39,31	41,15	40,56	42,39	41,78	43,63	45,25	44,61	44,18	43,58	42,78	41,85	40,81	39,73	40,86	41,70
14	38,78	37,81	36,86	35,90	34,95	34,58	34,32	34,13	39,52	41,11	37,52	42,26	38,75	43,45	44,92	41,57	41,15	40,51	39,68	38,72	37,66	36,58	40,61	41,33
15	50,78	49,81	48,86	47,90	46,95	46,58	46,32	46,13	55,01	56,49	49,52	57,57	50,75	58,68	60,05	53,57	53,15	52,51	51,68	50,72	49,66	48,58	56,03	56,70
16	35,93	34,94	33,99	33,03	32,07	31,60	31,33	31,14	33,26	35,12	34,56	36,36	35,78	37,60	39,23	38,61	38,18	37,59	36,79	35,87	34,82	33,75	34,85	35,69
VAZÃO (L/s) - RESULTADOS DO MOC																								
Trecho	Hora 01	Hora 02	Hora 03	Hora 04	Hora 05	Hora 06	Hora 07	Hora 08	Hora 09	Hora 10	Hora 11	Hora 12	Hora 13	Hora 14	Hora 15	Hora 16	Hora 17	Hora 18	Hora 19	Hora 20	Hora 21	Hora 22	Hora 23	Hora 24
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	129,00	128,13	127,47	126,43	125,23	124,63	123,52	122,98	121,84	120,54	119,88	119,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	-16,65	-15,61	-15,05	-15,03	-15,03	87,02	84,30	82,16	82,88	82,97	79,77	80,78	78,01	79,68	80,04	76,91	75,22	-25,87	-23,23	-20,82	-19,60	-18,48	-9,39	-5,23
3	9,04	8,47	8,16	8,15	8,14	12,38	15,05	16,88	11,69	9,37	16,13	10,57	16,56	10,58	8,36	15,15	16,86	15,41	13,43	11,60	10,74	10,08	2,58	0,33
4	0,05	0,16	0,16	0,16	0,17	13,32	11,41	10,13	11,07	12,10	10,75	11,40	10,31	11,15	12,22	10,63	9,37	-1,35	-0,44	-0,17	-0,18	-0,13	2,12	2,63
5	1,25	1,15	1,07	1,06	1,06	8,23	9,97	11,03	5,02	2,71	9,54	3,31	9,66	3,50	1,90	8,81	10,11	6,05	4,32	2,64	1,85	1,56	-3,71	-5,21
6	-3,06	-3,03	-2,95	-2,96	-2,96	3,41	4,57	5,18	0,51	-0,46	3,02	-0,53	2,94	-0,41	-1,22	2,48	3,69	-0,35	-1,72	-2,46	-2,87	-3,05	-9,69	-11,42
7	2,43	2,31	2,25	2,26	2,26	0,57	-1,29	-1,96	-2,01	-17,54	0,80	-17,53	0,81	-17,72	-15,34	0,91	-0,21	0,43	1,30	2,25	2,60	2,56	-10,89	-8,96
8	-9,32	-8,93	-8,67	-8,68	-8,68	-1,27	-0,31	0,17	-0,38	-2,53	-2,88	-2,94	-3,08	-2,55	-3,64	-3,27	-2,05	-5,55	-7,73	-8,87	-9,66	-9,82	-13,70	-15,80
9	16,25	15,49	15,02	15,04	15,05	5,34	4,42	3,88	-91,82	-87,78	7,50	-86,40	7,78	-85,65	-83,04	8,26	6,37	11,23	14,07	15,84	17,13	17,29	-84,36	-82,43
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	128,46	126,39	0,00	124,86	0,00	123,26	121,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	127,04	126,09
11	8,74	8,13	7,82	7,80	7,79	34,74	36,14	37,17	34,71	33,21	35,58	33,24	35,47	32,89	31,45	33,92	35,10	16,83	14,19	12,00	10,78	9,89	1,02	-2,90
12	0,78	0,49	0,42	0,40	0,39	14,18	17,04	18,89	14,82	12,06	15,56	12,33	15,66	12,46	10,18	14,25	16,68	9,14	5,59	3,35	2,14	1,42	-9,46	-13,68
13	-4,07	-3,97	-3,87	-3,88	-3,89	3,53	4,79	5,57	5,48	3,47	3,27	3,36	3,22	3,60	2,36	2,73	3,95	0,44	-1,73	-3,02	-3,81	-4,12	-8,15	-10,40
14	52,23	48,98	47,21	47,15	47,13	-49,49	-37,07	-28,13	-41,28	-47,97	-26,77	-41,48	-23,16	-40,57	-48,18	-26,97	-19,53	83,35	74,25	65,89	61,70	58,04	27,83	16,81
15	18,70	17,47	16,82	16,79	16,78	17,85	24,44	28,97	21,04	16,52	27,57	19,17	28,76	19,20	14,39	25,71	29,76	33,14	28,64	24,73	22,62	20,97	7,52	2,92
16	-1,33	-1,32	-1,31	-1,33	-1,33	5,71	7,60	8,71	6,09	4,40	6,72	4,66	6,81	4,79	3,20	6,02	7,51	4,22	2,37	0,93	-0,40	-1,17	-6,56	-8,60
17	-17,32	-16,58	-16,11	-16,14	-16,15	-1,05	3,26	5,05	15,90	9,48	-3,35	9,06	-3,65	9,79	5,32	-4,41	-0,58	-8,54	-12,64	-15,48	-17,58	-18,18	-16,45	-21,86
18	50,74	48,42	46,98	47,04	47,07	14,87	9,14	6,79	-98,39	-85,59	22,97	-82,92	23,98	-83,52	-75,58	24,95	18,03	34,33	43,43	48,95	53,13	53,83	-45,78	-36,58
19	3,79	3,51	3,36	3,35	3,34	7,58	9,96	11,48	5,83	3,37	9,98	4,27	10,25	4,43	2,37	9,15	10,86	9,41	7,44	5,75	4,89	4,38	-2,97	-5,07
20	-2,87	-2,83	-2,80	-2,83	-2,84	8,57	12,24	14,36	2,03	-2,96	10,25	-1,92	10,41	-1,35	-4,78	8,91	11,93	6,42	2,71	-0,44	-2,09	-2,66	-15,05	-18,42
21	-8,35	-8,00	-7,79	-7,81	-7,81	1,90	3,26	4,26	-27,81	-29,55	1,77	-28,95	1,72	-28,34	-29,17	0,78	2,67	-2,19	-5,03	-7,01	-8,31	-8,70	-34,31	-35,52

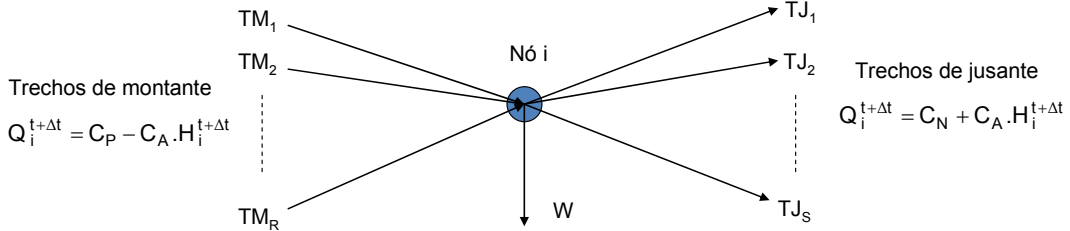
Anexo P – Arquivo de Saída da Otimização na Tarifa Horo-Sazonal Azul (Formatado em Excel)

PRESSÃO (MCA) - RESULTADOS DO MOC																								
Nó	Hora 01	Hora 02	Hora 03	Hora 04	Hora 05	Hora 06	Hora 07	Hora 08	Hora 09	Hora 10	Hora 11	Hora 12	Hora 13	Hora 14	Hora 15	Hora 16	Hora 17	Hora 18	Hora 19	Hora 20	Hora 21	Hora 22	Hora 23	Hora 24
1	35,88	37,38	38,89	39,95	41,09	42,31	43,16	43,72	42,00	42,50	43,13	43,89	44,41	42,75	41,28	39,93	38,66	37,43	36,21	35,03	33,86	32,72	31,61	30,53
2	50,72	58,46	59,81	60,58	61,67	62,78	63,35	63,75	56,68	62,63	63,27	63,98	64,32	57,44	56,03	54,71	53,46	52,23	51,01	49,85	48,67	47,54	46,44	45,38
3	38,72	43,22	44,66	45,49	46,65	47,84	48,45	48,88	44,68	47,67	48,37	49,13	49,48	45,44	44,03	42,71	41,45	40,23	39,01	37,84	36,67	35,54	34,44	33,38
4	41,87	43,40	44,92	45,96	47,10	48,33	49,16	49,72	47,97	48,50	49,13	49,89	50,41	48,72	47,26	45,91	44,64	43,41	42,19	41,02	39,84	38,70	37,60	36,52
5	42,62	44,36	45,88	46,55	47,99	49,26	49,69	50,09	48,40	48,82	49,80	50,64	50,78	49,19	47,85	46,57	45,32	44,10	42,89	41,73	40,56	39,43	38,34	37,28
6	11,50	14,03	15,54	16,02	17,45	18,77	19,05	19,28	17,01	17,99	19,03	19,96	19,97	17,85	16,59	15,36	14,14	12,93	11,73	10,58	9,41	8,29	7,20	6,15
7	12,50	14,40	15,92	16,61	18,00	19,27	19,71	20,02	18,02	18,72	19,72	20,60	20,69	18,85	17,59	16,36	15,14	13,93	12,73	11,58	10,41	9,29	8,20	7,15
8	14,48	16,40	17,92	18,07	19,97	21,26	21,12	21,24	19,72	19,95	21,58	22,55	22,04	20,63	19,49	18,31	17,10	15,90	14,70	13,55	12,38	11,27	10,18	9,13
9	14,49	16,50	18,04	17,61	19,50	21,07	20,59	20,31	19,41	19,12	20,84	22,18	21,49	20,49	19,44	18,29	17,11	15,91	14,72	13,56	12,40	11,28	10,20	9,14
10	12,59	14,52	16,06	15,52	17,50	19,09	18,50	18,15	17,43	17,01	18,85	20,22	19,44	18,52	17,51	16,38	15,22	14,04	12,85	11,70	10,53	9,42	8,33	7,27
11	11,57	14,08	15,61	14,52	17,20	18,67	17,50	17,16	16,43	16,01	18,60	19,75	18,44	17,51	16,49	15,35	14,19	13,01	11,82	10,67	9,51	8,39	7,30	6,24
12	42,66	44,47	46,02	45,51	47,37	49,01	48,49	48,14	47,42	47,00	48,73	50,14	49,43	48,52	47,54	46,44	45,29	44,12	42,93	41,78	40,62	39,50	38,40	37,34
13	41,91	43,51	45,06	44,52	46,38	48,04	47,51	47,15	46,53	46,02	47,76	49,21	48,49	47,70	46,77	45,72	44,59	43,44	42,26	41,10	39,94	38,80	37,69	36,62
14	38,78	43,31	44,78	41,50	46,11	47,62	44,48	44,13	43,46	42,99	47,34	48,62	45,43	44,59	43,64	42,56	41,43	40,26	39,08	37,93	36,77	35,64	34,54	33,47
15	50,78	58,55	59,92	53,50	61,16	62,58	56,48	56,13	55,46	54,99	62,32	63,51	57,43	56,59	55,64	54,56	53,43	52,26	51,08	49,93	48,77	47,64	46,54	45,47
16	35,92	37,49	39,04	38,52	40,35	42,01	41,51	41,15	40,54	40,03	41,73	43,19	42,49	41,71	40,78	39,73	38,61	37,45	36,27	35,12	33,95	32,82	31,71	30,63
VAZÃO (L/s) - RESULTADOS DO MOC																								
Trecho	Hora 01	Hora 02	Hora 03	Hora 04	Hora 05	Hora 06	Hora 07	Hora 08	Hora 09	Hora 10	Hora 11	Hora 12	Hora 13	Hora 14	Hora 15	Hora 16	Hora 17	Hora 18	Hora 19	Hora 20	Hora 21	Hora 22	Hora 23	Hora 24
1	0,00	123,58	121,61	120,48	118,87	117,19	116,31	115,70	0,00	117,42	116,43	115,34	114,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	-16,64	85,50	84,33	80,63	80,96	80,29	76,46	74,03	-24,77	74,26	75,45	75,46	72,39	-24,23	-21,67	-20,25	-19,53	-19,18	-18,99	-18,40	-18,37	-17,86	-17,37	-16,88
3	9,04	3,28	3,11	12,09	5,92	4,53	13,10	15,42	14,68	16,12	10,94	9,24	15,50	14,09	12,18	11,13	10,67	10,44	10,31	9,99	9,97	9,69	9,42	9,15
4	0,05	15,40	15,36	12,19	12,76	13,45	11,01	9,46	-1,16	9,61	10,38	11,29	9,85	-0,55	-0,16	-0,27	-0,17	-0,02	0,09	0,19	0,23	0,22	0,22	0,21
5	1,25	0,29	-0,01	7,76	1,38	0,85	8,10	9,55	5,60	9,48	3,73	2,13	8,58	4,72	3,05	2,04	1,69	1,50	1,41	1,34	1,32	1,27	1,22	1,18
6	-3,07	-1,25	-1,21	2,91	-0,08	-0,59	2,80	3,80	-0,55	3,07	-0,51	-1,73	1,90	-1,56	-2,42	-2,83	-3,15	-3,38	-3,53	-3,57	-3,61	-3,52	-3,44	-3,35
7	2,43	-14,48	-14,22	0,83	-16,37	-14,77	0,73	-0,62	0,55	0,52	-16,97	-14,08	0,98	1,17	2,07	2,57	2,67	2,75	2,78	2,72	2,72	2,67	2,60	2,54
8	-9,32	-3,50	-3,39	-1,77	-1,31	-2,50	-2,12	-1,42	-5,83	-2,65	-2,85	-4,48	-4,11	-7,60	-8,86	-9,77	-10,26	-10,53	-10,68	-10,54	-10,57	-10,32	-10,06	-9,79
9	16,26	-85,11	-83,82	5,83	-84,03	-81,58	6,22	5,48	11,49	7,01	-81,61	-78,56	9,73	13,98	15,82	17,38	18,09	18,44	18,62	18,27	18,31	17,87	17,41	16,95
10	0,00	123,45	121,46	0,00	119,62	117,50	0,00	0,00	0,00	0,00	117,89	116,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	8,74	30,59	30,05	32,61	30,66	29,65	32,16	33,53	15,96	34,12	31,72	30,38	32,94	14,97	12,64	11,22	10,50	10,15	9,96	9,58	9,55	9,27	9,01	8,75
12	0,77	7,70	7,44	13,18	10,66	8,96	13,46	15,93	8,29	15,47	12,07	9,59	13,59	6,25	3,76	2,44	1,63	1,12	0,83	0,56	0,50	0,45	0,42	0,40
13	-4,08	1,47	1,42	3,03	3,49	2,31	2,97	3,98	0,02	3,35	3,30	1,82	2,19	-1,46	-2,87	-3,77	-4,27	-4,54	-4,69	-4,69	-4,72	-4,62	-4,51	-4,39
14	52,22	-73,46	-73,74	-43,15	-58,44	-61,86	-34,66	-23,83	79,72	-20,86	-35,10	-40,25	-20,31	77,56	68,74	63,81	61,38	60,20	59,57	57,72	57,58	55,99	54,45	52,93
15	18,69	1,17	0,14	18,09	9,29	6,58	20,98	26,61	31,54	28,21	20,09	16,42	27,05	30,06	25,93	23,46	22,22	21,61	21,29	20,57	20,50	19,92	19,36	18,82
16	-1,33	-1,53	-1,72	5,30	3,44	1,96	5,60	7,16	3,79	6,81	4,69	2,98	5,72	2,73	1,21	-0,36	-1,16	-1,42	-1,54	-1,56	-1,59	-1,57	-1,55	-1,51
17	-17,32	1,76	1,68	-2,22	10,13	6,53	-2,52	0,78	-9,02	-2,63	8,85	2,72	-5,96	-12,29	-15,27	-17,75	-18,97	-19,54	-19,84	-19,55	-19,62	-19,16	-18,69	-18,20
18	50,75	-75,79	-74,78	17,04	-85,50	-78,28	18,53	14,24	35,12	21,30	-78,23	-67,21	29,27	43,09	48,94	53,87	56,29	57,48	58,11	57,11	57,25	55,87	54,45	53,01
19	3,79	-1,68	-1,69	7,29	1,12	-0,27	8,00	10,02	8,83	10,12	4,79	2,94	9,20	7,94	6,19	5,14	4,67	4,44	4,32	4,14	4,11	3,99	3,87	3,75
20	-2,87	-8,88	-8,93	7,82	-4,74	-6,66	8,42	11,42	5,61	10,56	-0,76	-4,44	8,28	3,39	0,19	-1,87	-2,69	-3,10	-3,32	-3,35	-3,39	-3,35	-3,28	-3,21
21	-8,35	-30,85	-30,40	1,41	-28,35	-28,67	1,46	2,66	-2,66	2,04	-27,00	-28,01	-0,24	-4,71	-6,78	-8,34	-9,05	-9,40	-9,58	-9,45	-9,49	-9,27	-9,05	-8,81

Anexo Q – Formulações do MOC para Elementos Nós e Trechos

Ponto de demanda ou consumo:

Para um nó “i” em que ocorre a partida e a chegada de vários trechos, tem-se:



A soma das vazões dos trechos de montante é definida por:

$$(QM)_i^{t+\Delta t} = \sum_{r=1}^R C_P(m_r) - \sum_{r=1}^R C_A(m_r) \cdot H_i^{t+\Delta t} \quad (I)$$

A soma das vazões dos trechos de jusante é definida por:

$$(QJ)_i^{t+\Delta t} = \sum_{s=1}^S C_N(j_s) + \sum_{s=1}^S C_A(j_s) \cdot H_i^{t+\Delta t} \quad (II)$$

Considerando o balanço de vazões para o nó “i” onde atua um consumo W:

$$W_i^{t+\Delta t} = (QM)_i^{t+\Delta t} - (QJ)_i^{t+\Delta t} \quad (III)$$

Substituindo os valores de $(QM)_i^{t+\Delta t}$ e $(QJ)_i^{t+\Delta t}$ das Eq. (I) e (II) em (III) e rearranjando os termos para isolar a variável desconhecida tem-se como resultado:

$$H_i^{t+\Delta t} = (W_i^{t+\Delta t} - B_i) / A_i \quad (IV)$$

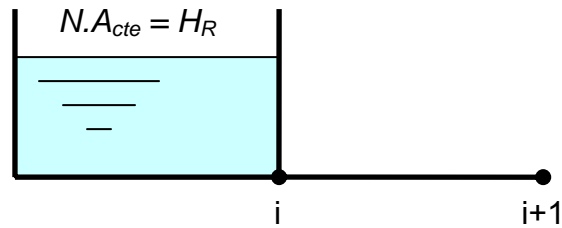
Em que:

$$A_i = -\left[\sum_{r=1}^R C_A(m_r) + \sum_{s=1}^S C_A(j_s) \right] \quad (V)$$

$$B_i = \left[\sum_{r=1}^R C_P(m_r) - \sum_{s=1}^S C_N(j_s) \right] \quad (VI)$$

Reservatório de Nível Constante:

Para um reservatório onde o nível da água é constante ao longo do tempo, utilizam-se a condição de contorno da Eq (VII) e a equação associada à linha característica C-, Eq. (VIII):



$$H_i^{t+\Delta t} = H_R \quad (\text{VII})$$

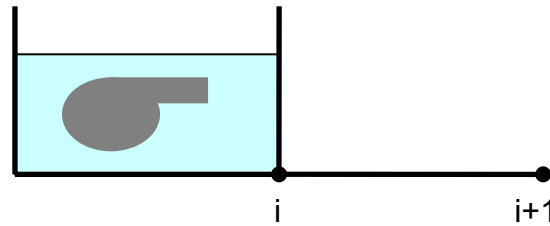
$$Q_i^{t+\Delta t} = C_N + C_A \cdot H_i^{t+\Delta t} \quad (\text{VIII})$$

O sistema é resolvido substituindo o valor de $H_i^{t+\Delta t}$ da Eq. (VII) em (VIII), resultando em:

$$Q_i^{t+\Delta t} = C_N + C_A \cdot H_R \quad (\text{IX})$$

Estação Elevatória:

Para uma estação elevatória em que a curva característica, que expressa a relação entre a vazão bombeada e a altura manométrica fornecida, pode ser aproximada por meio de uma função parabólica (2º grau), utilizam-se a condição de contorno da Eq. (X), a curva característica da bomba, e a equação associada à linha característica C-, Eq. (XI):



$$H_i^{t+\Delta t} = Z + A_{EE} + B_{EE} \cdot (Q_i^{t+\Delta t}) + C_{EE} \cdot (Q_i^{t+\Delta t})^2 \quad (\text{X})$$

$$Q_i^{t+\Delta t} = C_N + C_A \cdot H_i^{t+\Delta t} \quad (\text{XI})$$

O sistema é resolvido substituindo o valor de $H_i^{t+\Delta t}$ da Eq. (X) em (XI) e rearranjando os termos para isolar a variável desconhecida (no passo de tempo “t+Δt”), aplicando a fórmula que soluciona a equação de 2º grau, resultando em:

$$Q_i^{t+\Delta t} = \frac{-(aux2) - \sqrt{(aux2)^2 - 4 \cdot (aux1) \cdot (aux3)}}{2 \cdot (aux1)} \quad (\text{XII})$$

Em que:

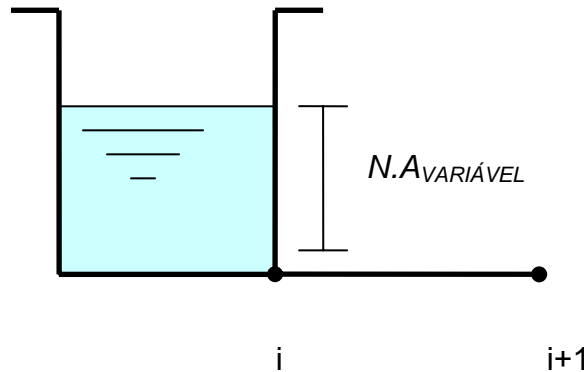
$$aux1 = C_{EE} \quad (\text{XIII})$$

$$aux2 = B_{EE} - 1 / C_A \quad (\text{XIV})$$

$$aux3 = A_{EE} + Z + C_N / C_A \quad (\text{XV})$$

Reservatório de Nível Variável:

Para um reservatório onde o nível da água é variável ao longo do tempo, utilizam-se a condição de contorno da Eq (XVI), que expressa a variação de nível do RNV a partir de uma média entre as vazões em dois passos de tempo consecutivos, e a equação associada à linha característica C-, Eq. (XVII):



$$H_i^{t+\Delta t} = H_i^t - 0,5 \cdot [Q_i^{t+\Delta t} + Q_i^t] \cdot \Delta t / A_{RV} \quad (\text{XVI})$$

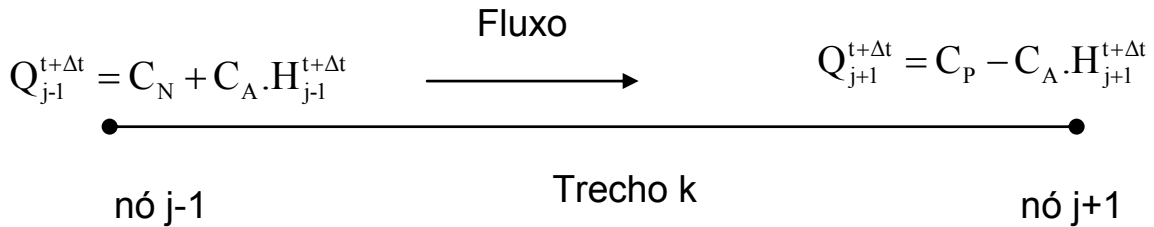
$$Q_i^{t+\Delta t} = C_N + C_A \cdot H_i^{t+\Delta t} \quad (\text{XVII})$$

O sistema é resolvido substituindo o valor de $H_i^{t+\Delta t}$ da Eq. (XVI) em (XVII) e rearranjando os termos para isolar a variável desconhecida (no passo de tempo “t+Δt”), resultando em:

$$Q_i^{t+\Delta t} = \frac{\left(C_N + C_A \cdot H_i^t - \frac{0,5 \cdot C_A \cdot \Delta t \cdot Q_i^t}{A_{RV}} \right)}{\left(1 + \frac{0,5 \cdot C_A \cdot \Delta t}{A_{RV}} \right)} \quad (\text{XVIII})$$

Tubulações:

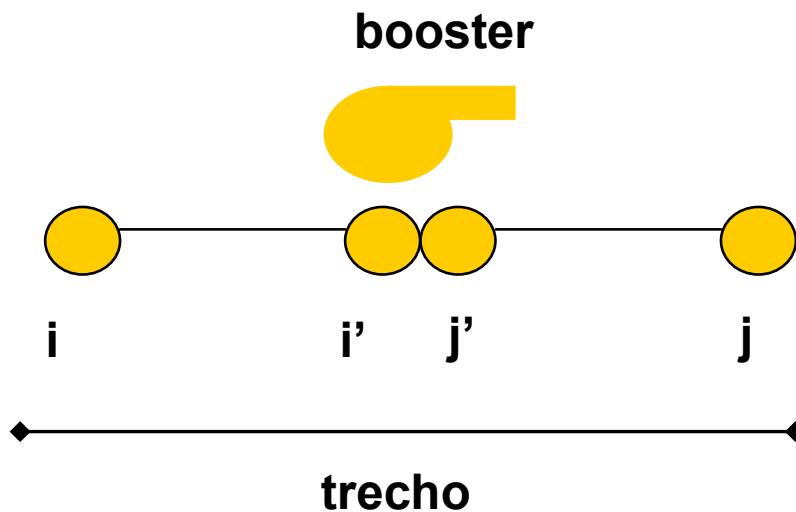
Para determinação da vazão de um determinado trecho “k”, representado por uma tubulação do sistema, em um instante “t+Δt”, utilizam-se os valores das vazões dos nós de montante e jusante que compõem o trecho, tomando-se o valor médio:



$$Q_{TB_k}^{t+\Delta t} = \frac{C_N + C_P + C_A \cdot (H_{j-1}^{t+\Delta t} - H_{j+1}^{t+\Delta t})}{2} \quad (XIX)$$

Booster:

Para determinação da vazão de um determinado trecho “k”, representado por um booster, calcula-se primeiramente o incremento da pressão fornecida ao sistema pela bomba, Eq. (XXII), tomando-se a diferença entre a carga hidráulica de um nó i’ imediatamente a montante do booster, obtido pela aplicação da linha característica C+, Eq. (XX), e a carga hidráulica de um nó j’ imediatamente a jusante do booster, obtido pela aplicação da linha característica C-, Eq. (XXI). Deve-se considerar ainda a curva característica do booster, Eq. (XXIII).



$$H_i^{t+\Delta t} = (C_p - Q_i^{t+\Delta t}) / C_A \quad (\text{XX})$$

$$H_j^{t+\Delta t} = (Q_j^{t+\Delta t} - C_N) / C_A \quad (\text{XXI})$$

$$HBO_k^{t+\Delta t} = H_j^{t+\Delta t} - H_i^{t+\Delta t} \quad (\text{XXII})$$

$$HBO_k^{t+\Delta t} = A_{BO} + B_{BO} \cdot (QBO_k^{t+\Delta t}) + C_{BO} \cdot (QBO_k^{t+\Delta t})^2 \quad (\text{XXIII})$$

O sistema é resolvido igualando-se as Eq. (XXII) em (XXIII) e rearranjando os termos para isolar a variável desconhecida (no passo de tempo “t+Δt”), aplicando a fórmula que soluciona a equação de 2º grau, resultando em:

$$QBO_k^{t+\Delta t} = \frac{-(aux5) - \sqrt{(aux5)^2 - 4 \cdot (aux4) \cdot (aux6)}}{2 \cdot (aux4)} \quad (\text{XXIV})$$