

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

HENRIQUE JORGE SOUZA DA MOTA

**DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA  
APLICANDO ALGORITMO GENÉTICO**

FORTALEZA  
2007

**HENRIQUE JORGE SOUZA DA MOTA**

**DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA  
APLICANDO ALGORITMO GENÉTICO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À COORDENAÇÃO DO CURSO  
DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL, DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO CEARÁ COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:  
RECURSOS HÍDRICOS

ORIENTADOR:  
PROF. DR. JOHN KENEDY DE ARAÚJO.

FORTALEZA

2007

*ESTA DISSERTAÇÃO FOI SUBMETIDA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL COM ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS, OUTORGADA PELA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, ENCONTRANDO-SE À DISPOSIÇÃO DOS INTERESSADOS NA BIBLIOTECA CENTRAL DA REFERIDA UNIVERSIDADE.*

---

*Henrique Jorge Souza da Mota*

*DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 26/09/2007*

---

*Orientador - Prof. Dr. John Kenedy Araújo*

---

*Membro- Prof. PhD. Marco Aurélio Holanda de Castro*

---

*Examinador Externo (CAGECE) Dr. Manoel do Vale Sales*

M871d Mota, Henrique Jorge Souza da

Dimensionamento econômico de rede de distribuição de água aplicando algoritmo genético / Henrique Jorge Souza da Mota. 267 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, 2007.

Área de concentração: Recursos hídricos.

Orientador: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo.

1. Recursos hídricos. 2. Abastecimento de água. I. Araújo, John Kenedy (orientador). II. Universidade Federal do Ceará. III. Título.

CDD 627

*A Deus pelos dons recebidos  
Aos meus pais Barbosa e Amélia,  
por serem o exemplo e o incentivo  
A esposa Ana e filhos Tim, Lael e Mateus,  
por serem a inspiração e o motivo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Doutor John Kenedy de Araújo, orientador e amigo pela paciência, competência, e apoio incondicional.

À CAPES – Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão de bolsa de estudos.

À Universidade Federal do Ceará pela oportunidade concedida.

Ao coordenador do curso Professor Doutor Marco Aurélio Holanda de Castro pela complacência.

À VBA Consultores Ltda. pelo ensinamento da seriedade e retidão nos trabalhos.

Ao professor e amigo Luis Hernani de Carvalho pelo exemplo profissional e humano.

Ao professor e amigo Francisco das Chagas Neto pelo apoio e incentivo.

Ao companheiro engenheiro Paulo Robson Gomes Barbosa pelos sábios conselhos profissionais e de vida.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

MOTA, H.J.S. (2007). *Dimensionamento econômico de sistemas de abastecimento de água aplicando algoritmo genético*. Fortaleza, 2007. 267p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Desenvolveu-se um modelo computacional para o dimensionamento econômico de redes de distribuição de água, sendo concebido em dois módulos: de simulação hidráulica EPANET2 e de otimização multiobjetivo através do Algoritmo Genético-AG. São realizadas simulações de análises de sensibilidade variando individualmente cada parâmetro para encontrar seus valores que fazem o desempenho do algoritmo melhorar em termos de convergência, qualidade final das soluções e esforço computacional. Realizada a calibração dos parâmetros são processadas simulações mais longas em busca da melhor solução para a primeira função objetivo com enfoque na eficiência das seções da tubulação. Seu resultado é comparado ao obtido para a mesma rede através da Programação Não Linear-PNL, apresentando uma rede mais eficiente hidraulicamente e conseqüentemente mais econômica do que esta última. Implementa-se uma segunda função objetivo, desta vez minimizando o custo total, de implantação mais o de bombeamento, e compara-se com o resultado obtido com a primeira função objetivo. Mostrando-se muito mais vantajoso a utilização da segunda função objetivo. Apesar de não se poder garantir que a melhor solução encontrada é a ótima global, a utilização do AG no dimensionamento econômico de sistemas de distribuição de água mostrou-se de plena viabilidade frente a técnicas convencionais de otimização, devendo a hibridização destas técnicas propiciar aumento na velocidade de convergência e refino de resultados.

**Palavras-chave:** *rede de distribuição de água; técnicas de otimização; algoritmo genético.*

## ABSTRACT

MOTA, H.J.S. (2007). *Least cost design of water distribution network using genetic algorithms*. Fortaleza, 2007. 267p. Dissertation (Master) – Federal University of Ceará, Fortaleza.

A computer model for least-cost design of water distribution network was developed in two modules: hydraulic simulation by EPANET-2 and multi-objective optimization through Genetic algorithm GA. Sensitivity analyses were done trying individually each parameter getting values that improve the algorithm performance in convergence, quality of solutions and computer effort. Using these parameters values, were done longer simulations to find the best solution to the first objective function that approaches the section pipes efficiency. Its result is compared to the nonlinear programming one, got for the same water network, presenting a more efficient network hydraulically and so cheaper than the last. It was implemented the second objective function, now approaching the total least-cost, of network construction plus pumping costs, comparing to the first objective function results. The second objective function utilization is much more advantageous. Although it is not assured the best solution found is the global optimum, the GA method for least-cost design of water network performs perfectly feasible face conventional optimization techniques, and the hybridization of such methods must provide convergence velocity and accurate results.

**Keywords:** *water distribution network; optimization techniques; genetic algorithm.*



## LISTA DE FIGURAS

1.1	Organograma da dissertação.....	4
3.1	Fluxograma do AG Padrão.....	24
3.2	Operador Recombinação de um ponto de corte.....	32
3.3	Operador Recombinação de dois pontos de corte.....	33
3.4	Operador Recombinação de quatro pontos de corte.....	33
3.5	Operador Recombinação Uniforme.....	34
3.6	Mutação para Representação Binária.....	37
4.1	Rede de distribuição d'água utilizada como exemplo.....	51
5.1	Cadeia Binária do Cromossomo (Tubulações da rede).....	64
5.2	Gráfico com equação da curva ajustada dos custos de implantação para diâmetros em PVC.....	68
5.3	Gráfico com equação da curva ajustada dos custos de implantação para diâmetros em FoFo.....	69
5.4	Formulário de entrada dos parâmetros do AG e do EPANET.....	74
5.5	Fluxograma do Modelo Simulador-Otimizador.....	75
6.2.1	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 1.....	79
6.2.2	Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 1.....	81
6.2.3	Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 1.....	83
6.2.4	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 2.....	84
6.2.5	Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 2.....	86
6.2.6	Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 2.....	87
6.2.7	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 3.....	89
6.2.8	Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 3.....	91

6.2.9	Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 3.....	92
6.2.10	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 4.....	94
6.2.11	Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 4.....	96
6.2.12	Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 4.....	97
6.2.13	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 5.....	99
6.2.14	Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 5.....	101
6.2.15	Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 5.....	102
6.2.16	Comparação do comportamento da função objetiva ao longo das gerações para os casos do grupo 1.....	104
6.2.17	Comportamento do tempo de processamento requerido nas simulações dos casos do grupo 1.....	105
6.2.18	Tamanhos dos arquivos resultados das simulações dos casos do grupo 1..	106
6.2.19	Valores da função objetivo da melhor solução da população final dos casos do grupo 1.....	106
6.2.20	Comportamento dos Desempenhos Relativos à melhor solução das simulações dos casos do grupo 1.....	107
6.2.21	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 6.....	110
6.2.22	Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 6.....	111
6.2.23	Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 6.....	112
6.2.24	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 7.....	114
6.2.25	Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 7.....	116

6.2.26	Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 7.....	117
6.2.27	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 8.....	119
6.2.28	Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 8.....	121
6.2.29	Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 8.....	122
6.2.30	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 9.....	124
6.2.31	Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 9.....	127
6.2.32	Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do caso 9.....	128
6.2.33	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 10.....	130
6.2.34	Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 10.....	135
6.2.35	Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 10.....	136
6.2.36	Comparação do comportamento da função objetiva ao longo das gerações para os casos do grupo 2.....	141
6.2.37	Comportamento do tempo de processamento requerido nas simulações dos casos do grupo 2.....	142
6.2.38	Tamanhos dos arquivos resultados das simulações dos casos do grupo 2..	143
6.2.39	Valores da função objetivo da melhor solução da população final dos casos do grupo 2.....	143
6.2.40	Comportamento dos Desempenhos Relativos à melhor solução das simulações dos casos do grupo 2.....	144
6.2.41	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 11.....	147
6.2.42	Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 11.....	148

6.2.43	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 11.....	148
6.2.44	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 12.....	150
6.2.45	Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 12.....	151
6.2.46	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 12.....	151
6.2.47	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 13.....	153
6.2.48	Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do caso 13.....	154
6.2.49	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do caso 13.....	154
6.2.50	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 14.....	157
6.2.51	Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 14.....	158
6.2.52	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 14.....	158
6.2.53	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 15.....	160
6.2.54	Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 15.....	161
6.2.55	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 15.....	161
6.2.56	Comparação do comportamento da função objetiva ao longo das gerações para os casos do grupo 3.....	164
6.2.57	Comparação do comportamento dos Coeficientes de Convergência ao longo das gerações para os casos do grupo 3.....	166
6.2.58	Comparação dos valores médios da função objetivo (FOmed) obtidas no final do processamento das gerações para os casos do grupo 3.....	168
6.2.59	Comparação dos valores médios da função objetivo FOmed(i) a cada geração do processamento para os casos de melhor desempenho do grupo 3.....	169

6.2.60	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 16.....	173
6.2.61	Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 16.....	174
6.2.62	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 16.....	174
6.2.63	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 17.....	176
6.2.64	Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 17.....	177
6.2.65	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 17.....	177
6.2.66	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 18.....	179
6.2.67	Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 18.....	180
6.2.68	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 18.....	181
6.2.69	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 19.....	183
6.2.70	Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 19.....	184
6.2.71	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 19.....	184
6.2.72	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 20.....	186
6.2.73	Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do caso 20.....	187
6.2.74	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 20.....	187
6.2.75	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 15X.....	189
6.2.76	Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 15X.....	190

6.2.77	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 15X.....	190
6.2.78	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 16X.....	192
6.2.79	Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 16X.....	193
6.2.80	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 16X.....	193
6.2.81	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 17X.....	195
6.2.82	Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 17X.....	196
6.2.83	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 17X.....	196
6.2.84	Comportamento dos valores mínimos da função objetiva encontrados para os casos do grupo 4.....	198
6.2.85	Desempenho da componente do esforço computacional tempo de processamento para os casos do grupo 4.....	199
6.2.86	Desempenho da componente do esforço computacional tamanho do arquivo ( memória requerida) para os casos do grupo 4.....	200
6.2.87	Comportamento dos Desempenhos Relativos à melhor solução das simulações dos casos do grupo 4.....	201
6.2.88	Comportamento da média dos valores médios da função objetivo dos casos do grupo 4.....	202
6.2.89	Comportamento dos valores médios da função objetivo ao longo das gerações para os dois casos de melhor desempenho do grupo 4.....	203
6.3.1	Comparação dos valores mínimos da função objetivo ao longo das gerações sem, e com Elitismo.....	206
6.3.2	Comparação dos valores mínimos da função objetivo ao longo das gerações sem, e com Elitismo.....	208
6.3.3	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 22.....	212
6.3.4	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso22.....	212

6.3.5	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 23.....	214
6.3.6	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do caso 23.....	214
6.3.7	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 24.....	216
6.3.8	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 24.....	216
6.3.9	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 25.....	218
6.3.10	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 25.....	218
6.3.11	Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 26.....	220
6.3.12	Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 26.....	220
6.3.13	Comportamento dos valores mínimos da função objetivo ao longo das gerações para os casos do grupo 6.....	222
6.3.14	Comportamento dos valores mínimos da função objetiva encontrados para os casos do grupo 6.....	223
6.3.15	Desempenho da componente do esforço computacional tempo de processamento para os casos do grupo 6.....	224
6.3.16	Desempenho da componente do esforço computacional tamanho do arquivo (memória requerida) para os casos do grupo 6.....	225
6.3.17	Comportamento dos Desempenhos Relativos à melhor solução das simulações dos casos do grupo 6.....	225
6.3.18	Comparação dos valores médios da função objetivo (FOmed) obtidas no final do processamento das gerações para os casos do grupo 7.....	230
6.3.19	Comparação dos valores mínimos da função objetivo (FOmin) obtidas ao longo das gerações para os tipos de recombinação.....	233
6.3.20	Comparação dos valores médios da função objetivo (FOmed) obtidas ao longo das gerações para os tipos de recombinação.....	233

## LISTA DE TABELAS

4.1	Resultados obtidos através da PNL.....	52
5.1	Valores Binários Atribuídos aos Genes (Tubos).....	63
5.2	Preços unitários de implantação das tubulações (fonte CAGEPA abril de 2004).....	68
6.1	Parâmetros hidráulicos adotados.....	77
6.2.1	Parâmetros adotados do AG para o grupo 1.....	78
6.2.2	Diâmetros da população de soluções da última geração do Caso 1.....	78
6.2.3	Valores (mínimo, médio e máximo) da função objetivo a cada geração do Caso 1.....	80
6.2.4	Relatório da solução que provocou ruído randômico na função objetivo do Caso 1.....	82
6.2.5	Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 1.....	83
6.2.6	Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 2.....	84
6.2.7	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 2.....	85
6.2.8	Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 2.....	86
6.2.9	Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 3.....	88
6.2.10	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 3.....	90
6.2.11	Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 3.....	91
6.2.12	Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 4.....	93
6.2.13	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 4.....	95
6.2.14	Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 4.....	96
6.2.15	Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 5.....	98
6.2.16	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 5.....	100



6.2.17	Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 5.....	101
6.2.18	Valores da função objetivo da melhor solução a cada geração nos casos do grupo 1.....	103
6.2.19	Valores dos parâmetros analisados nas simulações dos casos do grupo 1..	105
6.2.20	Valores dos parâmetros analisados relativos à melhor solução (caso 5) das simulações do grupo 1.....	107
6.2.21	Parâmetros adotados do AG para o grupo 2.....	109
6.2.22	Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 6.....	109
6.2.23	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 6.....	111
6.2.24	Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 6.....	112
6.2.25	Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 7.....	113
6.2.26	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 7.....	115
6.2.27	Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 7.....	116
6.2.28	Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 8.....	118
6.2.29	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 8.....	120
6.2.30	Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 8.....	121
6.2.31	Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 9. ....	123
6.2.32	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 9.....	125
6.2.33	Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 9.....	127
6.2.34	Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 10.....	129
6.2.35	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 10.....	131
6.2.36	Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 10.....	135

6.2.37	Valores da função objetivo da melhor solução a cada geração nos casos do grupo 2.....	137
6.2.38	Valores dos parâmetros analisados nas simulações dos casos do grupo 2..	142
6.2.39	Valores dos parâmetros analisados relativos à melhor solução (caso 5) das simulações do grupo 2.....	144
6.2.40	Parâmetros adotados do AG para o grupo 3.....	145
6.2.41	Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do Caso 11.....	146
6.2.42	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 11.....	147
6.2.43	Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do Caso 12.....	149
6.2.44	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 12.....	150
6.2.45	Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do Caso 13.....	152
6.2.46	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 13.....	153
6.2.47	Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do Caso 14.....	155
6.2.48	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração para a simulação do Caso 14E.....	156
6.2.49	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 14.....	157
6.2.50	Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do Caso 15.....	159
6.2.51	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 15.....	160
6.2.52	Valores da função objetivo da melhor solução a cada geração nos casos do Grupo 3.....	162
6.2.53	Valores dos Coeficientes de Convergência a cada geração nos casos do Grupo 3.....	165
6.2.54	Comparativo dos comportamentos da FOMin, FOMed e dos Valores dos	

	Coeficientes de Convergência a cada geração nos casos do Grupo 3.....	167
6.2.55	Parâmetros adotados do AG para o grupo 4.....	171
6.2.56	Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do Caso 16.....	172
6.2.57	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 16.....	173
6.2.58	Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do Caso 17.....	175
6.2.59	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 17.....	176
6.2.60	Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do Caso 18.....	178
6.2.61	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 18.....	179
6.2.62	Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do Caso 19.....	182
6.2.63	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 19.....	183
6.2.64	Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do Caso 20.....	185
6.2.65	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 20.....	186
6.2.66	Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do Caso 15X.....	188
6.2.67	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 15X.....	189
6.2.68	Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do Caso 16X.....	191
6.2.69	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 16X.....	192
6.2.70	Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do Caso 17X.....	194
6.2.71	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 17X.....	195

6.2.72	Valores da função objetivo da melhor solução a cada geração nos casos do Grupo 4.....	197
6.2.73	Análise dos parâmetros relativos à melhor solução encontrada dos casos do Grupo 4.....	199
6.2.74	Comportamento dos valores médios da função objetivo a cada geração dos casos do Grupo 4.....	202
6.3.1	Comparação das evoluções dos valores mínimos da função objetivo para as simulações sem e com elitismo.....	205
6.3.2	Comportamento dos valores médios da função objetivo a cada geração dos casos com e sem elitismo.....	207
6.3.3	Parâmetros adotados do AG para o grupo 6.....	210
6.3.4	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 22.....	211
6.3.5	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 23.....	213
6.3.6	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 24.....	215
6.3.7	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 25.....	217
6.3.8	Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 26.....	219
6.3.9	Análise dos parâmetros relativos à melhor solução encontrada ao longo das gerações dos casos do Grupo 6.....	221
6.3.10	Análise dos parâmetros relativos à melhor solução encontrada dos casos do Grupo 6.....	223
6.3.11	Parâmetros adotados do AG para o grupo 7.....	227
6.3.12	Análise dos parâmetros relativos à melhor solução encontrada dos casos do grupo 7.....	228
6.3.13	Comparativo dos comportamentos dos valores médios da função objetivo a cada geração nos casos do Grupo 7.....	230
6.3.14	Comparativo dos comportamentos dos valores mínimos e médios da função objetivo ao longo das gerações para os casos de melhor desempenho de cada tipo de Recombinação.....	232

6.4.1	Parâmetros adotados do AG para o Grupo 8.....	234
6.4.2	Resultados das simulações dos casos do grupo 8.....	235
6.4.3	Comparação dos resultados obtidos pelos da PNL e AG.....	237
6.4.4	Comparação dos custos de implantação das redes dimensionadas pelas metodologias analisadas.....	238
6.5.1	Parâmetros adotados do AG para o grupo 9.....	239
6.5.2	Resultados das simulações dos casos do grupo 9.....	240
6.5.3	Comparação dos resultados dos parâmetros hidráulicos obtidos nas simulações campeãs para as duas funções objetivo analisadas.....	241
6.5.4	Comparação dos resultados dos custos envolvidos obtidos nas simulações campeãs para as duas funções objetivo analisadas.....	242

## SUMÁRIO

RESUMO.....	iii
<i>ABSTRACT</i> .....	iv
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tabelas .....	xii
Sumário .....	xviii
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	4
<b>2 MÉTODOS CONVENCIONAIS DE OTIMIZAÇÃO.....</b>	<b>6</b>
2.1 OTIMIZAÇÃO POR PROGRAMAÇÃO LINEAR-PL.....	7
2.2 OTIMIZAÇÃO POR PROGRAMAÇÃO DINÂMICA-PD.....	11
2.3 OTIMIZAÇÃO POR PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR .....	13
<b>3 ALGORITMOS GENÉTICOS .....</b>	<b>18</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	18
3.2 TERMINOLOGIA .....	21
3.3 VISUALIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DOS AGs .....	22
3.4 O ALGORITMO DO AG .....	23
3.5 VANTAGENS DOS AGs .....	25
3.6 IMPLEMENTAÇÃO DE AGs .....	26
3.6.1 Sistema de Representação das Variáveis de Decisão .....	26
3.6.2 Modo de Geração da população Inicial .....	27
3.6.3 Avaliação de Aptidão .....	28
3.6.4 Métodos de Seleção .....	28
3.6.5 Operadores Genéticos .....	31
3.6.6 Configuração dos Parâmetros do AG .....	39
3.7 USO DE AGs EM OTIMIZAÇÃO DE REDES DE ÁGUA .....	43

<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>47</b>
4.1	REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EXEMPLO EM ESTUDO .....	47
4.2	ANALOGIA PNL & AG DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO DA REDE (ENFOQUE EFICIÊNCIA DA SEÇÃO) .....	53
4.3	IMPLEMENATAÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO (ENFOQUE CUSTO) .....	54
<b>5</b>	<b>MODELO COMPUTACIONAL .....</b>	<b>57</b>
5.1	GENERALIDADES.....	57
5.2	MÓDULO SIMULADOR EPANET .....	58
5.2.1	Configuração dos Parâmetros Hidráulicos no Módulo Simulador .....	60
5.3	MÓDULO OTIMIZADOR – AG .....	62
5.3.1	Representação das Variáveis de Decisão do AG .....	62
5.3.2	Modos de Geração da População de Soluções .....	64
5.3.3	Avaliação de Desempenho Através das Funções Objetivo .....	66
5.3.4	Métodos de Seleção das Soluções Promissoras .....	72
5.3.5	Operadores Genéticos empregados .....	72
5.3.6	Configuração dos Parâmetros do AG no Modulo Otimizador .....	74
5.4	FLUXOGRAMA DO MODELO SIMULADOR – OTIMIZADOR .....	75
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>76</b>
6.1	GENERALIDADES.....	76
6.2	ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DOS RESULTADOS AOS PARÂMETROS BÁSICOS DO AG .....	77
6.2.1	Grupo 1 – Parâmetro em Análise Tamanho da população de Soluções .....	77
6.2.2	Grupo 2 – Parâmetro em Análise Número de Gerações .....	109
6.2.3	Grupo 3 – Parâmetro em Análise Taxa de Recombinação .....	145
6.2.4	Grupo 4 - Parâmetro em Análise taxa de Mutação .....	170
6.3	ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DOS RESULTADOS AOS PARÂMETROS OPCIONAIS DO AG .....	204
6.3.1	Grupo 5 – Parâmetro Opcional em Análise Adoção do Elitismo .....	204
6.3.2	Grupo 6 – Parâmetro Opcional em Análise Coeficiente de Convergência..	209
6.3.3	Grupo 7 – Parâmetro Opcional em Análise Tipo de Cruzamento.....	227

6.4	RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE O AG E PNL .....	234
6.4.1	Grupo 8 – Busca da Melhor solução .....	234
6.5	RESULTADOS DO AG COM A FUNÇÃO OBJETIVO COM ENFOQUE NOS CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO.....	239
6.5.1	Grupo 9 – Busca da Melhor Solução .....	239
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSIÇÕES .....</b>	<b>244</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>250</b>
	<b>ANEXO A .....</b>	<b>257</b>



---

## INTRODUÇÃO

---

O objetivo do dimensionamento de uma rede de distribuição é estabelecer as vazões e os diâmetros das tubulações, as pressões disponíveis nos nós, e altura manométrica de alimentação do sistema, que satisfaçam as condições de funcionamento requeridas.

Este dimensionamento das tubulações é hidraulicamente indeterminado, admitindo inúmeras soluções que atendam aos requerimentos de vazão e pressão nos pontos de consumo das redes de distribuição pressurizadas formando um complexo sistema com numerosos trechos conectados em série e em paralelo, aumentando consideravelmente a quantidade de variáveis do processo de cálculo.

O desenvolvimento dos microcomputadores nos últimos anos em termos de capacidade de armazenamento e processamento de dados possibilitou a substituição dos métodos clássicos de dimensionamento de redes pressurizadas, que não levam em conta a busca da solução mais econômica, pelos métodos de otimização econômica, que utilizam técnicas de pesquisa operacional para alcançarem as soluções de mínimo custo dos sistemas de distribuição de água.

As técnicas de otimização começaram a ser aplicadas, para o cálculo de redes, no final dos anos 60. Karmeli et al. (1968) apud Gomes (2004) utilizaram a **programação linear** para encontrar o menor custo de redes ramificadas. Alperovitz e Shamir (1977) apud Gomes (2004) propuseram a utilização desta técnica para encontrar o menor custo de redes malhadas.

Morgan e Golter (1985) formularam um modelo de aproximação linear em dois estágios ou módulos separados para dimensionamento da rede de distribuição de água, um para dimensionamento dos diâmetros e outro para resolução hidráulica da rede.

Gessler e Walski (1985) apud Gomes(2004) desenvolveram o método WADISO, baseado na *enumeração exhaustiva* das possíveis soluções hidráulicas. O método GRANADO (Granados, 1986), apud Gomes(2004) baseado na *programação dinâmica*, foi utilizado no dimensionamento ótimo de redes ramificadas, e posteriormente aplicado por Gomes (2000) na otimização de redes malhadas.

Outra técnica bastante empregada é a *programação não linear-PNL*, utilizada para otimização no dimensionamento de redes malhadas. Cirilo (1997), com auxílio do software ADS utilizando o otimizador por Método Modificado das Direções Viáveis calcula os diâmetros ótimos e realiza o balanceamento das vazões atendendo restrições de perda de carga unitária para a rede que também será apreciada nesta dissertação.

Gomes e Leal (2004) também utilizando a *PNL* apresentam seu método de dimensionamento econômico das variáveis decisórias do sistema de abastecimento, diâmetros x altura manométrica de bombeamento

Uma abordagem mais recente utilizando métodos baseados no desenvolvimento evolucionário para busca da solução de problemas tem conquistado adeptos nos mais diversos campos de atuação. Tal técnica, melhor conhecida por *Algoritmo Genético - AG* devido ao uso de operadores genéticos foi utilizada em diversos estudos relacionados à otimização no dimensionamento de redes de abastecimento d'água.

Dentre os vários trabalhos na literatura que apresentam a eficácia dos *AGs* em otimização de sistemas de distribuição de água aludimos ( Simpson et al., 1994; Savic e Walters, 1997; Kumar et al., 2000; Dandy e Engelhardt, 2001; Prasad e Park, 2002; Zyl et al., 2004; Savic et al., 2000; Gambale, 2000; Wu et al., 2001; Araújo, 2003; Neto, 2003; Gibbs et al., 2005 e Vairevamoorthy e Ali, 2005).

O presente trabalho de dissertação se propõe a encontrar soluções de mínimo custo para o dimensionamento de sistemas de distribuição de água através da técnica de pesquisa operacional do Algoritmo Genético, sendo seus objetivos a seguir apresentados.

## 1.1 OBJETIVO

### *GERAL*

O presente trabalho de dissertação de mestrado tem a intenção de desenvolver um modelo computacional otimizador e simulador para dimensionamento de sistemas de distribuição de água em redes malhadas através da técnica do Algoritmo Genético. Para tanto, primeiramente analisaremos diversos objetivos identificando os mais promissores do sistema, atentando sempre para a abrangência do problema, cuja melhor solução encontrada, deverá atender às diversas restrições estabelecidas para o dimensionamento do sistema.

### *ESPECÍFICO*

Obter uma ferramenta útil, prática e a mais genérica possível, permitindo sua utilização para o dimensionamento ótimo de diferentes redes somente com a alimentação dos parâmetros de entrada inerentes, evitando ao máximo, mudanças em seu código pelo usuário.

Calibrar os parâmetros deste modelo de modo a fornecer o melhor desempenho em termos da qualidade final das soluções e o esforço computacional.

Comparar os resultados obtidos do dimensionamento da rede analisada através do Algoritmo genético - AG e da Programação Não Linear – PNL para a mesma função objetivo que visa à eficiência das seções das tubulações sujeita às mesmas restrições hidráulicas, que implicitamente minimiza os custos de implantação.

Implementar uma função objetivo mais abrangente enfocando a minimização dos custos de implantação e de operação.

Comparar os resultados dos dimensionamentos da rede analisada através das duas funções objetivos.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é constituída por sete capítulos conforme organograma da figura 1.1.

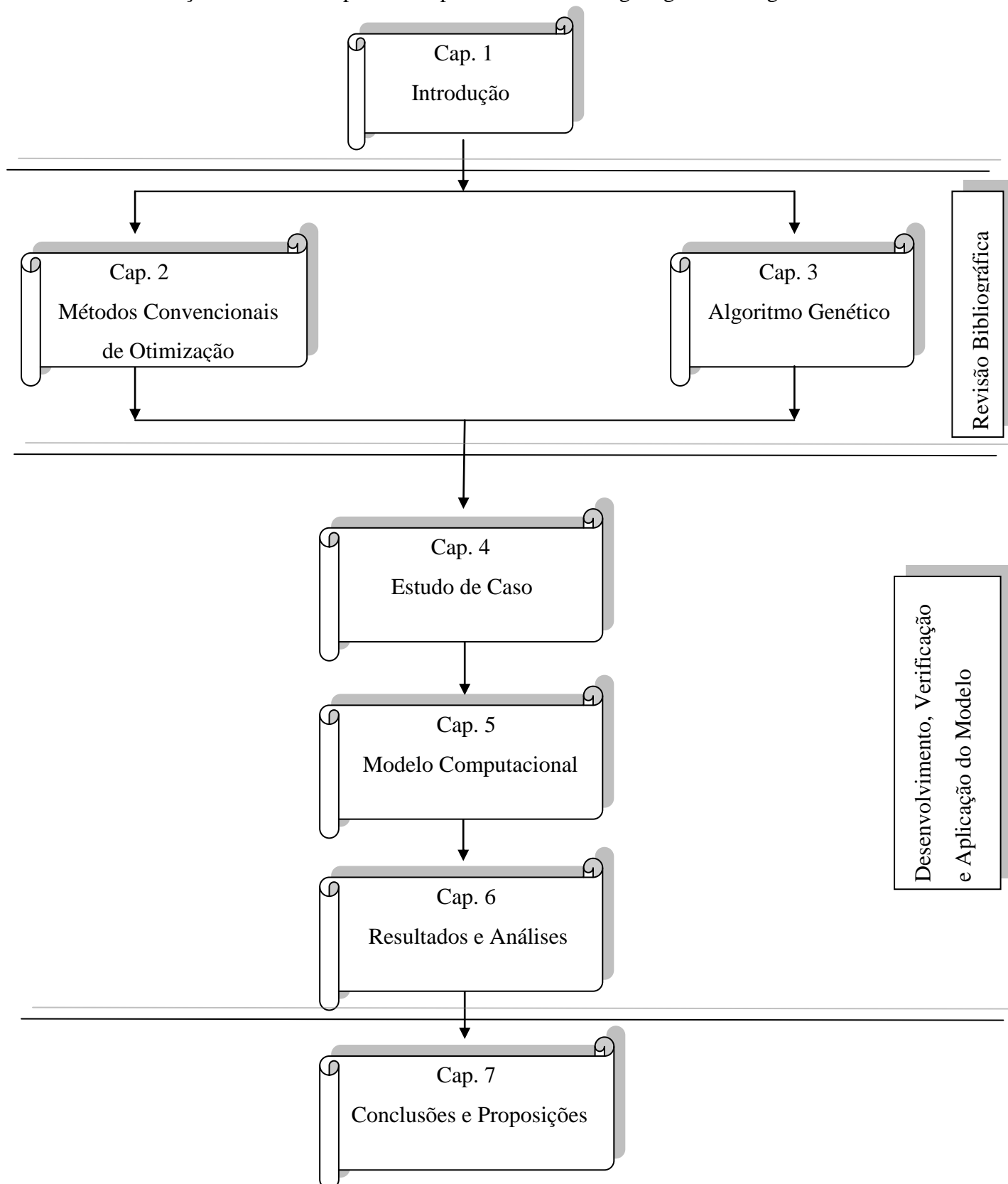


Figura 1.1 – Organograma da dissertação

A parte inicial do trabalho, capítulos 2, contém a formulação estrutural básica do processo de otimização, as classificações quanto à natureza matemática das equações envolvidas e a apresentação de cada um dos chamados métodos clássicos de otimização mostrando suas aplicabilidades realizando para cada um deles revisões bibliográficas de trabalhos envolvendo o problema de dimensionamento de redes de água.

Complementando esta parte inicial, o capítulo 3 apresenta a formulação estrutural do processo de otimização do algoritmo genético, suas vantagens sobre outros métodos, sua implementação, parâmetros, e revisão bibliográfica de trabalhos que utilizam o AG na otimização de redes de água.

A segunda parte (capítulos 4, 5 e 6) apresenta o desenvolvimento do modelo computacional. No capítulo 4 é introduzido o estudo de caso da rede de distribuição com suas características realizando uma analogia entre as técnicas de otimização PNL & AG quanto aos enfoques das funções objetivos de eficiência de seção das tubulações e custo de implantação e operação.

O capítulo 5 explana a respeito do modelo computacional e seus módulos de simulação (EPANET) e de otimização (AG), sobre a interface entre estes módulos e as configurações de seus parâmetros.

No capítulo 6 são realizados as análises de sensibilidade dos resultados para os parâmetros do AG configurando-os de maneira a melhorar o seu desempenho em termos de convergência e qualidade final das soluções.

Ainda neste capítulo, já com os parâmetros do AG calibrados para o melhor desempenho, são realizadas simulações em busca do ótimo global e comparados estes resultados aos encontrados no exemplo da literatura através da PNL.

E na parte final do trabalho, capítulo 7, são apresentadas as conclusões mais importantes dos resultados obtidos e elaboradas algumas proposições para futuros estudos.

---

**MÉTODOS CONVENCIONAIS DE OTIMIZAÇÃO**


---

Nos últimos trinta anos, o desenvolvimento das técnicas de otimização têm sido cada vez mais utilizado para solucionar problemas nos mais diversos campos, inclusive o de planejamento, dimensionamento e gerenciamento de sistemas de abastecimento de água.

Para se modelar matematicamente um dado problema, a estrutura básica do processo de otimização tem a seguinte configuração:

$$\text{Maximizar/Minimizar } f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.1)$$

$$\text{Sujeito às restrições } g_k(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq, =, \geq 0 \quad p/k = 1, 2, \dots, M \quad (2.2)$$

Para o processo de classificação é crucial a observação da natureza matemática das equações envolvidas, atentando-se para algumas características relevantes:

- A quantidade de variáveis de decisão;
- Os tipos de variáveis de decisão (inteira, discreta, contínua);
- A existência de restrições;
- Comportamento de linearidade ou não das equações envolvidas;
- Quando, no processo, deve ser feita a decisão.

A existência de mais de uma variável de decisão classifica o problema como multidimensional caso contrário é dito unidimensional, o que simplifica consideravelmente sua abordagem, disponibilizando-se inúmeras técnicas eficazes para manipulação de equações deste tipo.

O tipo de variável envolvida se discreta, contínua ou inteira também direciona a escolha do método de otimização, pois restringe ou exige considerações peculiares que reduzem a abrangência da aplicabilidade do método.

A ocorrência de restrições limita e direciona a busca da otimização dentro de um espaço restrito de soluções, onde as técnicas de pesquisa operacional otimizem a função objetivo. Geralmente expressam limitações físicas, financeiras ou institucionais inerentes ao problema.

A existência de relações lineares entre as variáveis de decisão, traduzidas pelas equações que descrevem o problema estabelece a divisão entre os métodos, enquadrando os problemas em não lineares ou lineares. Estes apresentam maior facilidade de formulação e entendimento.

A característica de processos de decisão sequencial em vários estágios também indica a maior adequabilidade de um método a outro.

## **2.1 OTIMIZAÇÃO POR PROGRAMAÇÃO LINEAR - PL**

Seguramente pode-se afirmar que a *Programação Linear* é a técnica mais conhecida e usada na solução de problemas de otimização, Barbosa (1997). Seu desenvolvimento representou um dos avanços científicos mais importantes da segunda metade do século XX, sendo-lhe inclusive dedicado um prêmio Nobel na área de economia em 1975 por solução de problema de alocação de recursos.

São vários os setores da sociedade que, independente do porte empresarial, se utilizam desta ferramenta matemática para economizar milhões de dólares.

Seu tipo mais comum de aplicação consiste na alocação de recursos limitados a atividades competitivas de maneira ótima.

Os problemas lineares podem ser modelados por funções que possuem as seguintes propriedades:

$$f(\alpha \underline{x}) = \alpha f(\underline{x}) \quad (2.3)$$

$$f(\underline{x} + \underline{y}) = f(\underline{x}) + f(\underline{y}), \quad (2.4)$$

Resumidas na equação:

$$f(\alpha \underline{x} + \beta \underline{y}) = \alpha f(\underline{x}) + \beta f(\underline{y}) \quad (2.5)$$

A ocorrência do termo independente diferente de zero na função  $f$  invalida a linearidade formalmente exposta, embora seja mantida a proporcionalidade em relação ao conjunto de suas variáveis que é a principal característica da equação.

As representações formalmente conhecidas (para variáveis estritamente não negativas) podem assim ser expressas:

$$\text{Maximizar/Minimizar } f(x_1, x_2, \dots, x_n) = C_1 x_1 + C_2 x_2 + \dots + C_n x_n \quad (2.6)$$

$$\text{Sujeito às restrições } A_{i1}x_1 + A_{i2}x_2 + \dots + A_{in}x_n \leq, =, \geq B_i \quad (2.7)$$

$$p/ i = 1, 2, \dots, m$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \quad (2.8)$$

Ou em notação vetorial:

$$\text{Maximizar/Minimizar } f(\underline{x}) = [C]\{\underline{x}\} \quad (2.9)$$

$$\text{Sujeito às restrições } [A]\{\underline{x}\} \leq, =, \geq \{B\} \quad (2.10)$$

$$\{\underline{x}\} \geq 0 \quad (2.11)$$

A resolução deste tipo de problema foi formalizada matematicamente por G.B. Dantzig em 1947, para resolver problemas de logística da Força Aérea Americana. O procedimento algébrico criado por ele é conhecido como método Simplex sendo associado à própria imagem da Programação Linear



O Método Simplex permaneceu como única alternativa de soluções para problemas de maior porte de programação linear até 1978, quando Khachiyan (1979) apud Barbosa (1997), formulou o algoritmo de elipsóides e posteriormente Karmarkar (1984) apud Barbosa (1997), publicou o algoritmo de pontos interiores.

O método original SIMPLEX sofreu algumas alterações aumentando o poder de resolução do algoritmo, tais como SIMPLEX Revisado e o SIMPLEX Generalizado, que atualmente fazem parte de pacotes computacionais através de ferramentas como o Solver da planilha Excel da Microsoft.

A solução do problema de programação linear através de qualquer das versões do SIMPLEX está atrelada a um sistema de equações lineares em que a função objetivo e as equações de restrição, também lineares, são resolvidas indiretamente, através de sucessivas iterações até chegar à solução ótima, maximizando ou minimizando a função objetivo dependendo do caso.

Ao leitor interessado em didaticamente compreender o funcionamento do método SIMPLEX, é indicado o livro de Puccini, A. L. (1972) *Introdução à Programação Linear* da editora Ao Livro Técnico S.A.

Na literatura relacionada à otimização no dimensionamento de sistemas de redes de água este método começou a ser utilizado no final dos anos 60, Karmeli et al. (1968) apud Gomes (2004), utilizaram a programação linear para encontrar o menor custo de redes ramificadas.

Guercio e Xu (1997) apresentaram um modelo de otimização de dimensionamento de sistemas de água baseado na confiabilidade através de Programação Linear-PL. A função objetivo e as restrições são expressas pela expansão de primeira ordem da série de Taylor e três sub-modelos ( modelo simulador de regime permanente, modelo de confiabilidade e um modelo de otimização linear ) são ligados no algoritmo. A pesquisa pelo ótimo é feita em dois passos. O primeiro passo é para busca de uma solução ótima e então a confiabilidade e carga de pressão, avaliadas nesta configuração, são comparadas com os valores restritivos. Caso exista a possibilidade de diminuição do custo do sistema, uma nova iteração é repetida.

Segundo o autor a sobrecarga computacional foi diminuída consideravelmente viabilizando a utilização da técnica de otimização no planejamento de grandes redes.

Ostfeld e Karpibka (2005) apresentaram um modelo com abordagens de Programação Linear-PL e Algoritmo genético - AG para dimensionamento ótimo em sistemas de abastecimento de água. O método PL é limitado, convergindo à solução ótima local, além de não ser capaz de inverter os fluxos nas tubulações, por outro lado ele permite a divisão de trecho entre nós da tubulação em seguimentos com diâmetros ótimos diferentes. A abordagem do AG é robusta, mas computacionalmente demorada e somente um diâmetro de tubo pode ser selecionado entre dois nós. Segundo os autores o modelo híbrido tira vantagem dos dois métodos resolvendo o problema no “espaço de busca abrangente” usando o AG e “no espaço de busca local” usando a formulação PL. A metodologia foi demonstrada usando uma rede malhada de dois anéis referenciada na literatura.

Samani e Mottaghi (2006) desenvolveram um modelo de otimização de redes de distribuição de água usando programação linear inteira. Em seus estudos eles determinaram o dimensionamento ótimo de uma rede municipal para uma única condição de carga pela técnica de programação linear inteira através do algoritmo “branch and bound – dispersar e limitar”.

Suas análises hidráulicas e de otimização são ligadas através de um procedimento iterativo, que habilita o dimensionamento do sistema de distribuição de água que satisfaz todas as restrições requeridas com o custo total mínimo. As restrições incluem dimensões dos tubos, limitados aos diâmetros comerciais disponíveis, níveis de reservatórios, velocidades de escoamento e pressões nodais. A precisão do modelo desenvolvido foi avaliada usando uma rede com alternativas de solução limitada, a solução ótima da qual pode ser determinada sem empregar técnicas de otimização. O modelo proposto também foi aplicado em redes resolvidas por outros, e obtiveram resultados comparativos de precisão e convergência bem satisfatórias.

## 2.2 OTIMIZAÇÃO POR PROGRAMAÇÃO DINÂMICA - PD

Inúmeros problemas nas áreas de planejamento, projeto e operação são vistos como processos de decisão sequencial em vários estágios. Para problemas desse tipo a PD se apresenta como ideal. Importante salientar que estágios não significam necessariamente intervalos de tempo, representando também atividades, localidades ou qualquer ponto do processo no qual deve ser tomada uma decisão.

A técnica da PD apresenta propriedades bastante vantajosas em relação a outras. Por exemplo, seu trabalho computacional cresce aproximadamente linear à quantidade de estágios, enquanto em outros métodos este crescimento geralmente ocorre geometricamente. Outra vantagem deste método é poder utilizar a programação discreta, aspecto interessante para área de recursos hídricos, visto que grande parte dos problemas apresenta variáveis deste tipo.

Outra propriedade muito atraente do ponto de vista matemático é que, suas funções objetivos e as restrições podem ser não lineares e até mesmo descontínuas, podendo ser empregada em problemas complexos, difíceis de serem tratados através de outras técnicas de otimização.

Uma característica importante da PD é a geração de informações complementares a cada estágio na busca de ótimos do processo, fornecendo meios para flexibilizar a análise de sistemas complexos, prediado de grande utilidade em problemas estocásticos, de múltiplo objetivo, ou em situações onde são necessárias análises envolvendo variáveis aleatórias, objetivos conflitantes, múltiplos decisores e outros elementos complicadores do processo de decisão.

A PD pode apresentar a desvantagem, em casos onde a discretização das variáveis de estado é muito elevada, da chamada praga da dimensionalidade, termo originalmente proposto por Bellman(1957). Neste caso, também chamado problema multi-estágio, a busca do ótimo é bastante dificultada devido ao grande número de possibilidades a serem analisadas a cada estágio, exigindo muita memória e tempo de processamento.

Na literatura encontramos muitas aplicações de PD em problemas de recursos hídricos, entretanto a maioria dos casos se enquadra em três temas: a alocação de água em sistemas de múltiplos usuários, a operação de sistemas de reservatórios e a expansão de capacidade de sistemas de recursos hídricos.

Os interessados em maiores detalhes teóricos podem consultar a seguinte bibliografia: Bellman (1957), Howard (1960), Bellman e Dreyfus (1962), Hadley (1964) Nemhauser (1966), Hastings (1973) Dreyfus e Law (1977), Larson e Casti (1978) e Hillier e Lieberman (1995) Alguns textos que tratam a aplicação da PD em Recursos Hídricos são encontrados em: Hall e Buras (1961), Buras(1966), Hall e Dracup (1970), Mawer et al.(1974), Loucks et al. (1981), Willis e Yeh (1987), e Braga et al. (1987).

Quanto a aplicação da PD em otimização de sistemas de dimensionamento de redes de água encontramos na literatura Perez et al. (1993) que desenvolveram um método para dimensionamento ótimo de redes ramificadas usando válvulas de redução de pressão. O método obteve grande redução de investimento no sistema de irrigação considerando outros fatores além do próprio diâmetro, como a espessura de parede e o tipo de material da tubulação, identificando estratégias ótimas para o uso de válvulas redutoras de pressão (PRVs). Estas válvulas reduzem a pressão na tubulação mais a jusante, reduzindo espessura de paredes e conseqüentes custos de investimento nestas tubulações. O método foi formulado baseado na programação dinâmica e foi demonstrado numa aplicação em um exemplo de rede.

Kleiner et al. (2001) desenvolveram um modelo computacional usando a abordagem da programação dinâmica combinada com esquemas de enumeração parcial e implícita para elaborar um planejamento ótimo de renovação de uma rede de distribuição de água. Esta renovação é necessária, já que, com o envelhecimento da rede de distribuição aumenta-se a frequência de quebra e diminui-se a capacidade hidráulica das tubulações, resultando em falhas no sistema que acarretam custos de reparos e reabilitação além do custo da degradação junto aos consumidores da imagem do desempenho do sistema. O método é uma ferramenta que ajuda ao tomador de decisão, determinando um plano efetivo de custo ótimo identificando quais tubos a reabilitar, a que tempo dentro do horizonte de planejamento, sujeito a restrições de requerimentos de serviço (confiabilidade do sistema, pressões de

serviço, etc). O resultado do método é uma estratégia que identifica, para cada tubo na rede, a alternativa ótima de reabilitação/renovação e o período ótimo de implementação.

### 2.3 OTIMIZAÇÃO POR PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR – PNL

A PNL tem se consolidado na resolução de problemas de otimização onde a não linearidade matemática que representam os processos físicos acontece, ou seja, a grande maioria dos problemas em que se depara a engenharia.

No passado, o emprego de técnicas de otimização restringia-se à PL, devido à indisponibilidade de recursos dos computadores. Os modelos matemáticos que descreviam os processos físicos eram linearizados por diversas técnicas, habilitando-os ao uso da PL, porém com perda de precisão, em muitos casos descaracterizando totalmente o problema original.

Embora o artifício de linearização ainda seja usado, os recursos computacionais hoje existentes facilitam a utilização da PNL.

Um problema de PNL pode ser descrito na seguinte formulação:

$$\text{Minimizar } F(X) \quad (2.12)$$

Sujeito a

$$G_i(X) < 0; \quad i=1,2,\dots,m_1 \quad (2.13)$$

$$H_k(X) = 0; \quad k=1,2,\dots,m_2 \quad (2.14)$$

$$X^L \leq X \leq X^U \quad (2.15)$$

Onde:

$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T$  Vetor variáveis de decisão;

$F(X)$  Função objetivo;

$G_i(X), H_k(X)$  Restrições do problema.

$X^L, X^U$  Fronteiras do domínio

Os primeiros registros de trabalhos com PNL são de Booth(1949) embora usualmente atribua-se o nascimento da mesma ao pioneiro trabalho de Kuhn e Tucker (1951) apud Cirilo(1997).

Diversos autores publicaram estudos sobre a PNL dentre eles merecem destaque Davidson(1959), Chenney e Goldstein(1959), Rosenbrock(1960), Powell(1962,1966,1969, 1970), Fletcher e Reeves(1964), Swann(1964), Box(1966), Davies(1968,1969), Meyers (1968), Zangwill(1969), Shanno(1970), Broyden (1970).

Os problemas de PNL possuem vários tipos de classificação, geralmente associada à técnica utilizada. A maneira usual divide os métodos em *técnicas analíticas* e *técnicas de busca numérica*, Cirilo(1997).

As técnicas analíticas determinam soluções ótimas resolvendo sistemas de equações, através de derivadas, processando sempre em busca das raízes do sistema. O método de cálculo diferencial, multiplicadores de Lagrange, e a programação geométrica são exemplos clássicos destas técnicas.

As técnicas de busca numérica se utilizam de informações passadas, num processo iterativo para determinar as soluções ótimas, empregando para isto, métodos numéricos, sendo mais abrangentes quanto aos tipos de problemas que as analíticas.

A PNL apresenta a vantagem comparativa à PL de ser mais abrangente, por poder representar também os processos físicos envolvidos não lineares sem a necessidade de linearização dos mesmos. Em muitos casos estas linearizações são impraticáveis, e mesmo quando são possíveis, perde-se precisão neste processo.

Os maiores problemas deste método relacionam-se à incerteza de que a solução ótima obtida é realmente a melhor entre todas as soluções (ótimo local ao invés de ótimo global). Devendo-se esta limitação não à PNL, mas à própria natureza de não linearidade do problema. E determinados tipos de problemas apresentam situações de dificuldades de convergência à solução ótima.

No tocante a aplicação da PNL em otimização de sistemas de dimensionamento de redes de água encontramos na literatura Duan et al. (1988), que apresentaram modelo de otimização para reabilitação de sistemas de abastecimento de água utilizando PNL conjuntamente com simulador hidráulico. A otimização do modelo proposto dimensiona sistema hidráulico, bombas, reservatórios, considerando falhas hidráulicas, determinando a operação ótima das bombas.

Lanssey et al. (1989) desenvolveram um método de otimização de sistemas de abastecimento de água através da PNL acoplado a simulador hidráulico operando em regime permanente ou extensivamente. Os elementos do sistema otimizados foram os tubos (diâmetros), bombas, e reservatórios, determinando a localização ótima para válvulas redutoras de pressão.

Kim e Mays (1994) descreveram uma nova metodologia para seleção de tubos a serem reabilitados e/ ou trocados em um sistema de distribuição de água. E para determinar a redução da capacidade de bombeamento de modo que, a demanda de água e as pressões requeridas em todos os nós, sejam satisfeitas enquanto o custo total de reabilitação e de energia é minimizado. Quatro funções de custo são consideradas: troca de tubulação, reabilitação de tubulação, de reparo da tubulação e de bombeamento.

A metodologia por eles descrita considera as substituições entre decisões com relação a cada tubo: troca de tubos, revestimento de tubos, ou deixar como está. A formulação matemática é de um problema de PNL inteira. O procedimento de solução combina um esquema de enumeração implícita usando algoritmo “branch and bound – (dispersar e limitar)” com um procedimento de gradiente reduzido generalizado para resolver um subproblema não linear, que é resolvido pela interface com um simulador hidráulico (KYPIPE) com o otimizador GRG2 no qual os diâmetros das tubulações e a potência de bombeamento são as variáveis de decisão (controle).

Taher e Labadie (1996) apresentaram um sistema protótipo de suporte à decisão WADSOP (Water Distribution System Optimization Program) para guiar o dimensionamento e análise do sistema de distribuição de água em resposta às mudanças de demanda no tempo, e padrões de uso, e acomodações aos novos desenvolvimentos.

O WADSOP integra um sistema de informações geográficas para gerenciar e analisar a base de dados espaciais com a teoria de otimização para prover uma ferramenta de ajuda e suporte a decisão a engenheiros hidráulicos. Vários estudos comparativos mostram desempenho melhorado sobre resultados publicados. É apresentado um estudo de caso real para a rede de distribuição de água da cidade de Greeley, Colorado.

Varma et al. (1997) desenvolveram um modelo com abordagem PNL usando a técnica de otimização de programação quadrática sucessiva para o dimensionamento ótimo de uma rede de um sistema de abastecimento d'água. O método proposto elimina as restrições de igualdade que descrevem a hidráulica por uma conveniente escolha de variáveis dependentes e independentes.

As variáveis dependentes são escolhidas baseadas na decomposição gráfica teórica da estrutura da rede. Isto permite o cálculo analiticamente das restrições reduzidas, gradiente da função objetiva, e a matriz reduzida Hessiana de uma maneira muito eficiente. Este método de decomposição assegura que o balanceamento das vazões e pressões é satisfeita, apresentando-se robusto independente do ponto de partida, e apto a lidar com direções iniciais de fluxo incorretas, e fornecendo soluções comparáveis às soluções ótimas anteriores para o dimensionamento de novas redes de distribuição de água ou expansão de redes existentes.

Sakarya e Mays (2000) desenvolveram uma nova metodologia para determinar a operação ótima de um sistema de bombeamento com considerações de qualidade da água. A solução da metodologia é baseada na abordagem de programação matemática resultando num problema de PNL de larga-escala que não pode ser resolvido usando código não linear existente. A solução do problema de otimização é obtida através da interface com o simulador hidráulico e de qualidade de água EPANET, com um programa de otimização PNL – GRG2. (Gradiente Reduzido generalizado-2).

Restrições limitadas no estado das variáveis são incorporadas na função objetiva usando o método da penalidade Lagrangeana aumentada, utilizando-se três funções objetivas no modelo para minimizar (1) as diferenças das atuais concentrações das substâncias dos valores de concentrações desejados; (2) o tempo total de bombeamento; ou (3) o custo total de energia. A efetividade da metodologia foi testada usando um sistema de distribuição de água



hipotético, e apresentou-se capaz de encontrar um plano ótimo de bombeamento, apreciando também a qualidade da água.

Burgschweiger et al. (2005) propuseram uma abordagem PNL que produz planos de operação praticamente satisfatórios em um tempo computacional aceitável mesmo para grandes redes. Baseado num algoritmo de otimização de PNL com método gradiente elaborado cuidadosamente, empregando uma estratégia especial de inicialização para aceleração da convergência, limites especiais de tempo mínimo acima e abaixo conjuntamente a agregação de bombeamento para manusear mudanças de decisões e várias técnicas de redução de rede para acelerar mais ainda o processo. Os resultados para os cenários aplicativos selecionados demonstram o sucesso da abordagem.

Cirilo (1997) e Gomes(2004) terão seus trabalhos e métodos, ambos em PNL, analisados detalhadamente no *capítulo 4 - Estudo de Caso*, por emprestarem respectivamente a rede exemplo da aplicação desta dissertação, e os parâmetros de custos de bombeamento e implantação da tubulação para uma das funções objetivo abordadas.

---

## ALGORITMOS GENÉTICOS

---

### 3.1 INTRODUÇÃO

Muitos problemas de otimização no mundo da engenharia industrial, principalmente nos sistemas de produção, se tornaram muito complexos e de difíceis soluções pelas técnicas de otimização convencional.

Nas décadas de 1950 e 1960, houve um crescente interesse dos cientistas da área computacional nos mecanismos de evolução natural das espécies, para servir de base como ferramenta para resolver problemas de difícil otimização. A idéia era desenvolver sistemas que fizessem evoluir uma população de possíveis soluções usando operadores inspirados na genética e na seleção natural de indivíduos mais aptos resultando na técnica estocástica de otimização chamada *COMPUTAÇÃO EVOLUTIVA*,

Atualmente reconhece-se, a título de classificação, três grandes correntes que lidam com conceitos da teoria da evolução – pertencentes à *computação evolutiva*, são elas *Estratégias de Evolução, Programação Evolutiva e Algoritmos Genéticos*.

Rechenberg (1965, 1973) apud Mitchell(1998) introduziu a primeira classe desta técnicas chamada *Estratégias Evolutivas*, na otimização de aerofólios de aeronaves. Schwefel (1975, 1977) apud Mitchell(1998), desenvolveu algoritmos que imitavam os princípios da evolução natural para problemas de otimização. As estratégias de evolução compõem a corrente dentro da computação evolutiva que mantém seu foco na forma com que os indivíduos são otimizados na tentativa de explorar o ambiente.

Fogel et al.(1966) apud Mitchell(1998) apresentaram a *Programação Evolutiva*, a segunda classe da técnica em que as possíveis soluções de um problema eram modificadas por mutação aleatória.

A programação evolutiva é a corrente dentro da computação evolutiva que se preocupa com a competição de múltiplas populações que compartilham recursos limitados.

E os *Algoritmos Genéticos-AG*, a última e a mais conhecida dentre as correntes da computação evolutiva, foram introduzidos por Holland (1975) através do trabalho publicado com o título: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. E posteriormente, Goldberg (1989), ex-aluno de John Holland popularizou os AGs.

O foco da corrente dos AGs está no fenômeno da propagação de características inerentes a indivíduos (soluções individuais do problema) que serão repassadas de uma geração (conjunto de varias soluções individuais) a outra – propagação genética.

Os AGs foram inspirados em processos observados na evolução natural, cujos mecanismos regentes não são completamente conhecidos, mas algumas de suas características são claras e amplamente empregadas no processo de formulação dos AGs.

Seguindo o princípio da seleção natural e sobrevivência dos mais aptos, declarado em 1859, pelo naturalista e fisiologista inglês Charles Darwin, os AGs podem ser vistos como uma representação matemática-algorítmica de seu postulado, Barcellos(2000). Podendo ser assim resumidos:

- a evolução é um processo que opera sobre os cromossomos do organismo e não sobre o organismo que os carrega. Assim, o que ocorrer ao organismo durante sua vida, não irá se refletir sobre seus cromossomos, mas as modificações dos cromossomos terão reflexo direto sobre as características do organismo, que é a própria decodificação de seus cromossomos.
- a seleção natural estabelece o relacionamento entre os cromossomos e o desempenho que suas estruturas decodificam, fazendo com que os cromossomos representativos dos organismos mais aptos sobrevivam e reproduzam mais do que os menos aptos.

- a reprodução ou recombinação (*crossover*) é o operador através do qual a evolução (formação de organismo mais apto) se caracteriza através da combinação do material cromossômico dos genitores.
- a mutação melhora a diversidade dos cromossomos, mas destrói informações neles contidas. Devendo-lhe a taxa de mutação atribuída ser pequena, mas suficiente para assegurar a diversidade.

Estes postulados intrigaram John Holland na década de 1970, que acreditava que formulando estes princípios em um programa de computador, pudesse resolver por simulação, problemas complexos, exatamente como ocorria na natureza.

Holland iniciou seu trabalho manuseando cadeias de bits 0's e 1's para representarem os cromossomos de cada organismo, que sozinho representa uma possível solução para o problema. Seu algoritmo resolvia problemas complexos de maneira muito simples. Assim como na natureza, o algoritmo ignorava o tipo e a complexidade do problema, estabelecendo uma simples função de aptidão que realizava o papel da seleção natural, atribuindo aos organismos com melhores valores da função objetivo, maiores probabilidades de reprodução do que os menos aptos, imitando o processo evolucionário da natureza.

O algoritmo genético proposto por Holland era composto por três partes principais:

- módulo de avaliação, contendo uma função de avaliação que mede o valor de todos os cromossomos no contexto do problema;
- módulo de população, contendo uma população de cromossomos e técnicas para criar e manipular esta população;
- módulo de reprodução, contendo técnicas para criação de novos cromossomos durante a reprodução.

### 3.2 TERMINOLOGIA

O AG, sendo uma simbologia do processo evolucionário da natureza, possui muitos termos originados na biologia. Uma lista com os principais termos encontrados sobre o assunto na literatura (Goldberg, 1989; Michalewicz e Attia, 1994; Galvão et al., 1999):

- Cromossomo e Genoma: na biologia, genoma é o conjunto completo de genes de um organismo, podendo ter vários cromossomos. Nos AGs, os dois representam a estrutura de dados que codifica uma solução para um problema;
- Gene: na biologia, é a unidade de hereditariedade que é transmitida pelo cromossomo e que controla as características do organismo. Nos AGs, é um parâmetro codificado no cromossomo, ou seja, um elemento (variável de decisão) do vetor que representa o cromossomo;
- Indivíduo: um simples membro da população. Nos AGs, um indivíduo é formado pelo cromossomo e sua aptidão;
- Genótipo: na biologia, a composição genética contida no genoma. Nos AGs, representa a informação contida no cromossomo ou genoma;
- Fenótipo: nos AGs, representa o objeto, estrutura ou organismo construído a partir das informações do genótipo, ou seja, é o cromossomo decodificado;
- Alelo: na biologia, representa uma das formas alternativas de um gene. Nos AGs, representa os valores que o gene ou variável de decisão pode assumir;
- Epistasia: interação entre genes do cromossomo, isto é, quando um valor de gene influencia o valor de outro gene. Problemas com alta epistasia são de difíceis solução por AGs; e
- Elitismo: procedimento de preservação do melhor membro de uma população de uma geração para outra.

### 3.3 VISUALIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DOS AGs

Os AGs são técnicas de pesquisa operacional estocástica que imitam, matematicamente, os mecanismos de evolução natural, compreendendo os processos biológicos de seleção e genética das populações.

Diferindo das técnicas convencionais de pesquisa, os AGs iniciam com um conjunto inicial de soluções randômicas, chamada população inicial. Cada indivíduo na população é chamado cromossomo, representando uma solução para o problema. Um cromossomo é usualmente uma sequência de símbolos, mas não necessariamente uma sequência binária.

Os cromossomos desenvolvem-se através de sucessivas iterações, chamadas gerações. Durante cada geração, os cromossomos são avaliados, usando medidas de aptidão através da função objetivo.

A próxima geração é criada com uma população de novos cromossomos chamados de descendência, sendo cada descendente formado pela utilização do operador de recombinação (crossover) de dois cromossomos (indivíduos) selecionados da população atual e/ou pela modificação usando o operador de mutação de um indivíduo também selecionado da população corrente, mantendo-se o tamanho da população constante.

Os indivíduos da população mais aptos têm maiores probabilidades de serem selecionados. Depois de varias gerações o algoritmo converge para o melhor cromossomo, que esperançosamente representa a solução ótima ou sub-ótima

### 3.4 O ALGORITMO DO AG

O algoritmo proposto por Holland, é conhecido na literatura como *Simple Genetic Algorithm* ou *Standart Genetic Algorithm*, ou simplesmente *SGA*. Podendo-se descrever o algoritmo, sucintamente, em seis passos, (Davis, 1991):

- 1 – inicie uma população de tamanho  $N$  com soluções geradas aleatoriamente;
- 2 – avalie a função aptidão para cada solução desta população;
- 3 – selecione cromossomos da população para recombinação e mutação;
- 4 – aplique a recombinação e a mutação nos cromossomos (indivíduos) selecionados, obtendo soluções filhas, mantendo o mesmo numero  $N$  de soluções;
- 5 – avalie os novos cromossomos (indivíduos) através da função aptidão, e
- 6 – se a solução ideal for encontrada ou, um número pré-estabelecido de gerações for desenvolvido, retorne a solução com a melhor aptidão. Caso contrário, volte ao passo 3.

Procedimento do Algoritmo Genético Padrão de Holland

Seja  $S(t)$  a população de cromossomos na geração  $t$ .

Início

$t \rightarrow 0$

inicializar  $S(t)$

avaliar  $S(t)$

**enquanto** o critério de parada não for satisfeito faça

$t \rightarrow t+1$

selecionar  $S(t)$  a partir de  $S(t-1)$

aplicar cruzamento sobre  $S(t)$

aplicar mutação sobre  $S(t)$

avaliar  $S(t)$

**fim** enquanto

fim

A figura 3.1 representa o fluxograma do AG Padrão.

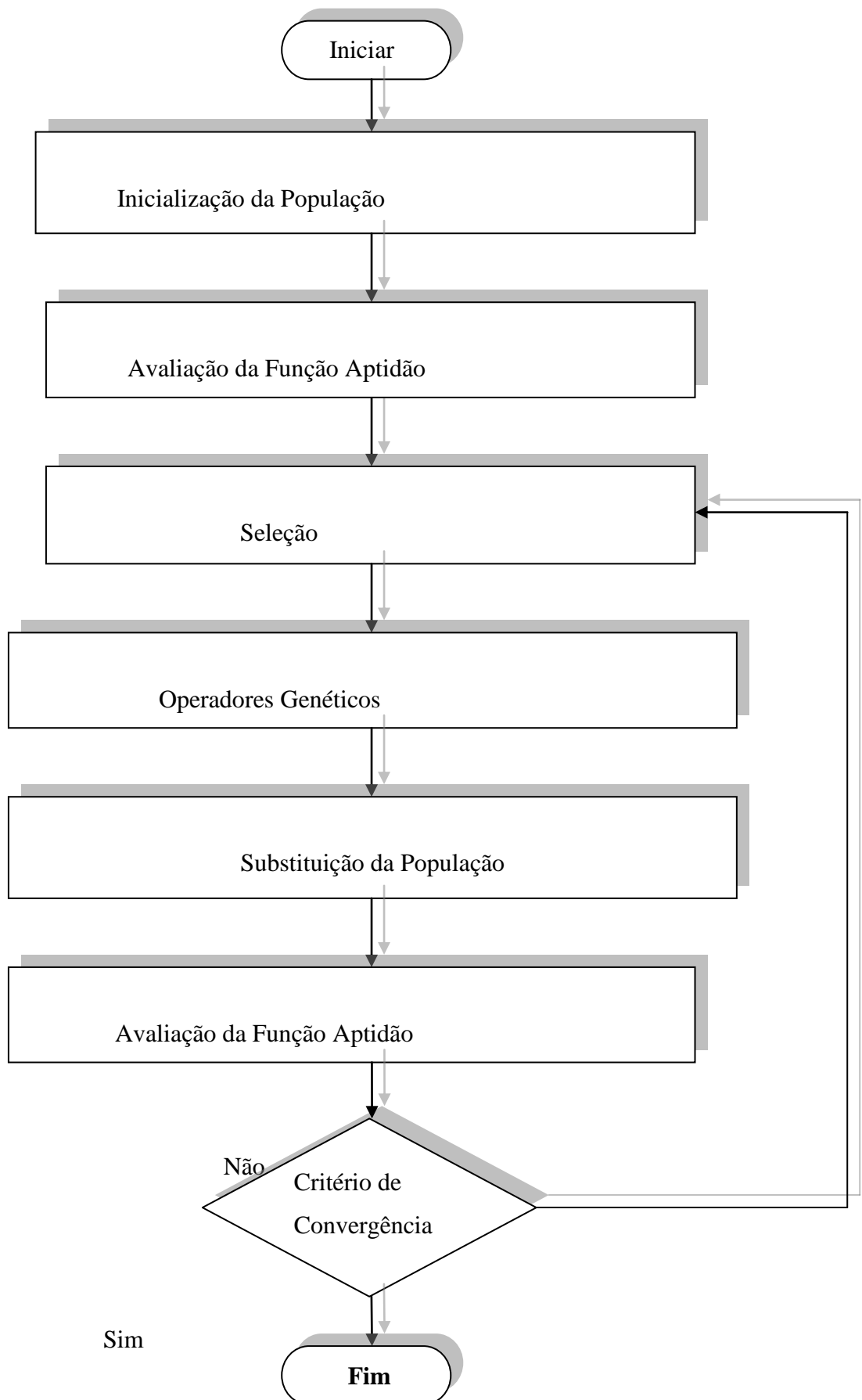


Figura 3.1 – Fluxograma do AG Padrão



### 3.5 VANTAGENS DOS AGs

Algumas vantagens dos AGs:

- trabalham com o código dos parâmetros e não com os parâmetros propriamente ditos;
- funcionam com parâmetros contínuos e discretos ou uma combinação destes;
- realizam buscas simultâneas em várias regiões do espaço de pesquisa, pois trabalham com uma população e não com um único ponto;
- utilizam informações de custo ou recompensa, não necessitando de derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
- facilidade de implementação, sem a necessidade de conhecimento matemático aprofundado do problema;
- otimizam um grande número de variáveis, trabalhando com funções objetivo com superfícies complexas, reduzindo a incidência de mínimos ou máximos locais;
- fornecem uma gama de parâmetros ótimos e não uma simples solução;
- usam regras de transição probabilísticas e não determinísticas na identificação de soluções alternativas;
- 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; e
- são também facilmente hibridizados com outras técnicas heurísticas, podendo realizar naturalmente interface com softwares simuladores a cada iteração.

### 3.6 IMPLEMENTAÇÃO DE AGs

Via de regra a solução de um problema específico através de implementação de AGs requer a adoção de algumas definições:

- escolher o sistema de representação das variáveis de decisão do problema;
- definir modo de geração das soluções (indivíduos) componentes da população inicial observando a viabilidade das mesmas quanto ao atendimento das restrições, caso existam;
- definir a avaliação de desempenho através da função objetivo ou aptidão;
- selecionar as soluções promissoras para gerarem a próxima descendência;
- especificar os tipos de operadores genéticos a serem utilizados;
- configurar os parâmetros do AG tais como, tamanho da população, número de gerações, probabilidades de recombinação e mutação, critério de parada ou convergência.

#### 3.6.1 Sistema de Representação das Variáveis de Decisão

O primeiro passo para resolver um problema de AG é representar cada variável de decisão na forma de um cromossomo. Esta representação poderá ser binária (cadeia de bits) ou real (conjunto de parâmetros) da função objetivo.

A representação binária por ser historicamente anterior a real, uma vez que foi utilizada nos trabalhos pioneiros de Holland (1975), é a representação tradicional, demonstrando facilidade de utilização, manipulação e de análise teórica.

Contudo, se um problema apresenta variáveis de decisão contínuas e requer precisão numérica, ele precisará armazenar cromossomos longos, que dificultam e inviabilizam a adoção da representação binária. Já que para cada ponto decimal de precisão, adiciona-se 3,3 bits na cadeia. E pior perde-se a uniformidade dos operadores, pois uma mutação nos primeiros bits afetará mais a aptidão que nos últimos.

A representação real (i.e. com pontos flutuantes) gera cromossomos menores, sendo melhor compreendida que a cadeia de bits e apresenta a vantagem da maior facilidade de criação de novos operadores genéticos.

O melhor sistema de representação tem sido tema de várias pesquisas e algumas muitas delas, têm demonstrado experimentos favoráveis à representação real (Michalewicz, 1992; Haupt e Haupt, 1998).

### **3.6.2 Modo de Geração da População Inicial de Cromossomos**

A maneira mais comum de geração da população inicial é aleatoriamente. Cada cromossomo da população inicial é randomicamente gerado dentro dos limites de restrição do espaço de busca (domínio).

E se o problema apresentar mais de uma variável de decisão (ou parâmetro), o cromossomo (ou indivíduo) será formado pelo conjunto de parâmetros envolvidos. Devendo cada parâmetro ser gerado aleatoriamente atendendo suas restrições de limites de domínio e, posteriormente concatenado (cadeia de bits - representação binária) ou vetorizado (vetor - representação real) aos demais parâmetros envolvidos no problema, formando um cromossomo factível em termos de domínio para todos os parâmetros.

Em muitos casos, há restrições quanto a valores da função aptidão ou objetivo (imagem), significando que o atendimento das restrições de domínio de cada parâmetro do indivíduo, não garante o atendimento das restrições de imagem. Nestes casos é necessária, primeiramente a avaliação de aptidão do cromossomo gerado, e somente verificado o atendimento da restrição de imagem, o mesmo comporá a população inicial.

A geração da população inicial ainda deve preocupar-se quanto à representatividade de todo o espaço amostral, podendo-se para isto adotar a uniformidade (i.e. pontos igualmente espaçados). Ou ainda, gerar a primeira metade da população aleatoriamente e a segunda metade a partir da primeira, invertendo os bits, garantindo que cada posição da cadeia de bits possua um representante na população com os valores 0 e 1.

Visando melhorar a representatividade do espaço de busca, pode-se adotar uma população inicial maior que a utilizada nas gerações subseqüentes.

Outro procedimento que pode ser adotado de bastante utilidade, desde que disponível é a técnica *seeding* ou seja pôr uma semente (solução conhecida por outros métodos) na população inicial, e desde de que se adote o *elitismo* (preservação da melhor solução de geração para outra), garantir que o resultado gerado pelo AG não seja pior que os encontrados por estes métodos.

### 3.6.3 Avaliação de Aptidão

A avaliação de aptidão é realizada através do cálculo do valor da função aptidão de uma solução factível, recebendo uma nota que reflete quão apta é esta solução.

O conjunto domínio (ou entrada) desta função pode ser uma cadeia de bits (representação binária) ou um vetor com parâmetros (representação real). E a imagem ou (saída) desta função é um valor real, que balizará o processo de seleção desta solução para influenciar (transmitir parte ou a totalidade de sua bagagem genética) a próxima geração.

### 3.6.4 Métodos de Seleção

O papel da seleção natural da evolução determinando maior chance aos organismos mais aptos de sobreviver e reproduzir é desempenhado semelhantemente pelo procedimento de seleção das soluções (cromossomos) mais aptas, para permanecer ou gerar cromossomos filhos (com parte de sua bagagem genética), que comporão a população da próxima geração, influenciando daí por diante o processo de busca da melhor solução.

Os procedimentos de seleção mais usuais são realizados através dos seguintes métodos:

- Roda da Roleta
- Torneio
- Ordenamento
- Amostragem Estocástica Universal

### • Roda da Roleta

Holland (1975) propôs o método da roda da roleta, que consiste na seleção dos pais com probabilidade proporcional à suas aptidões.

O método possui este nome devido ao processo assemelhar-se a movimentação de uma “roleta de aposta” imaginária onde cada cromossomo corresponde a um setor da mesma com ângulo proporcional à sua aptidão, com pino apontando para um setor. É claro que, quanto maior o ângulo do setor maior a probabilidade deste parar sobre o pino..

Ou seja, a probabilidade de seleção  $P_i$  de um cromossomo com aptidão  $f_i$  é dada por:

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i} = \frac{\text{Área do setor } i}{\text{Área total da roleta}} \quad (3.1)$$

Neste método a seleção é realizada conforme a descrição a seguir:

- ordenar decrescentemente os cromossomos pelos valores de suas aptidões ( $f_i$ );
- calcular o somatório de todas as aptidões dos cromossomos da população ( $\sum_{i=1}^N f_i$  )
- gerar um número aleatório entre 0 e 1;
- acumular a soma das áreas dos setores (probabilidades de seleção -  $P_i$  ) até que o valor acumulado ultrapasse o número aleatório gerado;
- selecionar o cromossomo cuja área do setor (probabilidade de seleção -  $P_i$ ) fez o valor acumulado ultrapassar o número aleatório gerado

O processo de seleção termina quando o número de cromossomos selecionados atinge o valor estabelecido do tamanho da população. Os cromossomos pais selecionados são alocados como uma “população intermediária”, aguardando para passar pelos processos de recombinação e mutação.

### • Torneio

O método consiste na escolha aleatória e com probabilidades iguais de  $N$  cromossomos da população, e o cromossomo mais apto dentre os  $N$  (do torneio) é selecionado para compor a população intermediária. Galvão et. al. (1999) apud Carrijo (2004) indicaram o valor 3 ideal para  $N$ . O processo repete-se até o preenchimento da população intermediária

### • Ordenamento

Método no qual se define a aptidão pelo ordenamento do cromossomo na população atribuindo-se ao primeiro cromossomo (mais apto) uma aptidão arbitrária igual a 2 (dois) e ao último (menos apto) uma aptidão de valor 0 (zero). As demais são obtidas interpolando-se estes dois extremos por uma reta, ou seja, a aptidão do cromossomo de ordem (i) dada por ( $f_i$ ) é obtida pela formula:  $f_i = \frac{2(N-i)}{(N-1)}$ , sendo  $N$  o tamanho da população.

### • Amostragem Estocástica Universal

Baker (1987) propôs este método que constrói um gráfico do tipo “torta” com a população embaralhada, onde cada fatia é associada a um cromossomo da população. A área da fatia é proporcional à aptidão do cromossomo que ela representa. Em volta da parte externa da “torta” são colocados  $N$  ponteiros igualmente espaçados. Por fim o cromossomo apontado por cada ponteiro é selecionado para recombinação e mutação. Na prática, os cromossomos selecionados podem ser alocados em uma população intermediária e então a cada dois cromossomos é aplicado a recombinação.

Sobre o procedimento de substituição de gerações, vale salientar que existem dois tipos básicos de substituição de cromossomos: geracional e estado permanente (steady state).

Na *substituição tipo geracional* toda a população é substituída em cada geração, criando-se  $N$  filhos para substituir  $N$  pais. Observando-se a possibilidade da substituição geracional com “*ELITISMO*”, proposto por Dejong (1975), onde os  $K$  melhores pais nunca são substituídos por filhos piores.

A transferência do melhor cromossomo ( $K=1$ ) sem alterações de uma geração para outra é muito interessante (porque perder a melhor solução encontrada até então?), porém, aumentando-se o valor de  $K$ , aumenta-se o risco da convergência prematura.

Na *substituição tipo estado permanente*, apenas um indivíduo é introduzido por vez, a cada geração, na população. Este indivíduo fruto da seleção e dos operadores genéticos tem sua aptidão avaliada e entra no lugar daquele de pior aptidão, se a aptidão do novo indivíduo for pior que de toda a população este é descartado e procede-se novo cruzamento.

### 3.6.5 Operadores Genéticos

Embora na biologia, a visão simplória de evolução seja um processo baseado na seleção natural e mutação aleatória, os biólogos evolucionistas sabem que tão importante quanto à mutação é a reprodução, que altera os cromossomos através da recombinação (crossover) quando da troca de parte dos cromossomos dos pais para constituírem seus filhos.

A recombinação e a mutação são dois mecanismos de busca dos AGs que levam a exploração de pontos (soluções) inteiramente novos do espaço de busca (exploration), enquanto a seleção, descrita anteriormente, dirige a busca em direção às melhores soluções deste espaço (exploitation).

A pressão da seleção, apresentada como a relação entre as aptidões máxima e média da população determina o teor de direção / exploração ( exploitation / exploration).

Se a pressão de seleção é muito baixa (a aptidão é praticamente a mesma para toda a população), o AG comporta-se aleatoriamente, pois não há seleção, assemelhando-se à busca aleatória dos métodos Gerar-e-Testar (muita exploração e pouca direção). E quando ocorre o contrário, pressão de seleção muito alta, o AG comporta-se como método de subida de encosta - hill climbing (muita direção e pouca exploração).

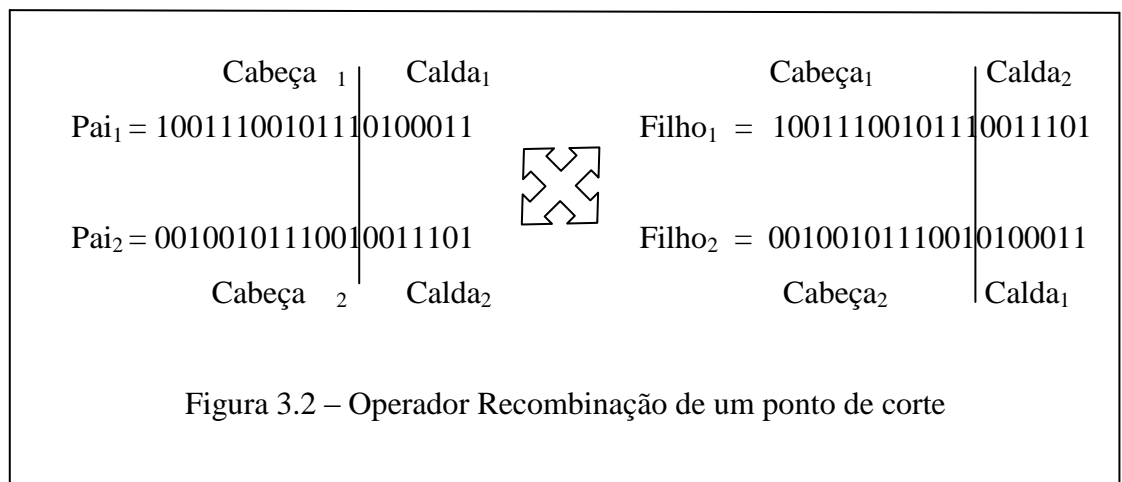
Embora sendo difícil, deve ser compromisso do AG a busca da pressão de seleção que forneça o equilíbrio ideal entre as forças de direção e exploração.

### • Recombinação (Crossover) para Representação Binária

A recombinação é o principal mecanismo de busca do AG, combinando as boas porções dos cromossomos pais, ou bons blocos de construção, podendo gerar cromossomos filhos mais aptos que os pais.

Dentre as correntes da computação evolutiva, o AG é o conceito que focaliza o fenômeno da propagação de características genéticas repassadas de uma geração a outra. Por este motivo, vários pesquisadores desta técnica, acreditam que, se o operador recombinação for extraído do algoritmo o resultado não mais será de um AG. Sendo a utilização deste operador o que distingue o AG de todos os outros algoritmos de otimização.

No caso da representação binária, o operador recombinação é aplicado a um par de cromossomos da população intermediária, gerando dois cromossomos filhos. Cada cromossomo pai tem sua cadeia de bits cortada em uma posição (locus) aleatória, produzindo duas cabeças e duas caldas. As caldas são trocadas, gerando dois novos cromossomos. A figura 3.2 ilustra o procedimento realizado pelo operador recombinação



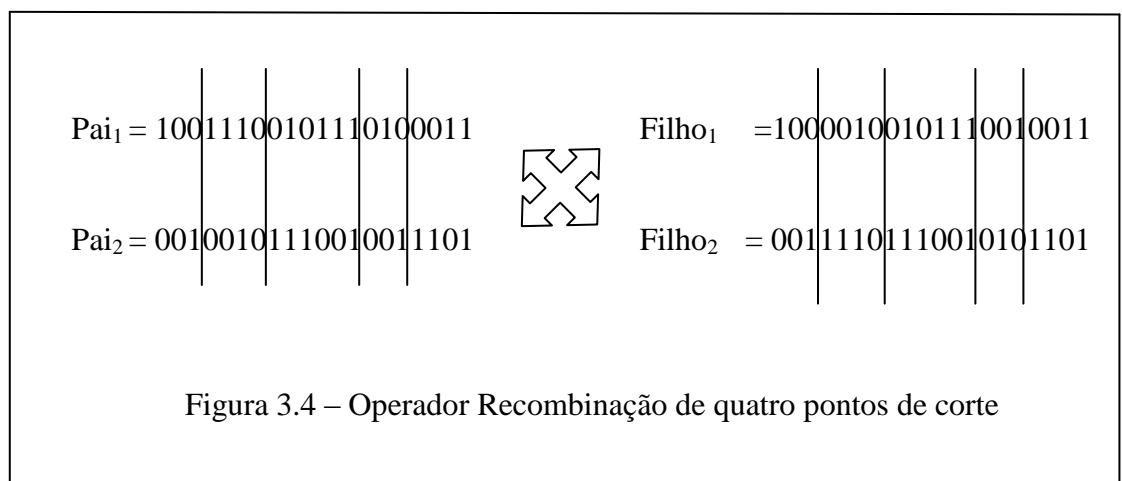
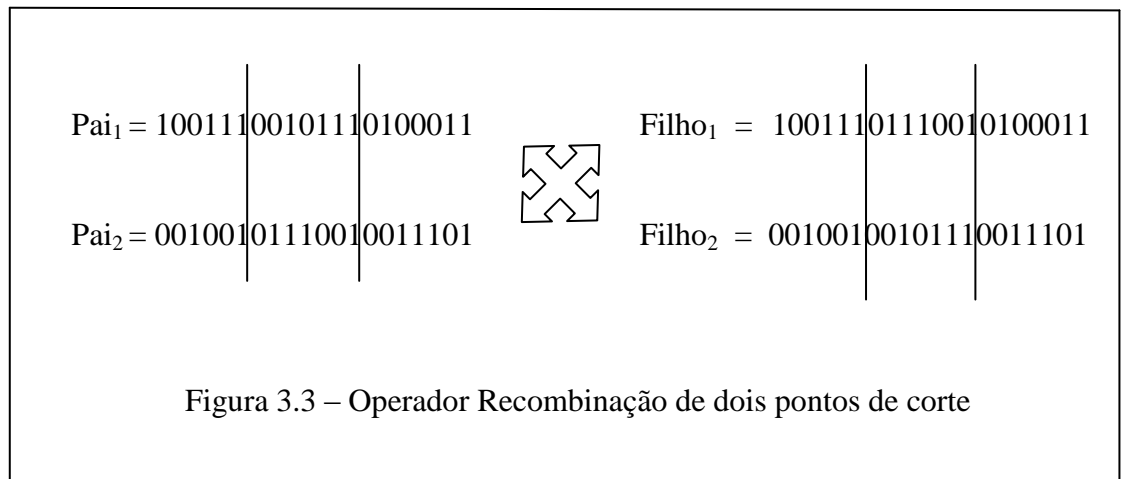
A recombinação é aplicada com uma dada probabilidade a cada par de cromossomos selecionados. Na prática esta probabilidade, denominada de taxa de recombinação varia entre 60% e 90%, implementando-se tal procedimento através da geração de números pseudo aleatórios no intervalo [0,1], e aplicando-se a recombinação se o número



gerado for menor que a taxa de recombinação. Caso contrário os filhos serão iguais aos pais, permitindo que algumas soluções sejam preservadas.

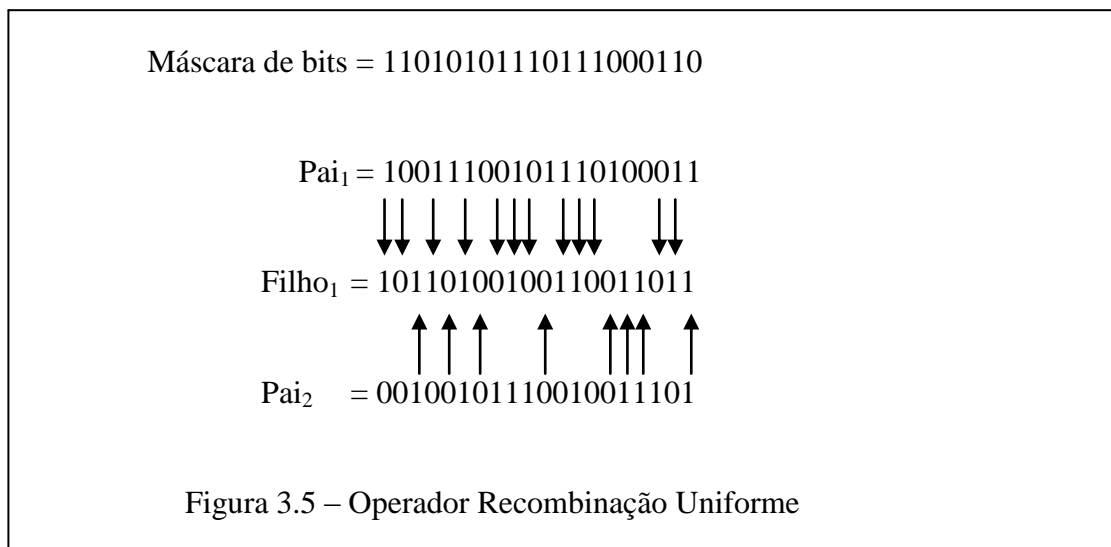
Existem variações do operador recombinação quanto ao número de pontos de corte, sendo os mais conhecidos o *de N pontos* e *Uniforme*.

Analogamente ao operador de recombinação de um ponto de corte, o de 2 (dois) pontos de corte tem suas posições escolhidas aleatoriamente, e as seções entre os dois pontos são trocadas entre os pais, conforme apresentado na figura 3.3. Um exemplo de recombinação de quatro pontos é mostrado na figura 3.4.



Na recombinação tipo uniforme, para cada par de pais é gerada uma máscara de bits aleatórios. Se o primeiro bit da máscara possui o valor 1 (um), então o primeiro bit do pai<sub>1</sub> é copiado para o primeiro bit do filho<sub>1</sub>. Caso contrário, o primeiro bit do pai<sub>2</sub> é copiado para o primeiro bit do filho<sub>1</sub>. O processo se repete para os bits restantes do filho<sub>1</sub>.

Na geração do filho<sub>2</sub>, o procedimento é invertido, ou seja, se o bit da máscara é 1, então será copiado o bit do pai<sub>2</sub>. Se o bit for igual a 0, então será copiado o bit do pai<sub>1</sub>. Vale a pena notar que a recombinação uniforme não é mesma coisa que a recombinação de (L-1) pontos (onde L é o número de bits do cromossomo), uma vez que esta sempre leva a metade dos bits de cada pai. A figura 3.5 apresenta a recombinação uniforme.



Elshelman et al. (1989), apud Beasley (1993) investigaram a diferença de desempenhos entre as várias recombinações de N pontos e uniforme para representação binária e concluíram que não há grandes diferenças de desempenho entre eles.

Grefenstette (1986) revelou ser o AG robusto de tal modo que, dentro de uma faixa relativamente larga de variação de parâmetros (taxas de recombinação e mutação, tamanho da população, etc) não ocorre alteração significativa de desempenho.

### • Recombinação (Crossover) para Representação Real

No caso da representação real os cromossomos pais são representados por:

$$P_1 = (P_{11}, P_{12}, P_{13}, \dots, P_{1N}) \quad (3.2)$$

$$P_2 = (P_{21}, P_{22}, P_{23}, \dots, P_{2N}) \quad (3.3)$$

e o cromossomos filhos por:

$$F_1 = (F_{11}, F_{12}, F_{13}, \dots, F_{1N}) \quad (3.4)$$

$$F_2 = (F_{21}, F_{22}, F_{23}, \dots, F_{2N}) \quad (3.5)$$

Os operadores convencionais de N pontos e uniforme não funcionam na representação real, sendo, portanto utilizado *operadores aritméticos* que realizam algum tipo de combinação linear entre os cromossomos pais.

**Recombinação Média**, Davis (1991): dado dois cromossomos pais  $P_1$  e  $P_2$ , é produzido um cromossomo  $F$  da seguinte forma:  $F = (P_1 + P_2)/2$ .

**Recombinação Média Geométrica** onde cada gene (parâmetro do vetor cromossomo)  $F_i$  do filho  $F$  é dado por:  $F_i = \sqrt{(P_{1i}P_{2i})}$  para  $i=1,2,3,\dots,N$ .

**Recombinação BLX- $\alpha$**  (blend crossover) é a recombinação mistura, Eshelman e Shaffer (1992) apresentaram este tipo, que melhora (evitando a perda de diversidade conseqüente da tendência de centralização), a recombinação média. Sendo produzido um cromossomo filho  $F$  a partir de dois pais  $P_1$  e  $P_2$  da seguinte forma:  $F = P_1 + \beta(P_2 - P_1)$ . onde  $\beta \in U(-\alpha, 1+\alpha)$ .

**Recombinação Linear** proposta por Wright (1991), produz três cromossomos filhos  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$  a partir de dois pais  $P_1$  e  $P_2$  da seguinte maneira:

$$F_1 = 0,5 P_1 + 0,5 P_2 \quad (3.6)$$

$$F_2 = 1,5 P_1 - 0,5 P_2 \quad (3.7)$$

$$F_3 = -0,5 P_1 + 1,5 P_2 \quad (3.8)$$

**Recombinação Aritmética** proposta por Michalewicz (1992) onde dado dois cromossomos pais  $P_1$  e  $P_2$ , são produzidos dois cromossomos filhos  $F_1$  e  $F_2$  da seguinte forma:

$$F_1 = \beta P_1 + (1 - \beta) P_2 \quad (3.10)$$

$$F_2 = (1 - \beta) P_1 + \beta P_2 \quad (3.11)$$

onde  $\beta \in U(0,1)$ , diferindo do *BLX- $\alpha$* , não extrapolando o intervalo entre  $P_1$  e  $P_2$

**Recombinação Heurística** proposta também por Michalewicz (1992) realiza uma extrapolação linear entre os pais  $P_1$  e  $P_2$ , usando a informação da aptidão e produzindo um cromossomo filho  $F$  da seguinte forma:

$$F = P_1 + r(P_2 - P_1), \quad (3.12)$$

onde  $f(P_1) > f(P_2)$  e  $r \in U(0,1)$ . Caso o filho produzido seja ineficaz, gera-se outro número aleatório  $r$ , e obtém-se novo filho. Se em  $M$  tentativas o filho continuar ineficaz, então a recombinação para sem produzir filhos.

#### • Mutação para Representação Binária

Após a aplicação do *operador recombinação*, deve-se aplicar o *operador mutação*, com dada probabilidade **em cada bit** dos dois filhos. Este operador inverte os valores de bits, ou seja muda o valor de um dado bit de 1 para 0 ou de 0 para 1.

A mutação melhora a diversidade dos cromossomos na população, mas por outro lado, destrói informação contida no cromossomo, devendo ser a taxa de mutação atribuída pequena (normalmente entre 0,1% a 5%), mas o suficiente para garantir a diversidade.

A implementação do procedimento pode ser através da geração de número pseudo aleatório no intervalo  $[0,1]$ , para cada bit do cromossomo filho, aplicando-se a mutação ao bit em questão, se o número gerado for menor que a taxa de mutação. Caso contrário o bit em análise se mantém.

A figura 3.6 apresenta exemplo em que aleatoriamente um bit do filho 1 e dois bits do filho 2 sofrem mutação.

Antes	Filho <sub>1</sub> = 10011101110010100011
	Filho <sub>2</sub> = 00100100101110011101
Depois	Filho <sub>1</sub> = 100111011100101 <b>1</b> 0011
	Filho <sub>2</sub> = 001 <b>1</b> 0100101110 <b>1</b> 11101
Figura 3.6 – Mutação para Representação Binária.	

#### • Mutação para Representação Real

##### *Mutação Uniforme*

No caso da representação real o cromossomo filho, que já passou pelo operador recombinação, e aqui representado por:  $F = (F_1, F_2, F_3, \dots, F_j, \dots, F_{N-2}, F_{N-1}, F_N)$ , tendo seu  $j$ -ésimo gene selecionado para mutação, produz um cromossomo  $F'$  da seguinte forma:

$$F'_i = \begin{cases} U(a_i, b_i), & \text{se } i = j \\ F_i & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (3.13)$$

onde  $a_i$  e  $b_i$ , representam os limites do intervalo permitido para o gene  $F'_i$

### ***Mutação Gaussiana***

Este tipo de mutação processa a substituição de um gene por um número aleatório de uma distribuição normal. Ou seja, tomando-se como exemplo um cromossomo  $F = (F_1, F_2, F_3, \dots, F_j, \dots, F_{N-2}, F_{N-1}, F_N)$ , tendo seu  $j$ -ésimo gene selecionado para mutação, é produzido um cromossomo  $F'$  da seguinte forma:

$$F'_i = \begin{cases} N(\mu_i, \sigma), & \text{se } i = j \\ F_i & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (3.14)$$

onde  $N(\mu_i, \sigma)$ , é uma distribuição normal com média  $\mu_i$ , e desvio padrão  $\sigma$ , podendo-se alternativamente diminuir o valor de  $\sigma$ , à medida que aumenta-se o número de gerações.

### ***Mutação Creep***

*Creep* significa deslizante no sentido de que uma pequena perturbação no cromossomo, próximo ao ponto máximo, move-o rapidamente ao topo.

Com este objetivo este operador adiciona ao gene selecionado para mutação um pequeno número aleatório obtido de uma distribuição normal (média zero e desvio padrão pequeno) ou alternativamente multiplicando o gene por um número aleatório próximo de um.

### ***Mutação Limite***

Michalewicz (1992) apresentou este tipo de operador mutação onde um gene é substituído por um dos limites do intervalo permitido  $[a_i, b_i]$ . Ou seja, dado um cromossomo  $F = (F_1, F_2, F_3, \dots, F_j, \dots, F_{N-2}, F_{N-1}, F_N)$ , tendo seu  $j$ -ésimo gene selecionado para mutação, é produzido um cromossomo  $F'$  da seguinte forma:

$$F'_i = \begin{cases} a_i, & \text{se } r < 0,5 \text{ e se } i = j \\ b_i, & \text{se } r \geq 0,5 \text{ e se } i = j \\ F_i & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (3.15)$$

Onde  $r \in U(0,1)$  , levando os genes para os limites dos intervalos permitidos  $[a_i , b_i ]$  , evitando a perda de diversidade gerada pela recombinação aritmética, que já observado tem a tendência a trazer os genes para o centro dos intervalos permitidos.

### ***Mutação Não-Uniforme***

Também proposto por Michalewicz (1992), este processo simplesmente substitui um gene por um número extraído de uma distribuição não-uniforme. Ou seja, dado um cromossomo  $F = (F_1, F_2, F_3, \dots, F_j, \dots, F_{N-2}, F_{N-1}, F_N)$ , tendo seu  $j$ -ésimo gene selecionado para mutação, é produzido um cromossomo  $F'$  da seguinte forma:

$$F'_i = \begin{cases} F_i + (b_i - F_i)f(G) & \text{se } r_1 < 0,5 \text{ e } i = j \\ F_i - (F_i - a_i)f(G) & \text{se } r_1 \geq 0,5 \text{ e } i = j \\ F_i & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (3.16)$$

$$f(G) = \left[ r_2 \left( 1 - \frac{G}{G_{Max}} \right) \right]^E \quad (3.17)$$

Onde  $r_1$  e  $r_2 \in U(0,1)$ ,  $G$  é o número da geração corrente,  $G_{max}$  é o número máximo de gerações,  $E$  é um parâmetro do sistema que determina a forma da função (o autor usou  $E=6$ ).

### **3.6.6 Configuração dos Parâmetros do AG.**

Os parâmetros são os dados de entrada necessários para que o AG obtenha o melhor desempenho na busca da solução global do problema. O termo desempenho está associado ao tempo de processamento, esforço computacional e a proximidade ou convergência da solução ao resultado ótimo do problema.

Geralmente os valores destes parâmetros são selecionados dentro de intervalos plausíveis apresentados em formulários de entrada de dados do código (programa computacional) para que sejam processados e tenham o desempenho desta configuração de

parâmetros avaliado, realizando-se uma análise de sensibilidade para calibração destes, visando o melhor desempenho.

- ***Tamanho da População de Soluções***

É certo que quanto maior o tamanho da população maior representatividade do espaço de busca não só na geração inicial, mas em todas as subseqüentes. Fato que favorece à busca do resultado ótimo global, mas requer mais tempo de processamento e conseqüente maior esforço computacional.

O tamanho da população que satisfaça o equilíbrio destas componentes de desempenho pode ser obtido através de análise de sensibilidade dos resultados, variando-se este parâmetro e mantendo-se fixos, os demais.

- ***Número de Gerações***

Novamente, outro parâmetro, que até intuitivamente, relaciona o favorecimento da localização do resultado ótimo global ao maior número de gerações processadas, mas conseqüente aumento de tempo de processamento. E que, igualmente ao parâmetro anterior, deve ser estabelecido através de análise de sensibilidade.

- ***Taxa ou Probabilidade de Recombinação***

Foi dito anteriormente que a recombinação é o principal mecanismo de busca do AG, pelo que deveria se concluir que, maior taxa de recombinação favorece a localização do ótimo global.

Esta afirmação é verdadeira para problemas que obedecem a *Hipótese dos Blocos de Construção*, Goldberg (1989), que estabelece que pequenos esquemas (cadeia de bits) em bons cromossomos (i.e. com aptidão acima da média) aumentam exponencialmente nas gerações seguintes, ao passo que esquemas contidos em cromossomos ruins (i.e. com aptidão abaixo da média) tendem a desaparecer nas gerações seguintes. E que as informações contidas



em um bloco de construção combinadas às informações de outros blocos, no decorrer das gerações produziram cromossomos de alta aptidão.

Cada problema ou função objetivo abordada irá obedecer, em diferentes níveis, a esta hipótese. Por exemplo, pode ocorrer que, combinando dois ótimos blocos de construção, resulte em um cromossomo ruim, sendo tal problema denominado de *AG-deceptivo*. Tal fenômeno está relacionado à alta *epistasia* (modalidade de interação gênica na qual genes de um cromossomo inibem a manifestação de outros).

Funções com esta propriedade tendem a ter um ponto ótimo isolado cercado por pontos extremamente ruins. Felizmente, tais funções são raras na prática, sendo de difícil solução para qualquer técnica de otimização.

Em função do exposto, diferentes taxas de recombinação serão mais adequadas a diferentes tipos de funções com diferentes graus de epistasia, necessitando-se para o problema em questão selecionar, novamente através de análise de sensibilidade, a taxa mais adequada. Lembrando que uma taxa maior de recombinação poderá exigir um esforço computacional um pouco maior.

Bem como também diferentes tipos de recombinação se adaptarão melhor ou pior a diferentes tipos de funções com seus graus de epistasia. Syswerda (1989) apud Davis (1991), sugere para problemas de alta epistasia o crossover uniforme, argumentando que seu poder de destruição dos blocos é compensado pelo fato de ele poder combinar qualquer material dos cromossomos pais independentemente da ordem dos genes.

#### • Taxa ou Probabilidade de Mutação

A taxa de mutação, como dito anteriormente, deve ter valor pequeno que garanta a diversidade (evitando-se a convergência prematura), e a não destruição dos blocos de construção.

Como os demais parâmetros, seu valor deve ser determinado para o problema em questão, através de análise de sensibilidade.

### • *Adoção de Elitismo*

A configuração deste parâmetro consiste na adoção de um artifício de preservação dos  $N$  melhores elementos de uma geração para a consecutiva. Procedimento interessante do ponto de vista de melhorar o desempenho do AG, porém o aumento de  $N$  eleva o risco de convergência prematura.

### • *Critério de Parada*

Estes parâmetros estabelecem os critérios de parada do processamento do AG, sendo os mais conhecidos:

- Quando atingir o número de gerações pré-determinado (parâmetro).
- Quando atingir um determinado tempo de processamento.
- Quando encontrada solução ótima (possível mediante conhecimento prévio).
- Quando a melhor solução se repete por determinado número de gerações.
- Quando um percentual determinado da população convergiu para um mesmo valor.

A convergência prematura pode ocorrer quando surgem cromossomos de alta aptidão (superindivíduos mas não com aptidão ótima), que dominam a população, espalhando seus genes por toda a população, enquanto outros genes desaparecem (genetic drift), convergindo para um ótimo local.

O combate a convergência prematura pode ser realizado com os seguintes procedimentos:

- Limitar o número de filhos por cromossomo através do escalonamento da aptidão, e do ordenamento.
- Manter a diversidade dos cromossomos na população, aumentando a taxa de mutação, e/ ou evitando a inserção de filhos duplicados na população.

### 3.7 USO DE AGs EM OTIMIZAÇÃO DE REDES DE ÁGUA

Simpson et al. (1994) apresentaram uma otimização de rede de tubos usando três operadores genéticos “reprodução, cruzamento, e mutação”. Os resultados foram comparados com as técnicas de enumeração completa e programação não linear, achando o ótimo global em relativamente poucas iterações comparadas ao tamanho do espaço de pesquisa.

Savic e Walters (1997) desenvolveram um modelo computacional GANET baseado em algoritmo genético (AG) para solução do problema de dimensionamento de mínimo custo de redes de distribuição d’água. O AG representou um método eficiente de pesquisa para o problema de otimização não linear, compartilhando os atributos favoráveis do procedimento de Monte Carlo sobre os métodos de otimização local, não requerendo as supostas linearizações, nem o cálculo de derivadas parciais, evitando instabilidades numéricas com as inversões de matrizes. E mais, sua abordagem global em vez de local, reduz a tendência de se tornar preso num mínimo local evitando a dependência de um ponto de partida.

Para ilustrar a capacidade do GANET, os autores resolveram três problemas publicados anteriormente, levando à descoberta de inconsistências em previsões de desempenhos de redes causados por diferentes interpretações da amplamente adotada equação de Hazen-Williams em estudos passados. Um exemplo de dimensionamento de rede e um de expansão de rede paralela ilustraram o potencial do GANET como ferramenta ao planejamento e gerenciamento de redes de distribuição d’água.

Também em 1997, Savic et al. trataram da importância da reabilitação, substituição e expansão das redes de distribuição de água sobre o problema de escolher a melhor configuração de melhoramentos possível limitada a um orçamento. Uma abordagem multiobjetiva é descrita usando o custo de capital e benefícios como objetivos duais, permitindo que um intervalo de soluções não inferiores de custos variados sejam derivados.

Um algoritmo genético desordenado estruturalmente foi desenvolvido incorporando seqüências de bits que aumentam em comprimento durante a evolução dos dimensionamentos, mostrando-se uma ferramenta efetiva ao problema de otimização

acometido, sendo particularmente adequado à abordagem multiobjetiva e aos problemas que envolvem a seleção de pequenas configurações de variáveis de grande número de possibilidades.

Os autores incluíram dois exemplos que ilustram as características do método e mostram que o algoritmo tem melhor desempenho do que o AG padrão para uma grande rede de distribuição d'água.

Kumar et al. (2000) propuseram um novo método de dimensionamento de mínimo custo para redes malhadas de tubos sobre vários níveis de redundância, que foram obtidos considerando o número de tubulações retiradas do serviço por vez. Os autores obtiveram como resultado uma curva de substituições da redundância e custos, considerando diferentes medidas de redundância.

Dandy e Engelhardt (2001) demonstraram o uso de algoritmo genético para encontrar um planejamento próximo ao ótimo para a substituição das tubulações de abastecimento d'água, objetivando a minimização do valor presente do capital, dos custos de reparos e dos prejuízos. O caso estudado pelos autores em Adelaide (Austrália) mostrou que o algoritmo genético pode ser uma poderosa ferramenta para auxiliar no planejamento da reabilitação das tubulações de água.

Prasad e Park (2004) apresentaram um algoritmo genético com abordagem multiobjetivo para dimensionamento de redes de distribuição d'água, objetivando a minimização do custo da rede e a maximização da medida de confiabilidade chamada resistência da rede, simulando os desejos do projetista de prover uma carga hidráulica acima da mínima admitida nos nós e o dimensionamento confiável da malha com diâmetros praticáveis. O método proposto produziu uma configuração de soluções pareto-ótimas no espaço de pesquisa de custos e resistência da rede.

Os autores observaram ser o algoritmo genético pobre no manuseio de restrições, e sobrepuseram uma técnica mais adequada que não requereu um coeficiente de penalidade e foi aplicável ao sistema de distribuição apresentado obtendo resultados melhores que outros métodos comparados.

Zyl et al. (2004) propuseram uma otimização operacional de sistemas de distribuição usando um algoritmo genético híbrido que combinou a técnica do AG com a estratégia de pesquisa por subida de encosta complementando eficientemente o processo de procura do ótimo global. Os autores investigaram dois métodos de subida de encosta, o Finobacci e o Hook e Jeeves e constataram a superioridade do método híbrido sobre o AG puro, em encontrar uma boa solução rapidamente.

Savic et al. (2000) apresentaram uma nova metodologia para dimensionamento ótimo de expansão, reabilitação, reforço ou re-zoneamento de sistemas de distribuição d'água utilizando AG incluindo como variáveis de dimensionamento a localização dos tubos e seus diâmetros, estado das válvulas, bombas e reservatórios considerando ambos o dimensionamento e a operação da rede.

Podendo prever a necessidade de um novo reservatório ou expansão de um existente incluindo a armazenagem do reservatório de serviço na otimização que requereu simulação de enchimento e esvaziamento do mesmo através do ciclo diário de consumo. Uma economia substancial em comparação as soluções produzidas manualmente foi demonstrada pelos autores que justificaram o uso de algoritmo genético para estes tipo de problema e alertam que muitos outros esquemas e sistemas dimensionados e operados manualmente podem estar custando mais do que o necessário.

Wu et al. (2001) desenvolveram um sistema de suporte a decisão para uso efetivo no gerenciamento de sistemas de distribuição de água. O programa desenvolvido integra um sistema de informação geográfica para o gerenciamento e análise de uma base de dados espacial com a teoria da otimização construído numa interface AutoCad para prover uma ferramenta computacional de ajuda e suporte a decisão para engenheiros hidráulicos.

Seu modelo de otimização usa uma eficiente variação de algoritmo genético para resolver o modelo de calibração da rede, dimensionamento amostral de campo, esquemas de bombeamento, dimensionamento de rede e problemas de reabilitação de maneira ótima.

Gibbs et al. (2005) descreveram análises de sensibilidade em grande escala que foram usadas para calibrar um código real de AG com operador de recombinação distribuída

para um problema de otimização de sistema de distribuição de água, no final apontou para a identificação de uma nova solução ótima.

Através destas análises, grupos de valores parâmetros que fazem o desempenho do algoritmo melhorar em termos de convergência e qualidade final das soluções, foram identificados. Seus resultados demonstraram que entendendo os parâmetros de controle do AG e as relações entre eles, o esforço requerido para calibrar um AG a uma determinada aplicação pode ser reduzido significativamente.

Vairavamoorthy e Ali (2005) propuseram uma metodologia para o dimensionamento ótimo de um sistema de distribuição baseado num AG, com objetivo de minimizar os custos de capital sujeito restrições que asseguram pressões adequadas a todos os nós durante os picos de demanda. O método proposto inova, pois envolve o uso de vetor de índice de tubos para controlar a busca da solução do AG, vetor este que é a medida da importância relativa dos tubos em uma rede em termos de seus impactos no desempenho hidráulico da rede.

Sendo possível excluir regiões do espaço de pesquisa onde soluções impraticáveis e inviáveis existem, reduzindo o espaço de pesquisa e conseqüentemente gerando soluções viáveis mais rapidamente e processando populações mais saudáveis do que o AG padrão, poupando esforço computacional. Segundo os autores o método foi testado em várias redes, incluindo redes de referência para teste de algoritmos de dimensionamento de mínimo custo, e se mostrou eficiente e robusto.

Neto (2003), aplicou a metodologia do AG para otimização de uma rede de distribuição de água previamente abordada por outros métodos numéricos, calibrando e discutindo os parâmetros envolvidos e comparando os resultados obtidos. Apesar de não se obter soluções com menores custos, o AG mostrou-se satisfatório convergindo rapidamente para uma solução subótima, analisando uma fração mínima do espaço de busca, apresentando uma pobre capacidade de refino na melhoria da solução.

---

## ESTUDO DE CASO

---

### 4.1 REDE EXEMPLO

O dimensionamento de um sistema de distribuição d'água em anéis, representado na figura 4.1, apresenta certo grau de complexidade, envolvendo sistema de tubulações em série e em paralelo caracterizando-o como *problema de cálculo de rede malhada*, assim enunciado por Azevedo Neto (1998):

“Conhecidos os comprimentos e as vazões dos diversos trechos da rede, assim como as pressões nas extremidades das canalizações distribuidoras, determinar os diâmetros necessários para os diversos trechos e as pressões em todos os nós do sistema”

Esse é um problema hidraulicamente indeterminado, admitindo varias soluções, cujos métodos clássicos de dimensionamento, como o de Hardy-Cross, encontram uma solução possível (através do ajustando das vazões), mas não garantindo que esta seja a melhor solução do ponto de vista da economia ou da eficiência.

Cirilo (1997) propôs utilizar método de otimização para simultaneamente buscar os diâmetros ótimos e balancear as vazões. Considerou como variáveis de decisão os diâmetros e as vazões de cada conduto da rede representada na figura 4.1.

Este método considera as equações de balanceamento de conservação de massa em cada nó, e de conservação de energia em cada anel como as equações de *restrições do problema*, e acrescenta outras restrições como diâmetros máximo e mínimo e perda de carga unitária limite nos condutos da rede.

Para concepção da função objetivo partiu-se da formulação da perda de carga, após uma série de experiências com formulas diversas.

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (4.1)$$

$$v = \frac{4Q}{\pi \cdot D^2} \quad (4.2)$$

$$hp = f \cdot \frac{L}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{4}{\pi}\right)^2 \frac{Q^2}{D^5} \quad (4.3)$$

$$hp = K \cdot \frac{Q^2}{D^5} \quad (4.4)$$

Onde hf: perda de carga nos condutos [L]

$f$ : parâmetro de atrito

$L$ : comprimento do conduto [L]

$D$ : diâmetro [L]

$v$ : velocidade [ $LT^{-1}$ ]

$Q$ : vazão [ $L^3T^{-1}$ ]

$g$ : aceleração da gravidade [ $LT^{-2}$ ]

$$K = f \cdot \frac{L}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{4}{\pi}\right)^2 [T^2]$$

A função objetivo selecionada foi:

$$\text{Minimizar } F = \sum_{i=1}^{NC} \frac{D_i^5}{Q_i^2} \quad (4.5)$$

Onde  $NC$ : número de condutos

Minimizar a função objetivo  $F$  implica na busca dos diâmetros mínimos e máximas vazões, dentro dos limites estabelecidos pelas restrições, significando na maximização da eficiência da seção dos condutos, e implicitamente minimização do custo (implantação) da rede.



Analisando a fórmula (4.5) sobre o ponto de vista de minimização do custo de implantação da rede, onde os condutos possuem diferentes comprimentos e que estes são multiplicados pelo custo unitário de implantação da respectiva bitola, observa-se que:

$$\text{- Minimizar } F = \sum_{i=1}^{NC} \frac{D_i^5}{Q_i^2} \text{ implicaria em tornar mínimo o custo de implantação}$$

desde que todos os condutos apresentassem o mesmo comprimento, e ainda desprezando a variação do fator de atrito  $f$  que é muito pequena.

No exemplo analisado, os trinta e dois condutos (NC=32) estabelecem 64 variáveis de decisão (D e Q para cada conduto). A conservação de massa nos vinte e três nós (NN=23) fornecem 23 equações lineares e a conservação de energia nos dez anéis (NA=10) provêm 10 equações não lineares, que entram como restrições.

Outras 64 restrições são necessárias para igualar os dois membros da fórmula de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left[ \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Rey \cdot \sqrt{f}} \right]$$

Onde  $\varepsilon$  : rugosidade absoluta dos condutos [L]

$Rey$  : número de Reynolds =  $\frac{v \cdot D}{\vartheta}$

$\vartheta$  : viscosidade cinemática [ $L^2 T^{-1}$ ]

E por fim, impõe-se a não negatividade das variáveis de decisão e o limite máximo da perda de carga unitária (8m/Km), valor este recomendado pelo autor para diâmetros inferiores a 400 mm.

Admitiu-se a rugosidade absoluta 0,5mm ( $\varepsilon = 0,5\text{mm}$ ) correspondendo ao material ferro fundido para todas as tubulações e a viscosidade cinemática da água equivalente à temperatura de 20° C ( $1,007 \times 10^{-6}$ )  $m^2/s$

A otimização da rede foi realizada com auxílio do software ADS (Automated Design Synthesis) composto de sete sub-rotinas na linguagem FORTRAN, desenvolvido na Universidade da Califórnia em Santa Bárbara em 1986.

Para chegar à solução, o programa realizou pouco mais de três mil iterações. O otimizador utilizado foi o *Método Modificado das Direções Viáveis* da Programação Não Linear (PNL) para minimização com restrições.

Os valores estimados inicialmente das variáveis de decisão e a solução (valores calculados) são apresentados na tabela 4.1. Os diâmetros foram considerados múltiplos de polegada, sendo alguns dos valores obtidos não disponibilizado comercialmente.

Devido à dificuldade de convergência da PNL, em problemas complexos, quando há variáveis inteiras, os diâmetros foram calculados como contínuos e depois ajustados para a dimensão comercial mais próxima.

Foi considerado que toda a rede (condutos e nós) está na mesma cota altimétrica ( $Z=0,00\text{m}$ ).

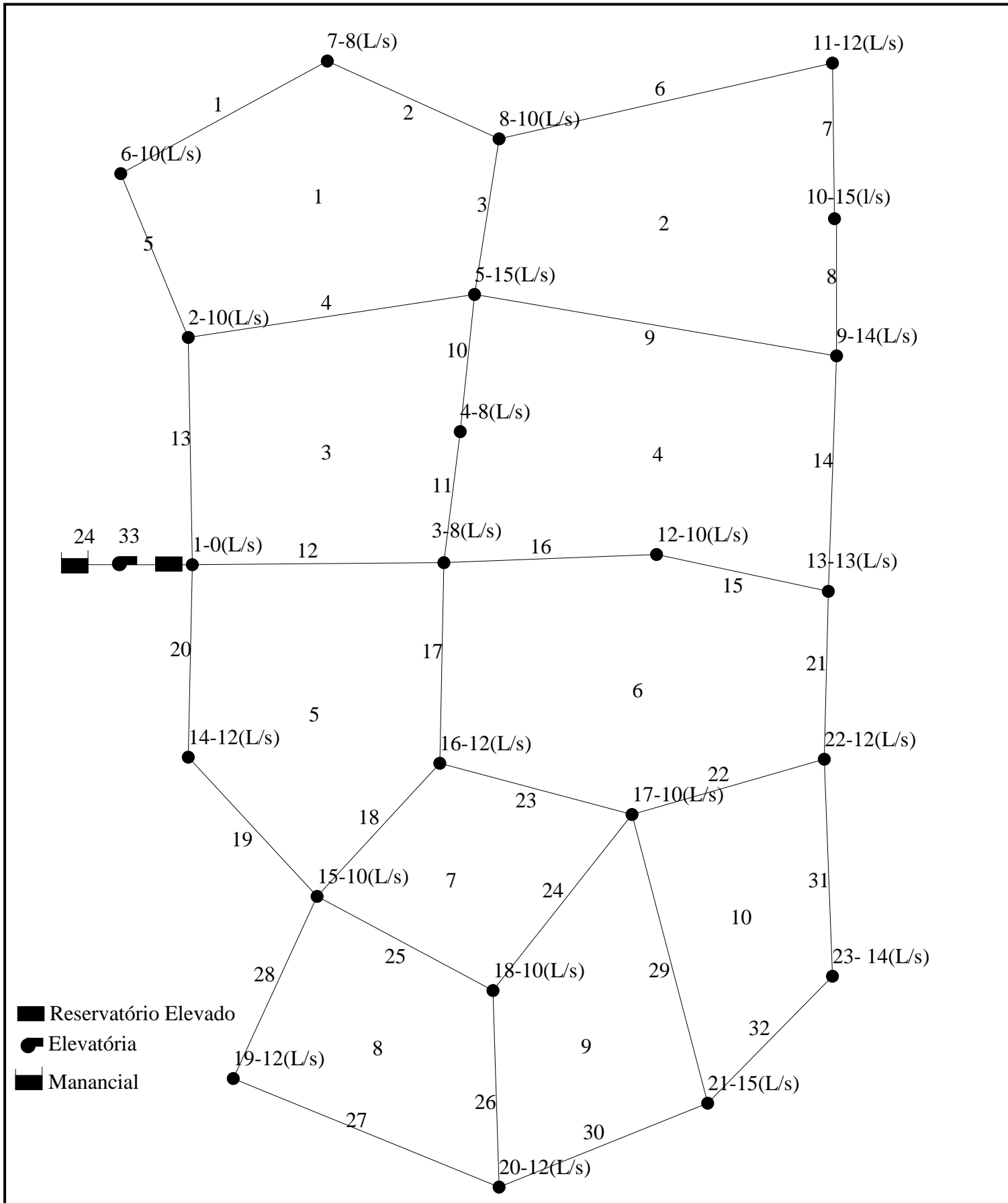


Figura 4.1 –Rede de distribuição d'água utilizada como exemplo

DADOS DA TUBULAÇÃO							
Conduto	Dados de Entrada ou Estimados Inicialmente				Dados Calculados		
	Comprimento	Rugosidade	Diâmetro Estimado	Vazão Estimada	Diâmetro Calculado	Vazão Calculado	Perda de Carga Unit.
	(m)	(mm)	(mm)	(L/s)	(mm)	(L/s)	(m/Km)
Tubo 01	250	.5	250	30	200	21,22	3,61
Tubo 02	100	.5	250	22	150	13,22	6,44
Tubo 03	210	.5	125	6	100	4,05	5,28
Tubo 04	300	.5	250	40	275	48,99	3,55
Tubo 05	150	.5	250	40	225	31,22	4,17
Tubo 06	350	.5	150	8	125	7,27	5,17
Tubo 07	180	.5	100	4	100	4,73	7,18
Tubo 08	190	.5	200	19	175	19,73	6,31
Tubo 09	150	.5	300	45	275	43,69	2,83
Tubo 10	110	.5	200	16	175	13,75	3,09
Tubo 11	110	.5	250	24	225	21,75	2,04
Tubo 12	200	.5	300	80	300	81,83	6,22
Tubo 13	150	.5	350	90	325	90,21	4,96
Tubo 14	180	.5	200	12	175	9,96	1,64
Tubo 15	100	.5	200	14	150	14,71	7,96
Tubo 16	100	.5	250	24	200	24,71	4,88
Tubo 17	110	.5	250	24	200	27,37	5,98
Tubo 18	180	.5	250	30	250	28,31	1,98
Tubo 19	140	.5	300	70	275	67,96	6,79
Tubo 20	100	.5	350	82	300	79,96	5,94
Tubo 21	180	.5	150	13	150	11,67	5,03
Tubo 22	200	.5	100	6	125	7,69	5,78
Tubo 23	210	.5	300	42	300	43,68	1,79
Tubo 24	210	.5	150	10	150	6,95	1,81
Tubo 25	150	.5	150	10	125	8,66	7,30
Tubo 26	140	.5	150	10	125	5,61	3,10
Tubo 27	250	.5	100	8	150	8,99	3,01
Tubo 28	220	.5	200	20	200	20,99	3,53
Tubo 29	230	.5	200	16	175	19,03	5,88
Tubo 30	250	.5	125	6	100	2,60	2,22
Tubo 31	200	.5	125	7	125	7,36	5,30
Tubo 32	200	.5	125	7	125	6,64	4,32
Bomba 33	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

Tabela 4.1 – Resultados obtidos através da PNL Cirilo (1997)

## **4.2 ANALOGIA PNL & AG DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO DA REDE (ENFOQUE EFICIÊNCIA DA SEÇÃO)**

O presente trabalho se propõe a otimizar o dimensionamento da mesma rede exemplo, utilizando os mesmos parâmetros e restrições hidráulicas e a mesma função objetivo, através da metodologia do Algoritmo Genético – AG.

A otimização do dimensionamento da rede exemplo através da Programação Não Linear – PNL realizou o cálculo dos diâmetros (1ª variável de decisão) e o balanceamento das vazões (2ª variável de decisão), atendendo as restrições que se compunham das equações de conservação de massa nos nós, e de energia nos anéis.

A otimização da rede através do AG, utiliza o simulador hidráulico EPANET para balancear as vazões, calculadas a partir dos diâmetros (única variável de decisão).

Os diâmetros no problema AG serão considerados discretos e múltiplos de polegada, (variando de 2 pol.-50mm até 14 pol.-350mm), não havendo necessidade de serem tratados como contínuos e depois ajustados às dimensões comerciais ou pré-estabelecidas.

Foi inserida restrição hidráulica quanto às pressões (máxima e mínima) dos nós no problema AG, não contemplada no procedimento PNL. A inclusão desta restrição não modifica nem o procedimento de cálculo nem o resultado da função objetivo, servindo apenas para atribuir ao nó mais desfavorável a carga hidráulica mínima exigida, calculando-se as pressões dos demais nós através das mesmas equações de perda de carga.

O objetivo desta inclusão foi possibilitar o cálculo da cota piezométrica de alimentação necessária para um reservatório elevado ou para uma estação elevatória que atenda as pressões solicitadas da rede.

O cálculo da cota piezométrica de alimentação abre a possibilidade de analisar os custos de operação (bombeamento) conjuntamente com os de implantação (rede) através de uma nova função objetivo que contemplará a relação antagônica destes dois custos.

### 4.3 IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO ENFOCANDO CUSTO

É evidente que o custo de *implantação* de uma rede de distribuição pressurizada de água é função dos diâmetros e pressões nominais das tubulações, que são determinados em função dos requerimentos hidráulicos (vazões e pressões solicitadas nos pontos de consumo – *nós*) e das características topológicas (traçado da rede e altimetria dos nós) do sistema de abastecimento.

Definida as condições de projeto (demandas e traçado da rede), os custos de *implantação* e de *operação* do sistema de abastecimento dependem fundamentalmente, da cota piezométrica do ponto de alimentação da rede, seja ela abastecida por um reservatório elevado ou por um bombeamento direto.

Mantidas as classes dos tubos (espessura da parede da tubulação adequada a intervalos de valores de pressão), verifica-se que quanto maior a cota piezométrica de alimentação menor será o custo de *implantação* da rede (tubulação com menor diâmetro), devido à existência de carga suficiente para superar as perdas de carga provocadas nos tubos.

Contrapondo a esta relação, o custo de *operação* do sistema de bombeamento aumenta com a cota piezométrica de alimentação (nível do reservatório elevado), pois os custos de energia de bombeamento crescem diretamente com altura manométrica (diferença de nível de bombeamento + perdas de carga).

Portanto o dimensionamento ótimo da rede de distribuição será aquele cujo custo de *implantação* e *operação* do sistema de abastecimento (rede + estação de bombeamento), seja mínimo.

Gomes (2004) propôs um método de dimensionamento (PNL 2000), que tem como objetivo a obtenção da solução de custo mínimo de *implantação* e *operação*, baseado em técnicas de otimização econômica através da Programação Não Linear – PNL, podendo ser aplicado em redes malhadas ou ramificadas.

A metodologia do PNL 2000 se divide em duas etapas. Na primeira, faz-se um pré-dimensionamento do sistema, no qual os diâmetros, as vazões e a altura manométrica de alimentação são as variáveis de decisão a serem determinadas.

Em seguida, com os resultados obtidos no pré-dimensionamento, executa-se uma segunda etapa, ajustando os valores dos diâmetros encontrados na primeira etapa (valores contínuos), para os diâmetros nominais ou comerciais mais próximos.

Com a substituição dos diâmetros dos trechos a rede ficará desequilibrada hidráulicamente, não atendendo restrições de conservação de energia nos anéis e de massa nos nós. Processa-se novamente o modelo da PNL, agora não considerando os diâmetros como variáveis de decisão e sim como dados.

Este novo processamento do modelo não buscará a minimização do custo *implantação* e de *operação* e sim o balanceamento das vazões realizando o equilíbrio hidráulico da solução recém ajustada.

Pode ocorrer que este equilíbrio hidráulico não seja alcançado com os diâmetros ajustados, devido à falta de flexibilidade de adequação das restrições de conservação de energia nos anéis com diâmetros fixos. Necessitando-se, neste caso, de um novo ajuste aos diâmetros, que deve ser realizado detectando-se as restrições não atendidas e reajustando os diâmetros correspondentes.

Desta feita, o presente trabalho se propõe a otimizar o dimensionamento da rede exemplo (figura 4.1), utilizando os mesmos parâmetros e restrições hidráulicas usados por Cirilo (1997), porém substituindo a função objetivo, agora, enfocando o custo de implantação e operação, através da metodologia do Algoritmo Genético – AG.

Para tanto, tomar-se-á emprestado a função objetivo proposta por Gomes (2004) e conseqüentemente toda sua metodologia de cálculo das equações de custos, que serão detalhadas no próximo capítulo.

Não sendo possível comparar os resultados de Gomes (2004) com os deste trabalho (redes diferentes), analisar-se-ão as soluções (diâmetros) ótimas encontradas com a

função objetivo de custo com os resultados (diâmetros) ótimos obtidos com a função objetivo de eficiência de seção.



---

**MODELO COMPUTACIONAL**

---

**5.1 GENERALIDADES**

Na resolução de problemas de engenharia como o dimensionamento ótimo de um sistema de abastecimento de água, procura-se representar o sistema real de maneira mais fidedigna possível, para que se possa reproduzir o comportamento do mesmo.

Os recursos computacionais atualmente disponíveis mostram que as simplificações, que há algumas décadas eram necessárias para resolução de problemas de engenharia em geral, vem se tornando cada vez mais dispensáveis.

Técnicas de otimização têm seu uso corriqueiro no dimensionamento de sistemas de abastecimento de água, objetivando menores custos. Algumas destas técnicas esbarram na dificuldade de interface com modelos de simulação hidráulica, necessitando realizar o equilíbrio hidráulico (balanceamento das vazões) através do atendimento de restrições de equações de conservação de energia nos anéis e conservação de massa nos nós.

Este artifício, utilizados nos dois exemplos analisados no capítulo anterior, geralmente conduz a instabilidades de convergência a uma solução ótima, além de necessitar de ajustes nas variáveis de decisão (diâmetros) tratados como contínuos e na prática possuindo valores discretos.

Daí, a importância da interface entre o modelo de otimização e o modelo de simulação, que deve ser cuidadosamente elaborada no sentido de dar transparência ao processo, objetivando a praticidade no uso, a maior abrangência de casos, sendo o mais genérico possível.

Atualmente, os modelos baseados em processo estocástico tais como AGs, vêm sendo empregados com sucesso, devido à facilidade de interface com simuladores hidráulicos. Encarregando-se simplesmente do processo de pesquisa operacional e deixando que o simulador hidráulico (historicamente confiável) realize a tarefa de equilibrar hidraulicamente a rede.

## **5.2 MODELO SIMULADOR – EPANET**

A importância do emprego de um modelo de simulação na fase de planejamento é inquestionável, possibilitando ao projetista antever as inúmeras situações operacionais do sistema e assim optar por alternativas de projeto que possam melhorar a qualidade do serviço, associada à minimização dos custos de energia.

Não se constitui objeto deste trabalho analisar o tratamento físico matemático que os modelos de simulação dão a sistemas de distribuição de água. Ao leitor que desejar aprofundar-se neste tema é recomendada consulta à bibliografia especializada, dentre elas Fuertes et al, (2002); Walski et al (2003).

Os modelos de simulação de redes de distribuição de água basicamente realizam o equacionamento das vazões nos condutos e das cargas hidráulicas nos nós, podendo ser aplicados em estudos de dimensionamento isoladamente, onde a solução é obtida por análises sucessivas (variando-se parâmetros), ou através de interface com modelos de otimização, obtendo-se a solução automaticamente.

A simulação hidráulica avalia as respostas do sistema em termos de suas variáveis: pressões e vazões requeridas nos nós e níveis de reservação, face às diversas conjunturas operacionais. Para tanto, assume característica fundamental a variável tempo, que define a configuração do sistema de forma estática ou dinâmica.

A configuração estática (regime permanente) dos modelos objetiva a determinação das variáveis do sistema para uma determinada condição ou cenário de operação. Na configuração dinâmica há uma variação das grandezas hidráulicas (vazão nos condutos, pressão dos nós, níveis nos reservatórios e energia requerida de bombeamento) em função da variação temporal dos consumos nos nós da rede.

Dentre os modelos hidráulicos de simulação e análises já desenvolvidos, elegeu-se o EPANET para realizar as simulações em regime permanente da rede por apresentar as características desejadas já citadas no capítulo 1.

O EPANET2 (Rossman, 1999) desenvolvido pela Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*U.S. Environment Protection Agency-EPA*) é um programa de domínio público, podendo ser usado livremente por qualquer usuário.

Funciona em ambiente Microsoft Windows 95/98/NT/XP para computadores com sistemas IBM/Intel. A versão original inglesa é distribuída em um único arquivo EN2setup.exe, que contém o programa de instalação automática, podendo ser importada da pagina [www.epa.gov/ORD/NRMRL/wswrd/epanet.html](http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/wswrd/epanet.html).

O programa é distribuído sob duas formas: executável e código fonte (*Toolkit Library*). A forma executável é aplicável a estudos que envolvem apenas as simulações hidráulicas. A forma de código fonte é adaptada para realizar a interface entre modelos de calibração, de otimização etc. e o EPANET.

O EPANET, além da análise hidráulica avalia o comportamento da qualidade da água de sistemas de distribuição. O Conjunto de Ferramentas para programadores EPANET, (*EPANET Programmer's Toolkit*) é uma biblioteca de vínculo dinâmico (*dynamic link library-DLL*) de funções que permitem aos programadores adaptar o procedimento computacional EPANET a suas necessidades específicas.

As funções podem ser incorporadas a aplicações Windows 32-bit escritas em C/C++ , Delphi Pascal, Visual Basic, ou qualquer outra linguagem que possa acessar funções dentro de uma biblioteca de vínculo dinâmico do *Windows DLL*.

O presente trabalho utiliza as rotinas ou funções de processamento do EPANET, através do código fonte *Toolkit Library* acoplado ao código *Visual Basic for applications-VBA*, para a configuração estática ou de regime permanente para um cenário fixo de demandas dos nós.

A biblioteca de vínculo dinâmico *Toolkit* possibilita ainda a abertura e fechamento, a leitura e modificação de um arquivo de extensão “xxxx.INP” (*INPUT FILE*). Este arquivo padronizado para entrada de dados descreve o sistema de abastecimento com todos os seus parâmetros de projeto e operação.

Pode-se inclusive simular períodos extensivos, acessando resultados a cada passo escrevendo os resultados das simulações em arquivos relatórios (*REPORT FILE*), que são usados para registrar: as mensagens de erro (caso ocorra quando o arquivo de entrada estiver sendo processado), as mensagens de status geradas durante o cálculo, e o relatório de saída com os resultados da simulação hidráulica.

A biblioteca *Toolkit* contém um arquivo de ajuda que orienta a utilização adequada das várias funções inclusive através de exemplos.

### **5.2.1 Configuração dos Parâmetros Hidráulicos no Módulo Simulador**

Os parâmetros hidráulicos para simulação do problema de dimensionamento da rede no EPANET consistem nos dados fornecidos no arquivo de entrada (*INPUT FILE*) e nas informações configuradas no formulário de entrada.

No arquivo de entrada constam os dados necessários à simulação. Destes dados, alguns representam as características da rede tais como as informações inerentes aos nós (identificação, elevação, demandas e etc.), aos condutos (identificação, comprimento, diâmetro, rugosidade e etc.) às bombas (identificação, curvas vazão x altura manométrica), além de dados não abordados no problema como qualidade da água.

Outros dados referem-se a opções de fórmula de cálculo (Hazen-Williams ou Darcy-Weisbach) ou de unidades.

As informações hidráulicas configuradas no formulário de entrada são registradas e armazenadas no arquivo de entrada. Estas informações no nível de formulário evitam mudanças no código pelo usuário.

São elas, os diâmetros discretos selecionados (variável de decisão) para simulação e otimização, o tipo de fórmula para cálculo de perda de carga (Hazen-Williams ou Darcy-Weisbach) e seu respectivo coeficiente de rugosidade, a máxima perda de carga unitária admissível e a máxima e mínima pressão admitida para os nós.

Observe-se que os diâmetros discretos selecionados são os valores factíveis para as variáveis de decisão e que a cada geração é buscado o conjunto de diâmetro (dentre os factíveis) para a rede que otimizem a função objetivo.

A configuração das informações hidráulicas através do arquivo de entrada e do formulário de entrada torna o módulo simulador uma ferramenta útil, prática e bastante genérica, permitindo sua utilização para o dimensionamento ótimo de diferentes redes, bastando para isto desenhá-la no próprio EPANET com as características hidráulicas necessárias à simulação e salvá-la como arquivo de entrada (*INPUT FILE*) e alimentar os parâmetros inerentes no formulário de entrada, evitando mudanças no código fonte pelo usuário.

### 5.3 MODELO OTIMIZADOR – AG

O modelo foi escrito na linguagem Visual Basic for Applications – VBA, dentre outros motivos, por ser esta a linguagem de macro para o Microsoft Excel, possibilitando em tempo real a criação de gráficos, filtro avançado, tabelas dinâmicas e todas as ferramentas disponibilizadas na planilha eletrônica que faz parte da rotina de pessoas que atuam nas mais diversas áreas, atingindo atualmente a cifra de 400 milhões de usuários.

#### 5.3.1 Representação das Variáveis de Decisão do AG

- *Tipo das Variáveis de Decisão.*

O problema de otimização do dimensionamento do sistema de abastecimento proposto, através do AG, apresenta somente a variável de decisão diâmetros. Esta variável, segundo análise realizada no capítulo 4 – Estudo de Caso, tem comportamento discreto e valores atribuídos múltiplos de polegada.

- *Escolha do Tipo de Representação das Variáveis de Decisão.*

O fato da única variável de decisão ter comportamento discreto conduziu a escolha da representação **binária** por ser a representação tradicional, demonstrando facilidade de utilização, manipulação e de análise teórica.

- *Estruturação da Cadeia Binária do Gene (Cada Tubo da rede).*

Cada gene (cada tubo da rede) está representado por quatro bits da cadeia, que representam o diâmetro nominal múltiplo de polegada, conforme a tabela 5.1 que explica os valores atribuídos.

Diâmetro (pol.)	Diâmetro (mm)	Valores Atribuídos ao Gene	
		Decimal	Binário
2	50	1	0001
3	75	2	0010
4	100	3	0011
5	125	4	0100
6	150	5	0101
7	175	6	0110
8	200	7	0111
9	225	8	1000
10	250	9	1001
11	275	10	1010
12	300	11	1011
13	325	12	1100
14	350	13	1101
15	375	14	1110
16	400	15	1111
20	500	0	0000

Tabela 5.1 – Valores Binários Atribuídos aos Genes (Tubos)

Observe que o diâmetro de uma polegada não foi contemplado, pois a norma da ABNT, NBR 12218(1994) estabelece calibre mínimo de 50 mm (2 pol.) para diâmetros urbanos de distribuição.

Ressalte-se também, que o diâmetro de 500 mm (20 pol.) foi inserido por ser o maior calibre comercial disponível na linha PVC/DEFoFo, ABNT, NBR 5647 (1999), de forma a abranger não somente os diâmetros arbitrados do exemplo, mas todos os diâmetros comerciais de tubulação de PVC (cloreto de polivinil), que são as mais empregadas nos projetos de redes de abastecimento, e que operam com pressões de serviço até 1 MPa.

• ***Estruturação da Cadeia Binária do Cromossomo (Todos os Tubos da rede).***

A rede exemplo é constituída por trinta e dois condutos (NC=32), sendo este o número de genes (cada tubo da rede) que compõem o cromossomo (todos os 32 tubos da rede).





Os dados retornados do módulo simulador são verificados quanto às restrições hidráulicas e se factível (toda a rede atende às restrições hidráulicas) tem sua função aptidão calculada pelo módulo otimizador, tornando-se um membro da população de soluções.

Caso contrário, para cada tubo da rede que não atendeu a restrição hidráulica, o módulo otimizador, através de uma rotina, calcula um diâmetro maior que o gerado e que atenda a mesma.

A solução com os novos diâmetros é enviada ao módulo simulador, que retorna a rede hidraulicamente equilibrada. E novamente são verificadas as condições restritivas.

O processo se repete até obtenção de toda uma população de soluções factíveis.

• ***Durante o processamento (gerações intermediárias)***

A convergência prematura para um ótimo local, ocorre quando cromossomos de alta aptidão dominam a população, espalhando seus genes por toda a população, enquanto outros genes desaparecem (*genetic drift*).

Para combater esta situação indesejada é previsto um dispositivo de controle denominado *coeficiente de convergência*, com a finalidade de manter a diversidade dos cromossomos na população.

$$\text{Coef. Conv.} = \frac{FO_{med} - FO_{min}}{FO_{med}} \quad (5.1)$$

Onde :  $FO_{med}$  = valor médio das funções objetivo da população

$FO_{min}$  = valor mínimo das funções objetivo da população

Na prática este procedimento é implementado quando o valor calculado do coeficiente de convergência da população de uma determinada geração for menor que o valor (mínimo admissível para o mesmo) configurado no formulário de entrada. Determinando para a geração consecutiva uma população gerada aleatoriamente, conservando a solução mais apta (elitismo).

Ou seja, quando a grande maioria das soluções de uma população convergirem prematuramente para um mesmo valor (ótimo local), este dispositivo para manutenção de diversidade dos cromossomo pode ser acionado. Para tanto o valor mínimo admissível para o coeficiente de convergência configurado no formulário de entrada deve ser diferente de zero por cento ( $Coeff_{Conv} \neq 0\%$ ).

### 5.3.3 Avaliação de Desempenho Através das Funções Objetivo.

Como aludido no capítulo 4 (Estudo de Caso), o presente trabalho se propõe primeiramente a utilizar a seguinte função objetivo:

• *Função Objetivo com Enfoque na Eficiência da Seção dos Tubos da Rede*

$$\text{Minimizar } F = \sum_{i=1}^{NC} \frac{D_i^5}{Q_i^2} \quad (5.2)$$

Onde  $F$ : função dependente só dos diâmetros  $D_i$ , pois  $Q_i$  obtido apartir da rede equilibrada com os diâmetros enviados ao EPANET  $[L^{-1}.T^2] - mm^{-1}.s^2$   
 $D_i$ : diâmetros dos condutos da rede  $[L] - mm$   
 $Q_i$ : vazão nos condutos da rede  $[L^3.T^{-1}] - Lit/s$   
 $NC$ : número de condutos da rede

Por questão de melhor apresentação dimensional do valor da função nas unidades acima, divide-se  $F$  por  $10^{10}$ , encontrando resultados na ordem de grandeza de uma casa decimal. O que não prejudica as comparações e ordenamentos das soluções, uma vez que todas elas são divididas pela mesma constante.

• ***Função Objetivo com Enfoque no Custo de Implantação e Operação da Rede***

Cumprida a primeira etapa, o trabalho aprecia a mesma rede agora com a seguinte função objetivo:

$$\text{minimizar } C = \sum_{i=1}^{NC} L_i P(D_i) + C_h H F_a \quad (5.3)$$

Onde

- $C$ : custo do sistema de abastecimento dependente só de  $D_i$ , pois  $H$  obtido apartir da rede equilibrada com os diâmetros enviados ao EPANET  
[UM] – R\$
- $L_i$ : comprimento do trecho  $i$  [L] – m
- $P(D_i)$ : função que relaciona o preço unitário de implantação de  $D_i$  [UM x L<sup>-1</sup>] - R\$/m
- $F_a$ : fator de atualização do custo de operação
- $C_h$ : custo de operação da estação de bombeamento por unidade de altura manométrica [UM x L<sup>-1</sup>] – R\$/m
- $H$ : altura manométrica de bombeamento [L] - mca

Observe-se que por questão de melhor apresentação dimensional do valor da função, divide-se  $C$  por  $10^3$ , encontrando resultados na unidade mil reais.

Enfatize-se novamente que, a restrição hidráulica quanto às pressões dos nós atribui ao nó mais desfavorável (menor carga hidráulica) o valor de restrição de mínima pressão admissível, calculando-se e verificando-se (restrição de máxima pressão admissível) as pressões dos demais nós e no ponto de alimentação, obtendo altura manométrica requerida do sistema de abastecimento.

Isto explica a afirmação acima de que a altura manométrica  $H$  é obtida a partir da rede equilibrada com os diâmetros enviados ao simulador hidráulico.

A seguir explicamos as fórmulas utilizadas por Gomes (2004) e por este trabalho na sequência em que as mesmas se apresentam na função objetivo, hora apreciada.

A função que relaciona o preço unitário de implantação para os vários diâmetros foi obtida através de um programa de ajuste de curva a partir da tabela 5.2, que contem os custos de implantação (tubulação e montagem) para os diâmetros comerciais em PVC e FoFo e desenvolve equações das curvas ajustadas para cada tipo de material.

DN (mm)	Material tubo	D interno (mm)	Custo do Tubo (R\$/m)	Montagem (R\$/m)	Implantação (R\$/m)
100	PVC	108,4	17,09	30,00	47,09
150	PVC	156,4	33,80	30,00	63,80
200	PVC	204,2	57,62	30,00	87,62
250	PVC	252,0	88,59	30,00	118,59
300	PVC	299,8	122,24	30,00	152,24
350	FoFo	366,2	274,74	43,12	317,86
400	FoFo	416,4	329,36	45,64	375,00
450	FoFo	466,6	387,97	48,26	436,23
500	FoFo	518,0	462,44	53,16	515,60
600	FoFo	619,6	581,14	59,16	640,30

Tabela 5.2 – Preços unitários de implantação das tubulações (fonte CAGEPA abril de 2004)

As duas curvas ajustadas, uma para tubulação em PVC (figura 5.2) e outra para tubulação em FoFo (figura 5.3), são apresentadas com as respectivas equações (polinomiais de segunda ordem) e distâncias R-quadrado .

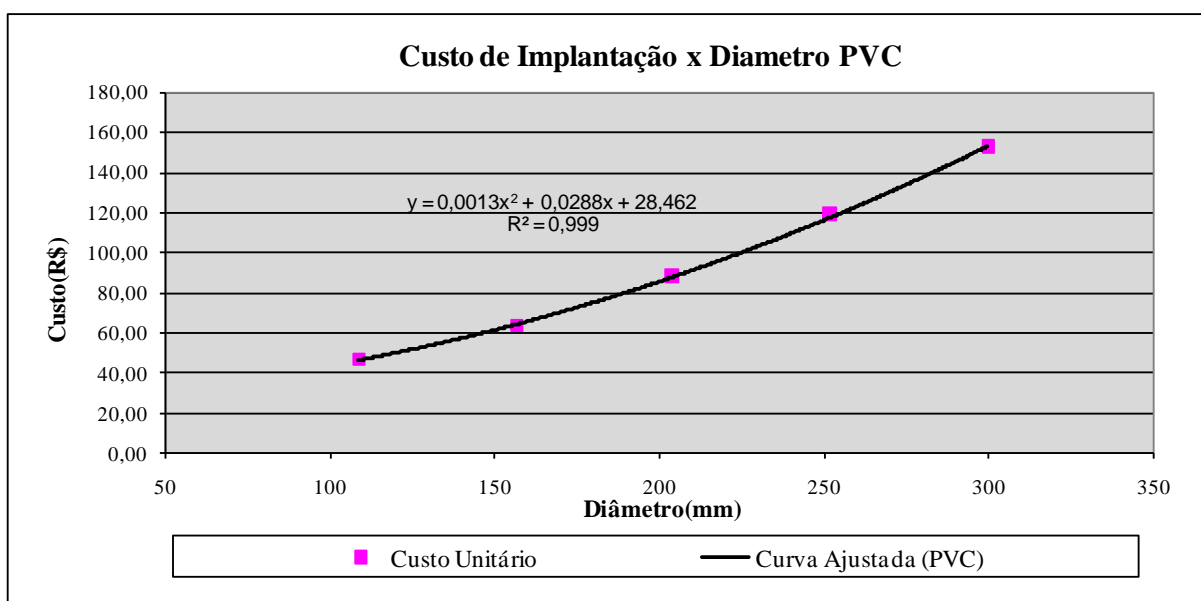


Figura 5.2 – Gráfico com equação da curva ajustada dos custos de implantação para diâmetros em PVC.

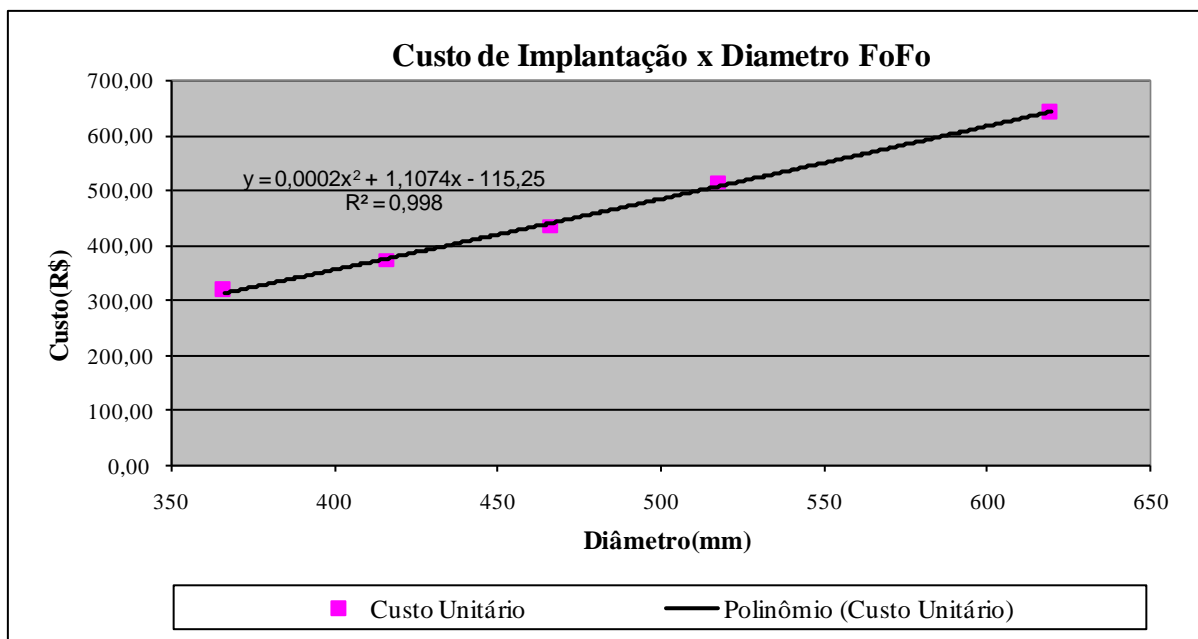


Figura 5.3 – Gráfico com equação da curva ajustada dos custos de implantação para diâmetros em FoFo.

Gomes (2004) desenvolveu as equações para calcular os custos de implantação de diâmetros que se comportavam de forma contínua e utilizou FoFo para tubulações acima 300mm, independente da pressão solicitada.

Neste trabalho utilizou-se o tipo de tubulação com implantação menos custosa (PVC) até o limite de 1MPa ou 100 mca, devendo ser este o valor da máxima pressão admissível (restrição hidráulica) da rede.

Portanto, nenhum nó extrapola este limite, uma vez que é realizada a verificação desta restrição, e se por acaso depois de todas as tentativas de aumento de diâmetros a condição restritiva continuar não sendo atendida, o programa encerra-se com uma mensagem identificando os nós com pressão acima da admissível.

Ressalte-se novamente que, o máximo diâmetro admissível 500 mm (20 pol.) disponível na linha PVC/DEFoFo, ABNT, NBR 5647 (1999), é inserido para abranger calibres requeridos por outras redes já que o maior diâmetro (estimado ou calculado) da rede exemplo é 350mm, significando isto que, foi empregada somente a equação de custo de implantação para diâmetros em PVC.

Os custos de operação (predominantemente de energia para bombeamento), incidem em tempos diferentes, requerendo uma conversão financeira de uma série de custos anuais sujeita a uma taxa de juro anual (  $i$  ) e de aumento de energia (  $e$  ).

A fórmula apresentada abaixo é conhecida como fator de atualização ou fator de valor presente e realiza a conversão para o presente dos custos anuais realizados durante a vida das instalações ou alcance do projeto (  $n$  ).

$$F_a = \left[ \frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \right] \cdot \left[ \frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (5.4)$$

Adotou-se para o exemplo hora analisado:  $n = 20$  anos

$$i = 0,12 \text{ ou } 12\%$$

$$e = 0,06 \text{ ou } 6\%$$

Resultando o fator de atualização em:

$$F_a = \left[ \frac{(1+0,06)^{20} - (1+0,12)^{20}}{(1+0,06) - (1+0,12)} \right] \cdot \left[ \frac{1}{(1+0,12)^{20}} \right] = 11,13 \quad (5.5)$$

O custo de operação da estação de bombeamento, por unidade de altura manométrica (  $C_h$  ), é obtido da seguinte forma:

$$C_h = \frac{9,81 Q}{\eta} N_b P \quad (5.6)$$

Onde:  $Q$  = vazão de alimentação para toda a rede correspondendo ao somatório das demandas dos nós [ $L^3/T$ ] –  $m^3/s$

$\eta$  = rendimento esperado do conjunto motor – bomba

$N_b$  = número de horas anuais de utilização do bombeamento

$P$  = custo do Kwh [UM] – R\$

Para o exemplo analisado temos:  $Q = 0,252 \text{ (m}^3/\text{s)}$

$$\eta = 0,75 \text{ ou } 75\%$$

$$N_b = 13 \frac{\text{hrs}}{\text{dia}} \times 365 \text{ dias} = 4.745 \text{ hrs}$$

$$P = 0,20 \text{ R\$}$$

Resultando o custo de operação por unidade de altura manométrica em

$$C_h = \frac{9,81 \times 0,252}{0,75} \times 4745 \times 0,2 = 3.128,06 \text{ R\$/m}$$

A vazão de alimentação e o número de horas de bombeamento são os únicos parâmetros que divergem dos adotados por Gomes (2005) na parcela da função objetivo correspondente aos custos de operação.

A vazão de alimentação difere obviamente por ser inerente à rede de abastecimento, correspondendo ao somatório das demandas dos nós. Quanto ao número de horas de bombeamento, o problema abordado por Cirilo (1997), apresenta na rede um reservatório, sem fornecer dados de compensação ou elevação.

A elevação mínima do reservatório é calculada quando da simulação hidráulica com os diâmetros fornecidos. E sobre a capacidade de compensação volumétrica (artifício usado para fins de economia de energia por não bombear em horários de tarifas mais caras) pode-se apenas considerar que no cálculo das demandas dos nós, foram previstos os coeficientes de segurança relativos aos dias de maior consumo ( $K_1 = 1,25$ ) e à hora de maior demanda ( $K_2 = 1,50$ ).

Então temos um fator multiplicador ( $K_1 \times K_2 = 1,875$ ) na demanda normal dos nós, da rede e conseqüentemente no reservatório. Em lugar de considerar no cálculo do custo de operação por unidade manométrica a vazão reduzida ( $Q / 1,875$ ), mantém-se a vazão de alimentação e reduz-se a quantidade necessária de horas bombeadas por dia na mesma razão ( $24 / 1,875 = 12,8 \cong 13hrs$ ), atribuindo um aspecto de compensação volumétrica ao problema.

### 5.3.4 Métodos de Seleção das Soluções Promissoras.

O método escolhido para realizar a seleção das soluções é o ordenamento, descrito no capítulo três, por exercer a seleção de modo proporcional a aptidão, apresentando melhor desempenho na tarefa de eleger as soluções mais aptas para gerar descendência ou para permanecerem na próxima geração.

O modelo otimizador realiza ainda o ordenamento linear das soluções evitando a convergência prematura. À melhor solução é atribuída aptidão dois (2), e à pior zero (0), às soluções intermediárias são atribuídos valores interpolados linearmente entre esses extremos.

As soluções selecionadas compõem a população intermediária e aguardam a chance de gerarem descendência.

### 5.3.5 Operadores Genéticos Empregados.

#### • *Tipos de Recombinações Adotadas*

Em se tratando de representação binária, onde autores como Elshelman et al. (1989), apud Beasley (1993), depois de investigação dos desempenhos das várias recombinações de N pontos e uniforme, concluíram não haver grandes diferenças de desempenho entre eles, optou-se por dispor de dois tipos de cruzamento no formulário para entrada dos parâmetros do AG.

A possibilidade de se estabelecer a recombinação Clássica (com um ponto de corte) ou a recombinação uniforme flexibiliza a busca da solução ótima global mesmo quando se deparar com problemas com redes de distribuição complexas com alta *Epistasia* (considerados AG-deceptivos).

Michalewicz (1992) indica a recombinação uniforme para AGs-deceptivos, pois ela troca bits em vez de segmentos, podendo combinar características sem considerar suas localizações relativas. Para alguns tipos de problemas, esta habilidade tem mais valor do que a



desvantagem de destruir os blocos construídos. Contudo para outros problemas, o cruzamento uniforme é inferior ao cruzamento dito clássico.

O procedimento da recombinação é aplicado com uma dada probabilidade a cada par de cromossomos selecionados. Na prática, tal procedimento é implementado através da geração de número pseudo aleatório no intervalo  $[0,1]$ , e aplicando-se a recombinação se o número gerado for menor que a taxa de recombinação estabelecida como parâmetro do AG no formulário de entrada. Caso contrário os filhos serão iguais aos pais, permitindo que algumas soluções sejam preservadas.

#### • *Mutação*

Após a aplicação do *operador recombinação* aplica-se o *operador mutação* com dada probabilidade **em cada bit** dos dois filhos.

Igualmente ao procedimento da recombinação, gera-se outro número pseudo aleatório entre  $[0,1]$  e aplica-se a mutação se, e somente se, o número gerado for menor que a taxa de mutação determinada como parâmetro do AG no formulário de entrada.

A aplicação da mutação nada mais é do que a inversão dos valores de bits, ou seja, muda o valor de um dado bit de 1 para 0 ou de 0 para 1.

### 5.3.6 Configuração dos Parâmetros do AG no Módulo Otimizador

Os parâmetros do AG são configurados também no formulário de entrada do que pode ser visualizado na figura 5.4.

Para os parâmetros representados por valores tais como tamanho da população, número de gerações, probabilidades de recombinação e mutação, e coeficiente de convergência, uma caixa listando os cinco valores mais usuais e representativos para cada um deles é apresentada como opção.

Outros parâmetros que representam definições para o processamento tais como, adoção de elitismo ou tipo de cruzamento, são selecionados por botões de opções.

E para os parâmetros que definem os critérios de parada antecipada do processamento, baseados na convergência (número de repetições da melhor solução através de gerações) ou baseados no tempo máximo de processamento, o usuário pode atribuir ou não valores para os mesmos através de caixas de texto. Caso nenhum valor seja atribuído não há parada antecipada ao número de gerações determinado.

Esta forma de escolha dos parâmetros do AG torna o módulo otimizador uma ferramenta útil, prática e eficaz, permitindo a calibração dos parâmetros que aumentem o desempenho do AG, economizando tempo de processamento e memória para armazenamento, sem a necessidade de mudanças no código fonte pelo usuário.

PARÂMETROS DO AG		PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO EPANET	
População de Soluções	<input type="button" value="10"/> <input type="button" value="20"/> <input type="button" value="30"/>	Opções de Diâmetros (pol.)	
Número de Gerações	<input type="button" value="20"/> <input type="button" value="30"/> <input type="button" value="50"/>	<input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 10 <input type="checkbox"/> 14 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 7 <input type="checkbox"/> 11 <input type="checkbox"/> 15 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 8 <input type="checkbox"/> 12 <input type="checkbox"/> 16 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 9 <input type="checkbox"/> 13 <input type="checkbox"/> 20	
Probabilidade de Cruzamento	<input type="button" value="50%"/> <input type="button" value="70%"/> <input type="button" value="80%"/>	<input type="radio"/> Selecciona todos os Diâmetros <b>SEPARADOR DECIMAL (.)</b>	
Probabilidade de Mutação	<input type="button" value="0,10%"/> <input type="button" value="0,15%"/> <input type="button" value="0,30%"/>	Opções de Fórmula	
Coefficiente de Convergência	<input type="button" value="0,0%"/> <input type="button" value="2,5%"/> <input type="button" value="5,0%"/>	<input type="button" value="D-W"/> <input type="button" value="H-W"/>	
Adoção de "Elitismo"	<input type="radio"/> Sim <input type="radio"/> Não	<input type="radio"/> Uniforme <input type="radio"/> Clássico	
Critério de Parada Antecipada ao Núm. de Gerações		Restrições Hidráulicas	
<input type="button" value="Convergência"/> <input type="button" value="Tempo de Process."/>		Máx. Perd. Carga Unit. Adm.- J(m/Km) = <input type="text"/> Mín. Pressão Adm. Para os Nós-(mca)= <input type="text"/> Máx. Pressão Adm. Para os Nós-(mca)= <input type="text"/>	
Tempo Máx. de Process. (min) = <input type="text"/>		<input type="button" value="PROCESSAR"/> <input type="button" value="CANCELAR"/>	

Figura 5.4 – Formulário de entrada dos parâmetros do AG e do EPANET

## 5.4 FLUXOGRAMA DO MODELO SIMULADOR-OTIMIZADOR

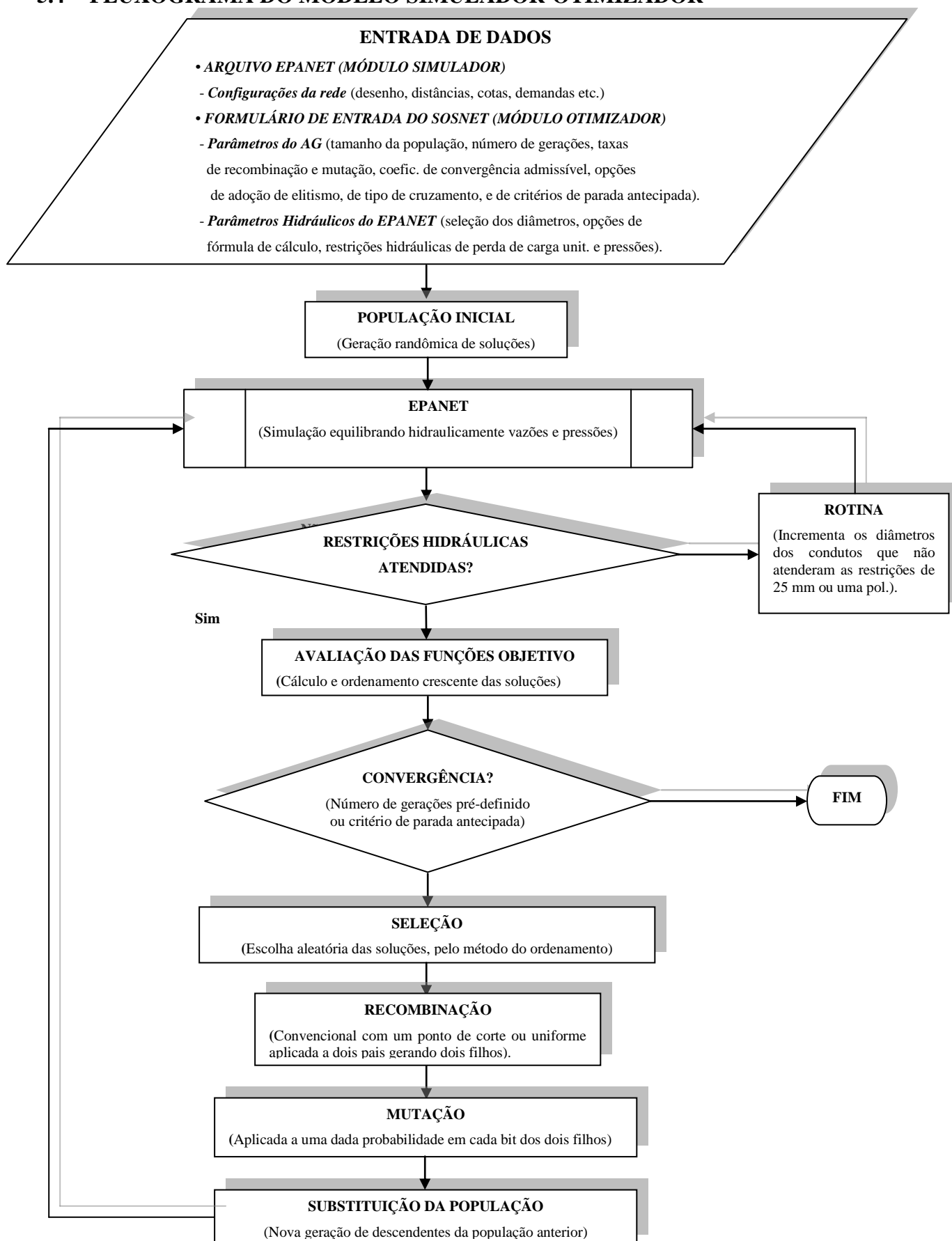


Figura 5.5 – Fluxograma do Modelo Simulador-Otimizador

---

## RESULTADOS E ANÁLISE

---

### 6.1 GENERALIDADES

Embora não seja o objetivo deste trabalho descrever análises de sensibilidade em grande escala para calibrar o código definitivo do AG, somente através destas análises, encontram-se os valores dos parâmetros que fazem o desempenho do algoritmo melhorar em termos de convergência e qualidade final das soluções para a rede estudada e para a função objetivo de otimização aplicada.

Entendendo os parâmetros que controlam o AG e as relações entre eles pode-se reduzir significativamente o esforço de calibração do mesmo a uma determinada aplicação. É com esse objetivo que é realizada uma análise dos resultados obtidos em função da variação de cada parâmetro individualmente.

Optou-se, por questão didática, dividir a análise dos parâmetros em grupos. Estes por sua vez, divididos em casos (resultados para cada valor do parâmetro analisado). E assim possibilitar uma melhor avaliação do desempenho e da qualidade da solução.

Atente-se novamente que o termo desempenho está associado ao tempo de processamento, esforço computacional e a proximidade ou convergência da solução ao resultado ótimo do problema.

Na próxima seção (*análises de sensibilidade*) os resultados são apresentados e discutidos à medida que os parâmetros do AG são abordados individualmente.

## 6.2 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DOS RESULTADOS AOS PARÂMETROS BÁSICOS DO AG

Saliente-se que para esta seção do estudo que, objetiva a calibração dos parâmetros básicos do AG que melhorem o seu desempenho, a função objetivo adotada otimiza a eficiência das seções dos condutos. E os parâmetros hidráulicos adotados são apresentados na tabela 6.2.

Diâmetros Factiveis (mm)	Fórmula	Coef. de Rugosidade.	Máx. Perda de Carga Unit. Adm. J(m/Km)	Pressões (mca)	
				Min. Adm.	Máx. Adm.
50	Darcy-Weisbach	0,50 mm	8,00	10,00	100,00
75					
100					
125					
150					
175					
200					
225					
250					
275					
300					
325					
350					

Tabela 6.1 - Parâmetros hidráulicos adotados

Justifica-se a utilização de diâmetros não comerciais em milímetros (125, 175, 225, 275, 325 e 350), devido ao uso destes na rede exemplo calculada através da PNL por Cirilo (1997), tornando possível a comparação destes resultados com os obtidos através do método AG.

E pelo mesmo motivo a restrição da máxima perda de carga unitária admissível é mantida ( $J < 8\text{m/Km}$ ).

### 6.2.1 Grupo 1 – Parâmetro em Análise Tamanho da População de Soluções

Para os cinco casos analisados deste grupo o parâmetro *Tamanho da População de Soluções* é o único que sofre modificações, os demais não se alteram e estão na tabela 6.2.1.

Casos	Tamanho da População de Soluções	Núm. de Gerações	Prob. Cruz.(%)	Prob. Mut.(%)	Adoção de Elitismo?	Tipo de Cruz.	Adoção de Coef. de Conv.?	Adoção de Crit. Parada Antecipada?
1	10	50	90	0,2	Sim	Clássico (1pt de corte)	Não	Não
2	20							
3	30							
4	50							
5	100							

Tabela 6.2.1 – Parâmetros adotados do AG para o grupo 1.

#### • Caso 1- Resultados

SOLUÇÕES	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32
1	200	175	150	325	225	225	175	125	250	150	100	225	350	225	150	175	150	125	300	300	175	50	125	150	225	175	125	175	125	150	125	100
2	200	175	150	325	225	225	175	125	250	150	100	225	350	225	150	175	150	125	300	300	175	50	125	150	225	175	125	175	125	150	125	100
3	200	175	150	325	225	225	175	125	250	150	100	225	350	225	150	175	150	125	300	300	175	50	125	150	225	175	125	175	125	150	125	100
4	200	175	150	325	225	225	175	125	250	150	100	225	350	225	150	175	150	125	300	300	175	50	125	150	225	175	125	175	125	150	125	100
5	200	175	150	325	225	225	175	125	250	150	100	225	350	225	150	175	150	125	300	300	175	50	125	150	225	175	125	175	125	150	125	100
6	200	175	150	325	225	225	175	125	250	150	100	225	350	225	150	175	150	125	300	300	175	50	125	150	225	175	125	175	125	150	125	100
7	200	175	150	325	225	225	175	125	250	150	100	225	350	225	150	175	150	125	300	300	175	50	125	150	225	175	125	175	125	150	125	100
8	200	175	150	325	225	225	175	125	250	150	100	225	350	225	150	175	150	125	300	300	175	50	125	150	225	175	125	175	125	150	125	100
9	200	175	150	325	225	225	175	125	250	150	100	225	350	225	150	175	150	125	300	300	175	50	125	150	225	175	125	175	125	150	125	100
10	200	175	150	325	225	225	175	125	250	150	100	225	350	225	150	175	150	125	300	300	175	50	125	150	225	175	125	175	125	150	125	100

Tabela 6.2.2 – Diâmetros da população de soluções da última geração do Caso 1.

Obs.: Diâmetros em milímetros (mm).

A análise deste resultado é que após 50 interações (gerações) de processamento os respectivos diâmetros dos condutos na rede são os mesmos para todas as soluções da população.

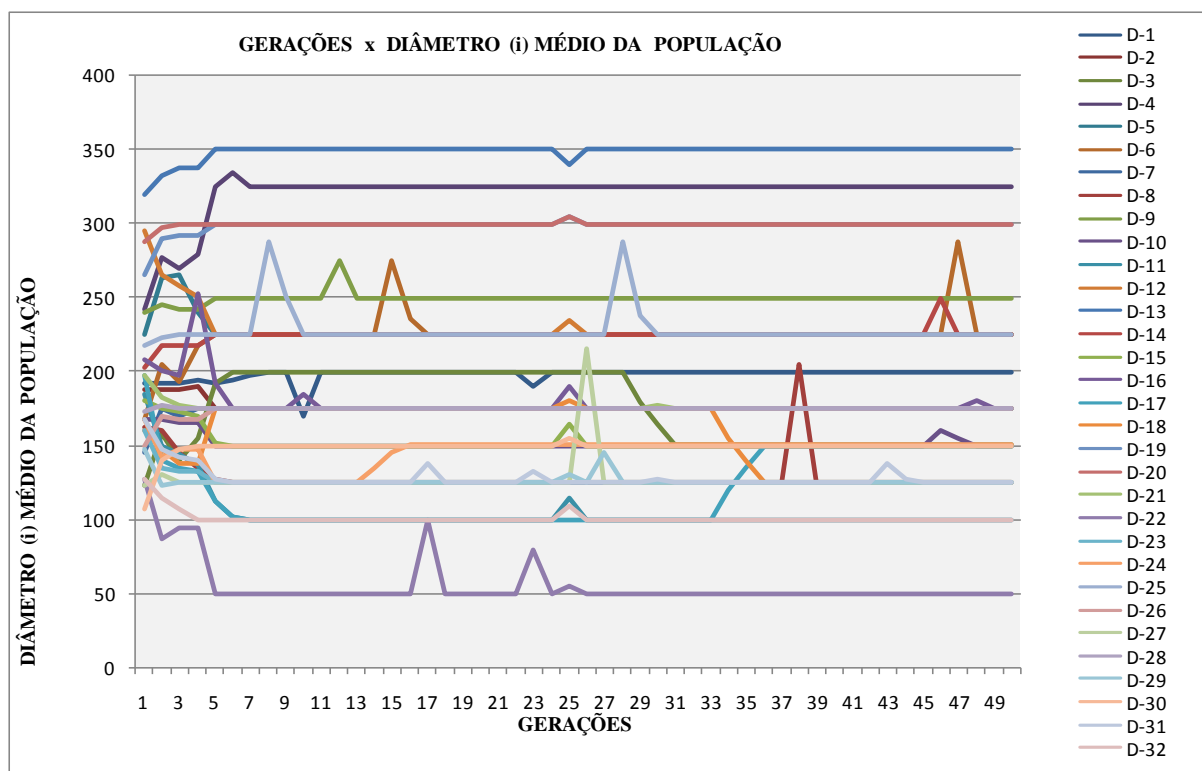


Figura 6.2.1 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 1.

O resultado gráfico demonstra o diâmetro médio de cada conduto dentro da população variando bastante nas primeiras gerações (até 5 geração) e com pequenas alterações nas gerações posteriores.

Lembre-se aqui que a alteração na média ocorre em consequência (posteriormente) do surgimento de uma solução mais apta na população que, tendo maior probabilidade de ser selecionado para cruzamento, espalha seus genes dentro da população, modificando ai a média dos diâmetros de cada conduto da rede.

ITERAÇÕES (i)	FOmin(i)	FOmed(i)	FOmax(i)	Coef.Conv.(i)
1	2,817	7,916	29,742	64,4%
2	2,817	36,630	261,711	92,3%
3	2,817	7,479	20,202	62,3%
4	2,748	4,129	6,552	33,5%
5	2,748	3,505	4,510	21,6%
6	2,748	2,917	3,989	5,8%
7	2,748	2,755	2,817	0,3%
8	2,748	2,912	3,076	5,6%
9	2,748	2,813	3,076	2,3%
10	2,748	4,777	7,822	42,5%
11	2,748	2,748	2,748	0,0%
12	2,748	2,972	3,197	7,6%
13	2,748	2,748	2,748	0,0%
14	2,676	2,719	2,748	1,6%
15	2,676	2,986	3,346	10,4%
16	2,676	2,735	3,261	2,1%
17	2,676	2,925	3,174	8,5%
18	2,676	2,676	2,676	0,0%
19	2,676	2,676	2,676	0,0%
20	2,676	2,676	2,676	0,0%
21	2,676	2,676	2,676	0,0%
22	2,676	2,676	2,676	0,0%
23	2,676	2,915	3,174	8,2%
24	2,676	2,676	2,676	0,0%
25	2,676	192,780	953,193	98,6%
26	2,676	5,758	10,381	53,5%
27	2,676	2,769	2,908	3,4%
28	2,676	2,886	3,096	7,3%
29	2,635	2,702	3,055	2,5%
30	2,635	2,671	2,915	1,4%
31	2,635	2,635	2,635	0,0%
32	2,635	2,635	2,635	0,0%
33	2,635	2,635	2,635	0,0%
34	2,451	2,561	2,635	4,3%
35	2,451	2,506	2,635	2,2%
36	2,451	2,451	2,451	0,0%
37	2,451	2,451	2,451	0,0%
38	2,451	43,584	105,283	94,4%
39	2,451	2,451	2,451	0,0%
40	2,451	2,451	2,451	0,0%
41	2,451	2,451	2,451	0,0%
42	2,451	2,451	2,451	0,0%
43	2,451	2,480	2,509	1,2%
44	2,451	2,457	2,509	0,2%
45	2,451	2,451	2,451	0,0%
46	2,451	2,818	3,374	13,0%
47	2,451	3,084	4,445	20,5%
48	2,451	2,461	2,502	0,4%
49	2,451	2,451	2,451	0,0%
50	2,451	2,451	2,451	0%

Tabela 6.2.3 – Valores (mínimo, médio e máximo) da função objetivo a cada geração do

## Caso 1

As unidades da função objetivo não são indicadas nas tabelas e gráficos devido ao seu aspecto dimensional elevado, podendo ser encontradas na equação (5.2) à página 66 deste trabalho.



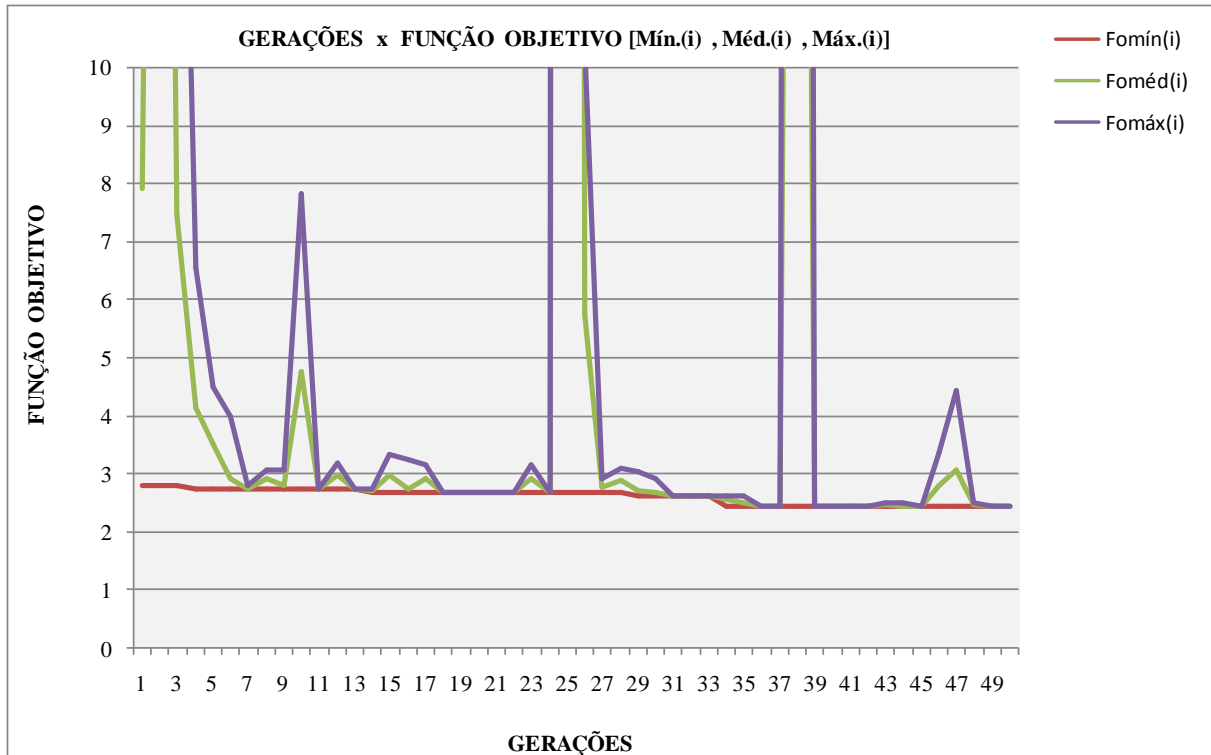


Figura 6.2.2 – Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 1.

Analisando o gráfico acima que representa a tabela 6.2.2, vê-se que para populações pequenas (10 soluções) os ruídos randômicos (distorções advindas do processo aleatório) têm amplitudes maiores para os valores médios e máximos da função objetiva, não influenciando, no entanto, os valores mínimos da mesma que são os considerados na otimização da função objetivo:

$$\text{minimizar } F = \sum_{i=1}^{NC} \frac{D_i^5}{Q_i^2}$$

Esta característica de tolerância a ruídos foi citada como vantagem do método AG, sobre os demais.

Na realidade o ruído randômico apresentado na função objetivo ocorre quando a rede, que tem seus diâmetros gerados aleatoriamente ou obtidos através do cruzamento de duas outras redes (soluções) e depois de equilibrada hidraulicamente, apresenta algum conduto com vazão muito pequena ( $Q \cong 0$ ), tornando o valor de  $F$  da função objetivo para esta rede muito grande comparativamente às demais soluções da população.

Observando a tabela 6.2.3 a geração 25 tem uma solução da população que possui valor da função objetivo igual 953,193 (máximo), que obviamente elevou o valor médio da mesma (192,780) para a população desta geração.

A tabela 6.2.4 contém o relatório emitido pelo simulador EPANET da solução N° 4 que provoca o ruído randômico da função objetivo na geração N° 25. Observa-se que a vazão do conduto 22 (próximo de zero) ao ser aplicada na fórmula da função objetivo (denominador) resulta no incremento de 944,6 ao somatório da mesma, totalizando para todos os tubos 953,1.

**Relatório da Solução N° 4 da Geração N° 25**

N° do Tubo	Diâmetro (mm)	Vazão (l/s)	Velocidade (m/s)	Perda de Carga Unitária (m/Km)	Coef. Rugos. D-W (mm)	$\frac{D_f^5}{Q_f^5}$	$\frac{D_f^5}{Q_f^5} \times 10^{-10}$	$F = \sum_{i=1}^{N} \frac{D_f^5}{Q_f^5}$
1	200	17,1847	0,55	2,02	0,026	1.083.592.695	0,108	0,108
2	175	9,1847	0,38	1,19	0,028	1.945.630.172	0,195	0,303
3	200	19,9061	0,63	2,69	0,026	807.565.236	0,081	0,384
4	325	54,1425	0,65	1,54	0,023	1.236.915.963	0,124	0,507
5	225	27,1847	0,68	2,69	0,025	780.303.404	0,078	0,585
6	225	19,0908	0,48	1,35	0,026	1.582.210.764	0,158	0,744
7	175	-7,0908	0,29	0,72	0,029	3.264.372.957	0,326	1,070
8	125	7,9092	0,64	5,09	0,03	487.848.473	0,049	1,119
9	250	25,1104	0,51	1,33	0,025	1.548.790.876	0,155	1,274
10	150	5,8740	0,33	1,11	0,03	2.200.839.697	0,220	1,494
11	175	13,8740	0,58	2,66	0,027	852.681.544	0,085	1,579
12	275	64,2579	1,08	5,13	0,024	380.899.509	0,038	1,617
13	300	91,3272	1,29	6,52	0,023	291.343.939	0,029	1,646
14	225	3,2012	0,08	0,05	0,031	56.271.303.319	5,627	7,273
15	225	29,0718	0,73	3,06	0,025	682.289.592	0,068	7,342
16	250	39,0718	0,80	3,16	0,025	639.695.366	0,064	7,406
17	100	3,3121	0,42	2,98	0,033	911.576.496	0,091	7,497
18	200	17,0977	0,54	2	0,026	1.094.648.265	0,109	7,606
19	325	84,4150	1,02	3,68	0,023	508.835.678	0,051	7,657
20	325	96,4150	1,16	4,78	0,023	390.056.567	0,039	7,696
21	175	19,2730	0,80	5,05	0,027	441.867.033	0,044	7,740
22	75	-0,0159	0,00	0	0,431	9.445.996.576.740	944,600	952,340
23	125	8,4097	0,69	5,74	0,03	431.508.205	0,043	952,383
24	150	-10,4541	0,59	3,4	0,029	694.837.094	0,069	952,453
25	225	39,7745	1,00	5,67	0,025	364.504.700	0,036	952,489
26	175	19,3204	0,80	5,08	0,027	439.701.570	0,044	952,533
27	125	-5,5428	0,45	2,55	0,031	993.325.646	0,099	952,632
28	175	-17,5428	0,73	4,2	0,027	533.325.586	0,053	952,686
29	150	8,8797	0,50	2,47	0,029	963.074.111	0,096	952,782
30	175	12,8632	0,53	2,29	0,028	991.955.521	0,099	952,881
31	125	7,2571	0,59	4,3	0,03	579.460.518	0,058	952,939
32	150	6,7429	0,38	1,45	0,029	1.670.178.379	0,167	953,106

Tabela 6.2.4 – Relatório da solução que provocou ruído randômico na função objetivo do

Caso 1

Obs.: O EPANET simula a variável diâmetro em (mm) e vazão em (Lt/s).

A tabela 6.2.5 mostra a evolução dos diâmetros e da função objetivo a partir da primeira população, que teve a estimativa inicial da PNL inserida, até a melhor solução da população final (Geração 50) para o caso 1. E a figura 6.2.3 representa a informação contida nesta tabela demonstrando a comparação dos diâmetros das melhores soluções da primeira e da última geração.

Caso 1	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32	Função Objetivo
Solução Estimada (PNL) - [A]	250	250	125	250	250	150	100	200	300	200	250	300	350	200	200	250	250	250	300	350	150	100	300	150	150	100	200	200	125	125	125	29,742	
Melhor Solução Pop.Inicial - [B]	175	175	200	325	225	225	175	125	250	150	100	225	350	225	150	175	100	175	300	300	50	50	125	125	225	175	125	175	125	125	100	2,817	
Melhor Solução Pop Final - [C]	200	175	150	325	225	225	175	125	250	150	100	225	350	225	150	175	100	175	300	300	50	50	125	125	225	175	125	175	125	125	100	2,451	
Melhora Absoluta - [C-B]	25	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,366		
Melhora Relativa % - [C-B]/[C]	12,5	0,0	33,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,918		

Tabela 6.2.5 – Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 1

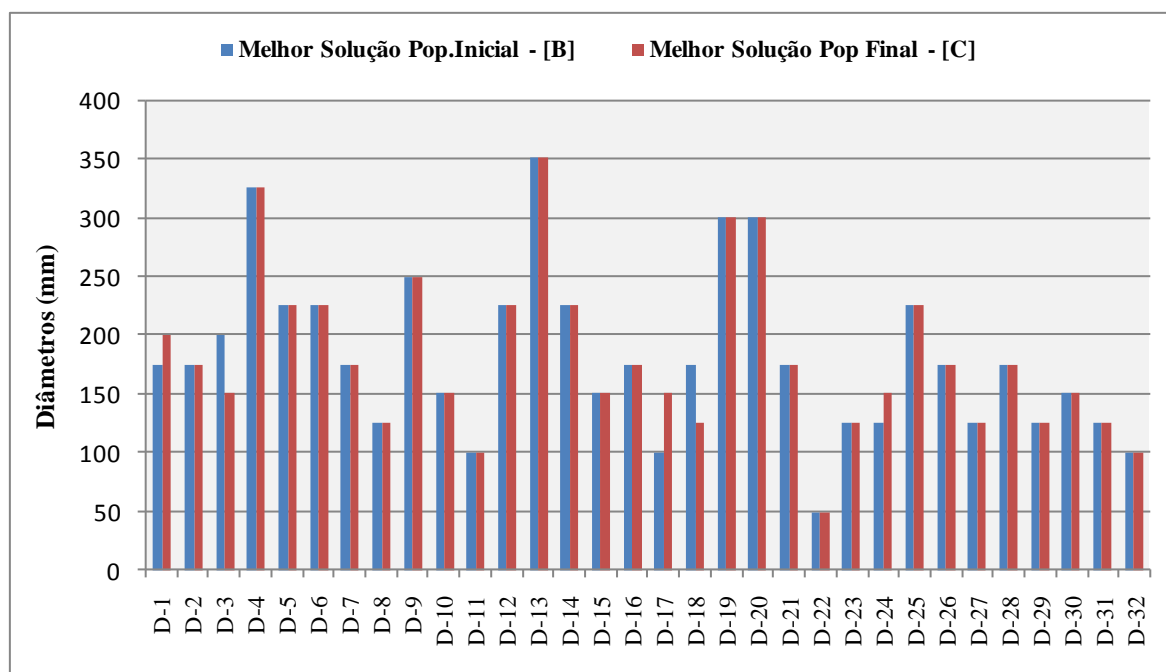


Figura 6.2.3 – Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 1.

• **Caso 2- Resultados**

SOLUÇÕES	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32
1	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
2	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
3	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
4	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
5	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
6	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
7	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
8	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
9	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
10	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
11	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
12	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
13	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
14	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
15	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
16	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
17	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
18	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
19	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125
20	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	150	75	150	125	225	175	150	200	125	175	100	125

Tabela 6.2.6 – Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso2.

Obs.: Diâmetros em milímetros (mm).

Neste caso também os respectivos diâmetros dos condutos na rede convergiram para valores semelhantes em todas as soluções da população final.

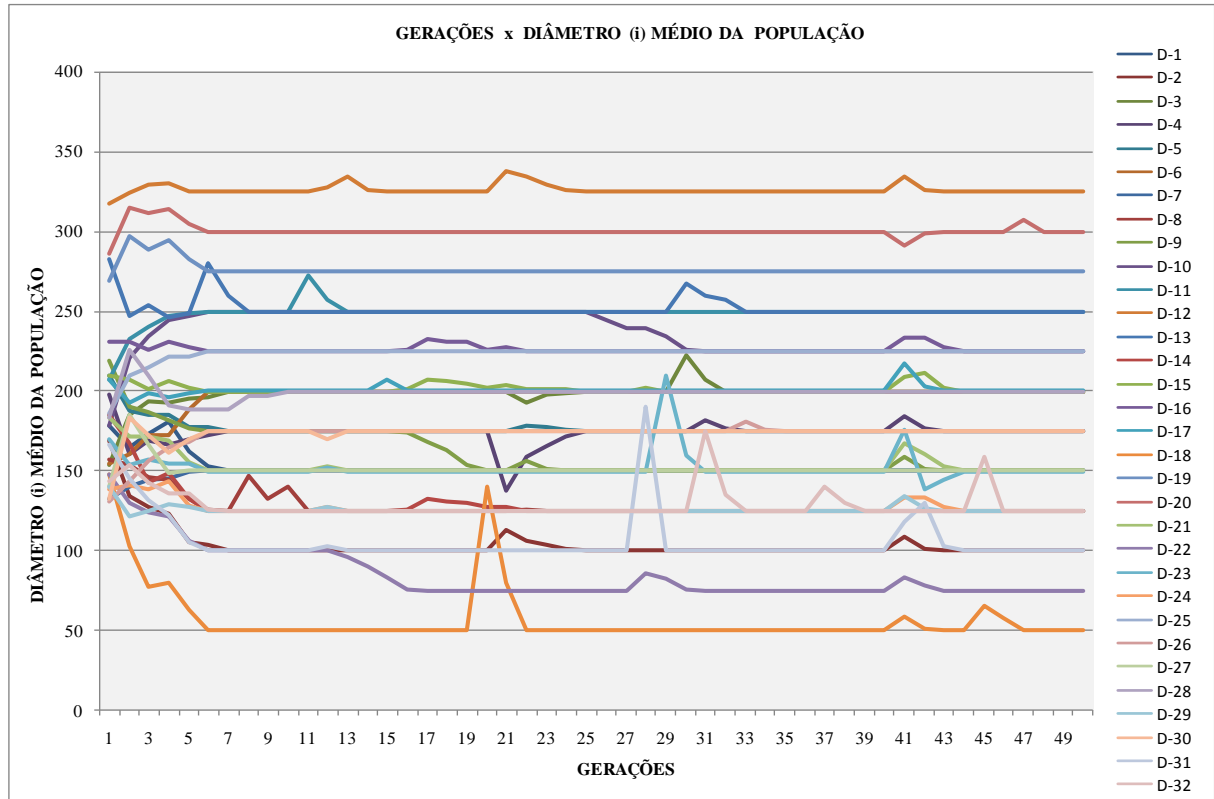


Figura 6.2.4 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 2.

O resultado gráfico novamente demonstra o diâmetro médio de cada conduto variando bastante até a sexta geração e pequenas variações nas gerações posteriores.

ITERAÇÕES (i)	FOmin(i)	FOmed(i)	FOmax(i)	Coef.Conv.(i)
1	1,931	35,131	562,222	94,5%
2	1,931	14,034	144,191	86,2%
3	1,931	8,090	44,360	76,1%
4	1,931	8,177	82,205	76,4%
5	1,931	2,367	8,655	18,4%
6	1,931	2,009	2,441	3,8%
7	1,931	1,949	2,101	0,9%
8	1,931	2,278	2,703	15,2%
9	1,931	2,047	2,703	5,6%
10	1,931	2,163	2,703	10,7%
11	1,931	2,007	2,099	3,8%
12	1,931	1,988	2,452	2,8%
13	1,931	2,007	2,147	3,8%
14	1,931	1,942	2,147	0,6%
15	1,931	1,979	2,886	2,4%
16	1,895	1,929	1,931	1,8%
17	1,767	1,918	2,009	7,8%
18	1,767	1,879	1,931	5,9%
19	1,767	1,816	1,931	2,7%
20	1,767	2,395	3,136	26,2%
21	1,767	2,080	4,624	15,0%
22	1,767	1,893	2,963	6,6%
23	1,767	1,787	1,958	1,1%
24	1,767	1,771	1,839	0,2%
25	1,767	1,767	1,767	0,0%
26	1,726	1,759	1,767	1,9%
27	1,726	1,751	1,767	1,4%
28	1,726	3,580	5,913	51,8%
29	1,726	2,206	3,316	21,8%
30	1,726	1,931	3,998	10,6%
31	1,726	2,517	4,608	31,4%
32	1,726	1,882	4,608	8,3%
33	1,726	1,746	1,804	1,1%
34	1,726	1,730	1,804	0,2%
35	1,726	1,726	1,726	0,0%
36	1,726	1,726	1,726	0,0%
37	1,726	1,776	1,893	2,8%
38	1,726	1,743	1,893	1,0%
39	1,726	1,726	1,726	0,0%
40	1,726	1,726	1,726	0,0%
41	1,726	2,435	3,752	29,1%
42	1,726	2,386	5,512	27,7%
43	1,726	1,786	2,327	3,4%
44	1,726	1,726	1,726	0,0%
45	1,726	2,354	5,860	26,7%
46	1,726	1,730	1,751	0,2%
47	1,726	1,727	1,732	0,0%
48	1,726	1,726	1,726	0,0%
49	1,726	1,726	1,726	0,0%
50	1,726	1,726	1,726	0,0%

Tabela 6.2.7 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 2

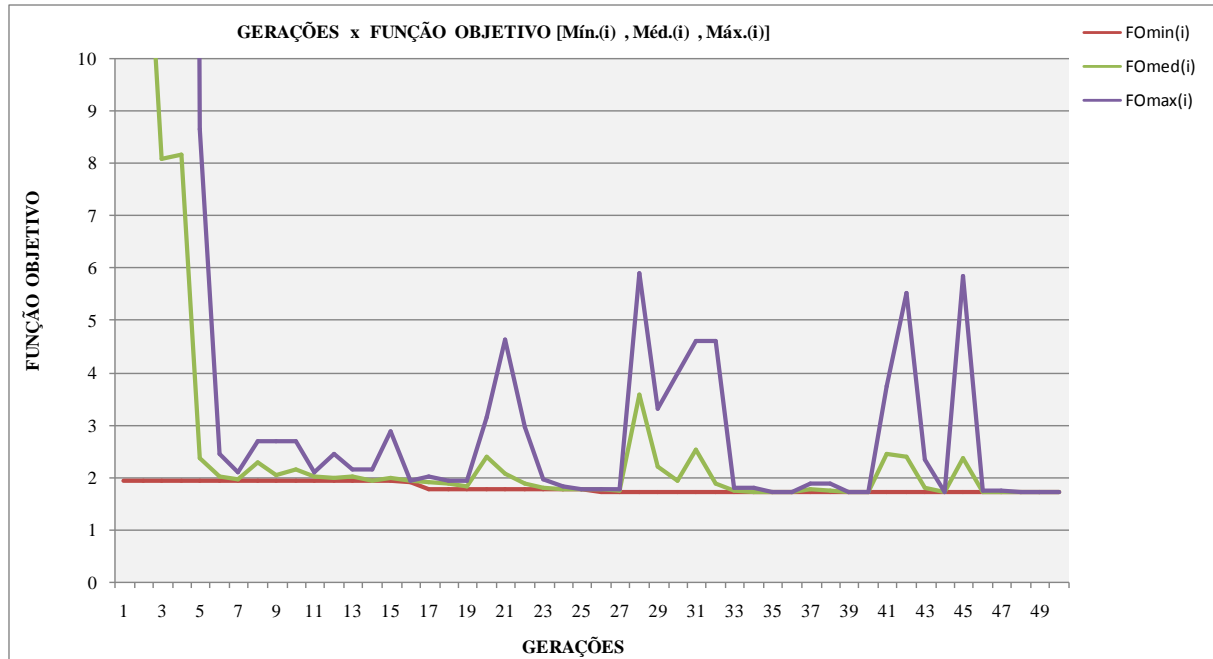


Figura 6.2.5 – Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 2.

Neste caso observamos que os ruídos randômicos reduziram em comparação com o caso anterior, podendo ser percebido somente nos valores máximos da função objetiva, não influenciando, no entanto, os valores médios e mínimos da mesma.

Caso 2	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32	Função Objetivo
Solução Estimada (PNL) - [A]	250	250	125	250	250	150	100	200	300	200	250	300	350	200	200	250	250	250	250	300	350	150	100	300	150	150	100	200	200	200	125	125	29,742
Melhor Solução Pop.Inicial - [B]	150	100	200	175	175	200	150	125	175	250	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	300	150	100	150	150	150	150	200	125	175	100	125	1,931
Melhor Solução Pop Final - [C]	150	100	200	175	175	200	150	125	150	225	250	325	250	125	200	225	200	50	275	300	300	150	100	150	150	150	150	200	125	175	100	125	1,726
Melhora Absoluta - [C-B]	0	0	0	0	0	0	0	0	25	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,205	
Melhora Relativa % - [C-B]/[C]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.7	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11,889	

Tabela 6.2.8 – Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 2.

A tabela 6.2.8 mostra a evolução dos diâmetros e da função objetivo a partir da melhor solução da população inicial até a melhor solução da população final. Observa-se no caso 2 que somente três condutos tiveram seus diâmetros modificados depois de 50 gerações.

A figura 6.2.6 representa a informação contida nesta tabela demonstrando a comparação dos diâmetros das melhores soluções da primeira e da última geração.

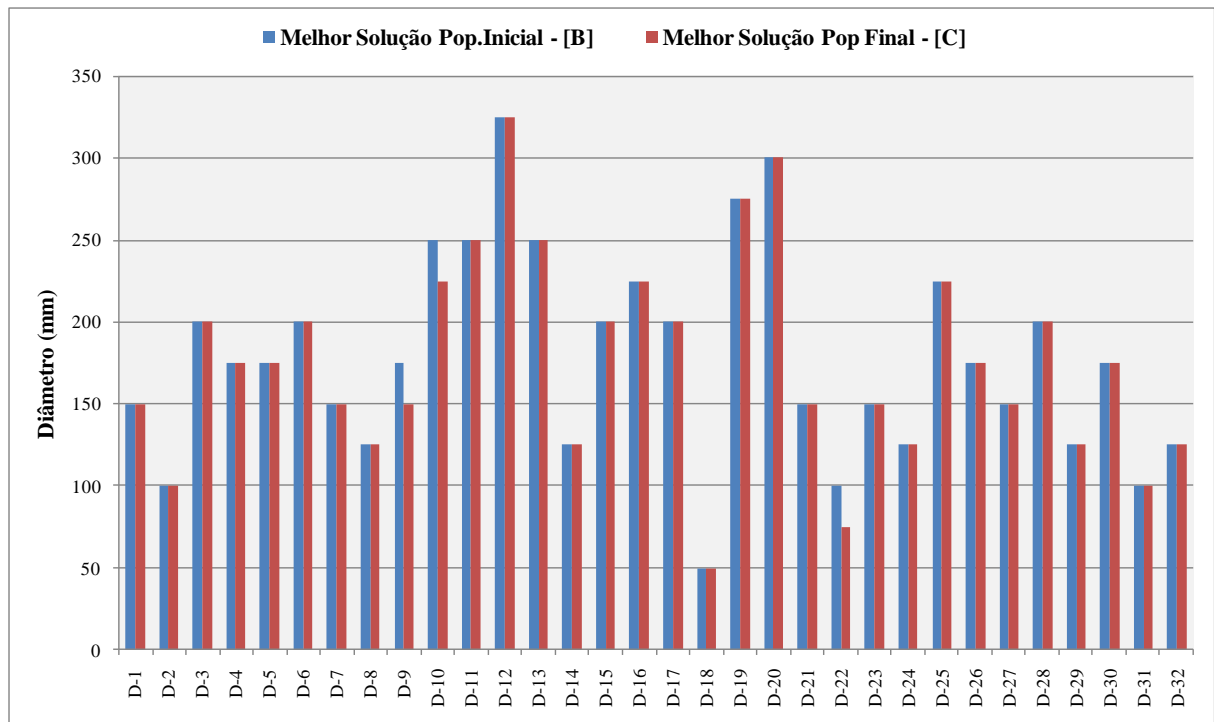


Figura 6.2.6 – Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 2

• *Caso 3- Resultados*

SOLUÇÕES	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32
1	175	150	75	100	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
2	175	150	75	100	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
3	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
4	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
5	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
6	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
7	175	150	75	100	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
8	175	150	75	100	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
9	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
10	175	150	75	100	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
11	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
12	175	150	75	100	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
13	175	150	75	100	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
14	175	150	75	100	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
15	175	150	75	100	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
16	175	150	75	100	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
17	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
18	175	150	75	100	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
19	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
20	175	150	75	100	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
21	175	150	75	100	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
22	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
23	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
24	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
25	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
26	175	150	75	100	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
27	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
28	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
29	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
30	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150
Diâm. Médio (mm)	175	150	75	87	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	225	175	200	300	325	100	150	250	100	175	100	150	200	175	100	100	150

Tabela 6.2.9 – Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 3.

Obs.: Diâmetros em milímetros (mm).

Neste caso o conduto (D-4) é o único que apresenta dois valores (75 e 100 mm) para as trinta soluções da ultima população. Os demais condutos convergiram para valores semelhantes em todas as soluções da população final.



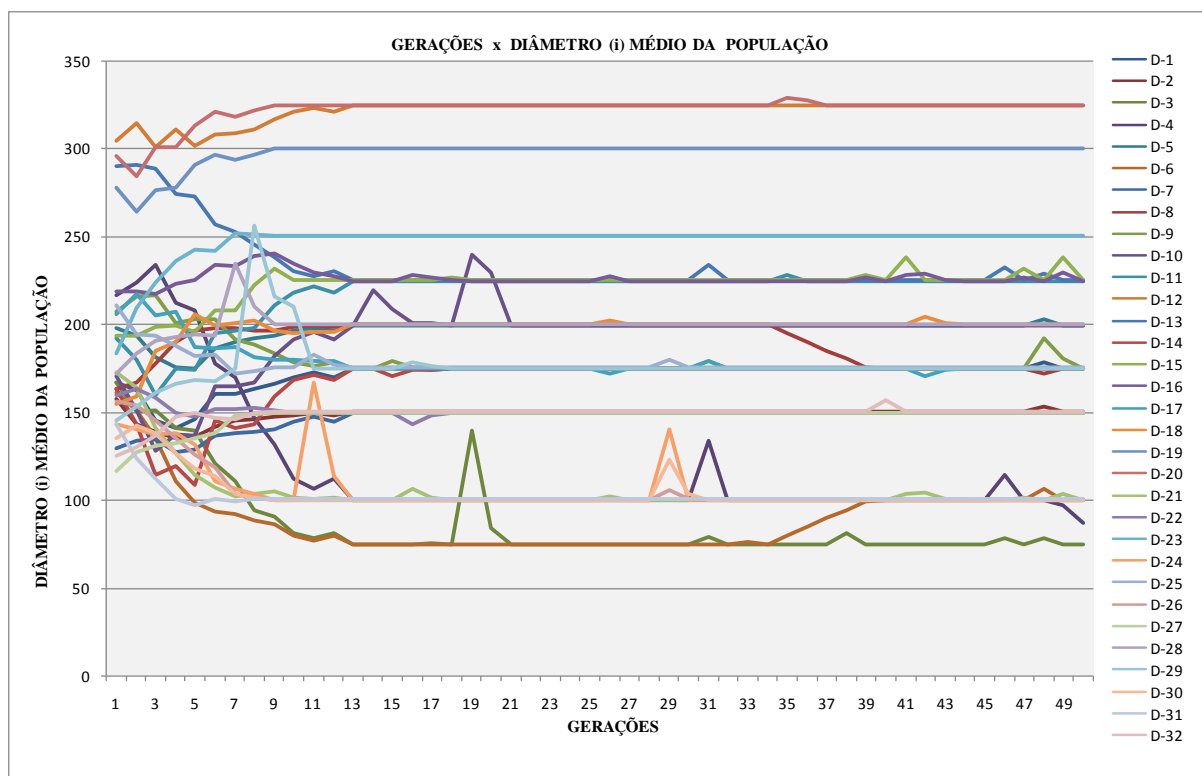


Figura 6.2.7 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do caso 3.

A figura 6.2.7 mostra que o diâmetro médio de cada conduto varia bastante até a décima primeira geração com pequenas variações nas gerações posteriores.

Comprovando este fato a tabela 6.2.10 apresenta o coeficiente de convergência com valores acima de 20% até a décima primeira geração. Na décima terceira geração apresenta valor nulo significando que o valor médio da função objetivo se iguala pela primeira vez ao valor mínimo desta, ou seja, todas as soluções desta iteração (geração) são iguais apresentando os mesmos diâmetros sequenciais para a rede.

A partir da primeira iteração onde o coeficiente de convergência é nulo ( $FO_{med} = FO_{min}$ ), o operador mutação passa a exercer papel preponderante para encontrar novos diâmetros que melhorem a aptidão da solução (rede). Pois qualquer que seja o operador de recombinação escolhido (clássico ou uniforme), o mesmo realiza o cruzamento de soluções (pais) iguais que resulta em filhos iguais aos pais.

<b>ITER\TUBOS</b>	<b>F0min(i)</b>	<b>F0med(i)</b>	<b>F0max(i)</b>	<b>Coef.Conv.</b>
1	1,826	16,145	104,543	88,7%
2	1,826	187,282	5283,689	99,0%
3	1,634	6,916	43,410	76,4%
4	1,634	3,010	8,551	45,7%
5	1,628	2,214	3,957	26,5%
6	1,628	3,060	26,740	46,8%
7	1,628	2,121	3,321	23,3%
8	1,628	2,606	5,335	37,5%
9	1,611	2,083	3,338	22,7%
10	1,611	1,886	2,770	14,6%
11	1,611	2,033	3,938	20,8%
12	1,611	1,718	2,639	6,3%
13	1,611	1,611	1,611	0,0%
14	1,611	1,662	1,995	3,1%
15	1,611	1,629	1,995	1,2%
16	1,611	1,639	1,813	1,7%
17	1,611	1,619	1,813	0,5%
18	1,611	1,614	1,697	0,2%
19	1,611	12,309	47,023	86,9%
20	1,611	3,201	47,023	49,7%
21	1,611	1,611	1,611	0,0%
22	1,611	1,611	1,611	0,0%
23	1,611	1,611	1,611	0,0%
24	1,611	1,611	1,611	0,0%
25	1,611	1,611	1,611	0,0%
26	1,611	1,621	1,712	0,6%
27	1,611	1,611	1,611	0,0%
28	1,611	1,611	1,611	0,0%
29	1,611	1,934	2,716	16,7%
30	1,611	1,625	2,048	0,9%
31	1,611	1,735	2,360	7,2%
32	1,611	1,611	1,611	0,0%
33	1,611	1,611	1,622	0,0%
34	1,611	1,611	1,611	0,0%
35	1,571	1,610	1,768	2,4%
36	1,571	1,596	1,624	1,6%
37	1,571	1,587	1,611	1,0%
38	1,571	1,646	3,049	4,6%
39	1,571	1,579	1,664	0,5%
40	1,571	1,603	1,814	2,0%
41	1,571	1,609	1,853	2,3%
42	1,571	1,589	1,681	1,1%
43	1,571	1,575	1,681	0,2%
44	1,571	1,571	1,571	0,0%
45	1,571	1,571	1,571	0,0%
46	1,571	1,602	1,792	1,9%
47	1,571	1,590	1,853	1,2%
48	1,571	2,809	10,080	44,1%
49	1,570	1,652	2,861	4,9%
50	1,570	1,571	1,571	0,0%

Tabela 6.2.10 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 3

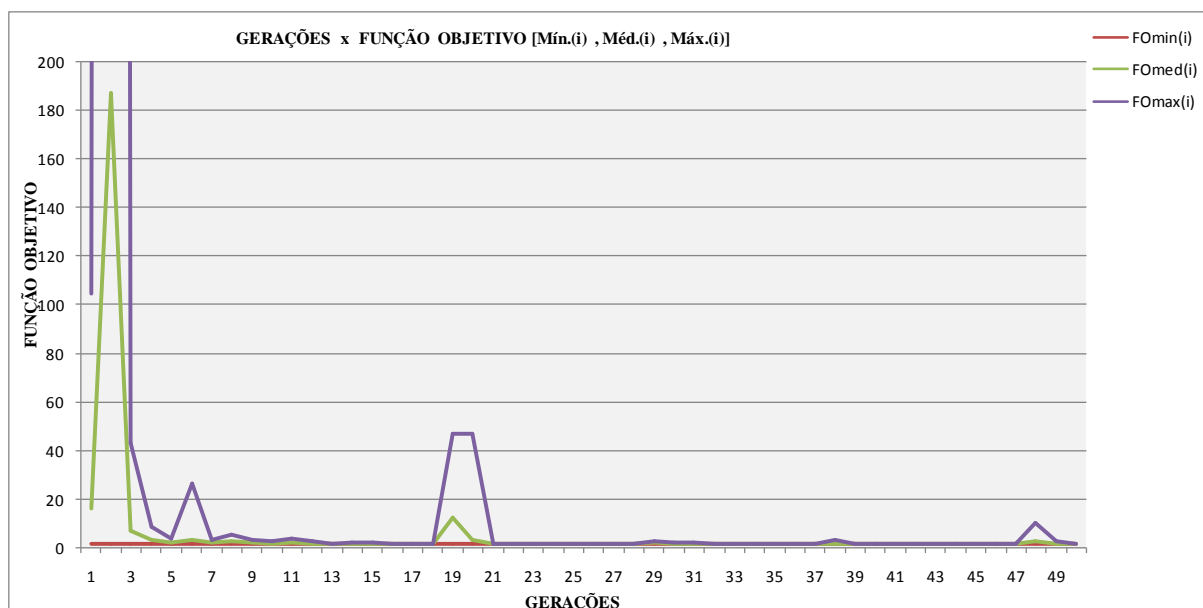


Figura 6.2.8 – Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 3.

Observando a figura 6.2.8 vê-se que o ruído randômico na segunda geração, pode ser percebido mais intensamente nos valores máximos da função objetiva, com menos intensidade nos valores médios da mesma, no entanto, não pode afetar os valores mínimos dela, talvez por causa da opção pelo *elitismo*, ou pela própria robustez do AG. Espera-se dirimir esta questão quando da análise de sensibilidade dos resultados do processamento com e sem *elitismo*.

Caso 3	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32	Função Objetivo	
Solução Estimada (PNL) - [A]	250	250	125	250	250	150	100	200	300	200	250	300	350	200	200	250	250	250	300	300	350	150	100	300	150	150	100	200	200	125	125	125	29,742	
Melhor Solução Pop.Inicial - [B]	100	125	175	275	150	100	125	200	225	75	125	250	300	50	200	200	150	250	250	300	325	75	150	250	100	150	100	150	200	175	100	75	150	1,826
Melhor Solução Pop.Final - [C]	175	150	75	75	200	100	150	175	175	200	225	325	225	175	225	200	175	200	300	325	100	150	250	100	100	100	150	200	175	100	100	125	1,570	
Melhora Absoluta - [C-B]	75	25	100	200	50	0	25	25	50	125	100	75	75	125	75	25	50	0	0	300	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0,256	
Melhora Relativa % - [C-B]/[C]	42,9	16,7	####	####	25,0	0,0	16,7	14,3	28,6	62,5	44,4	23,1	33,3	71,4	33,3	11,1	14,3	25,0	0,0	0,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	0,0	16,276	

Tabela 6.2.11 – Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 3

A tabela 6.2.11 mostra o resultado dos diâmetros da melhor solução e da função objetivo das populações inicial e final. Observa-se neste caso uma modificação significativa em relação aos casos anteriores. Ou seja, 19 dos 32 condutos têm os diâmetros da melhor solução alterados da primeira geração para última.

A figura 6.2.9 representa a informação contida na tabela 6.2.11 demonstrando a comparação dos diâmetros das melhores soluções da primeira e da última geração.

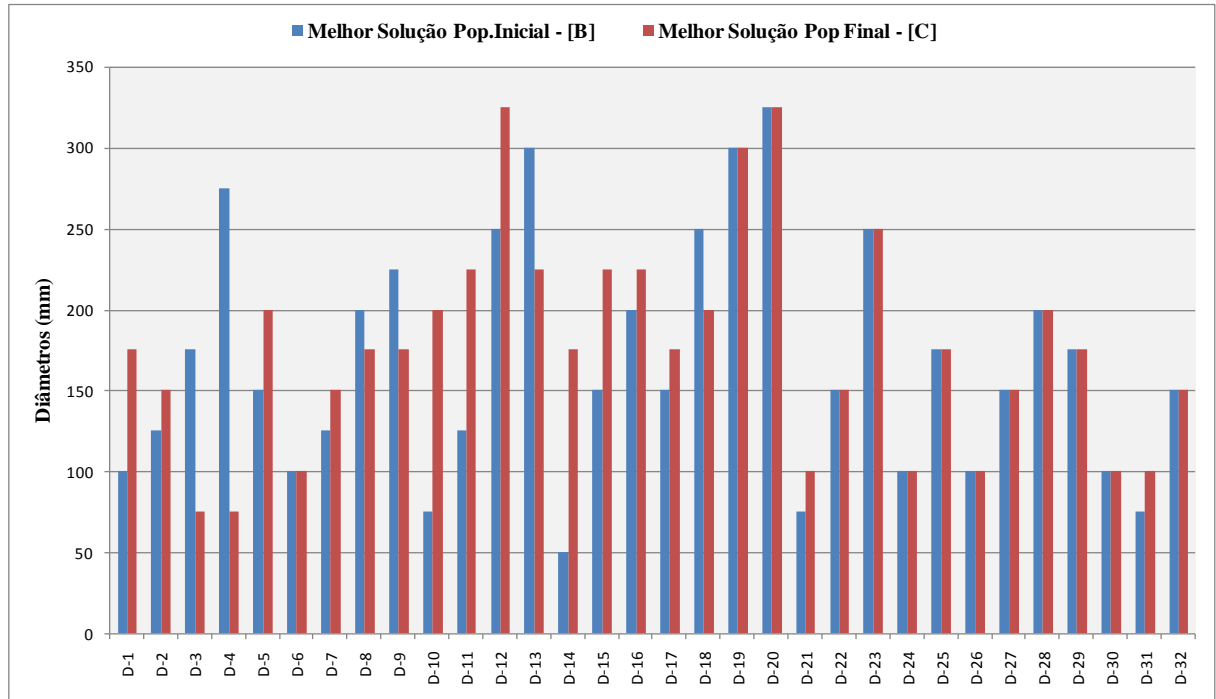


Figura 6.2.9 – Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 3.

### • *Caso 4- Resultados*

SOLUÇÕES	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32
1	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
2	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
3	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
4	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
5	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
6	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
7	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
8	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
9	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
10	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
11	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
12	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
13	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
14	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
15	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
16	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
17	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
18	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
19	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
20	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
21	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
22	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
23	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
24	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
25	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
26	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
27	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
28	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
29	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
30	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
31	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
32	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
33	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
34	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
35	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
36	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
37	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
38	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
39	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
40	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
41	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
42	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
43	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
44	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
45	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	175	200	125	125	125	100
46	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325													

Tabela 6.2.12 – Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 4.

Obs.: Diâmetros em milímetros (mm).

Neste caso também os respectivos diâmetros dos condutos na rede convergiram para valores semelhantes em todas as soluções da população final.

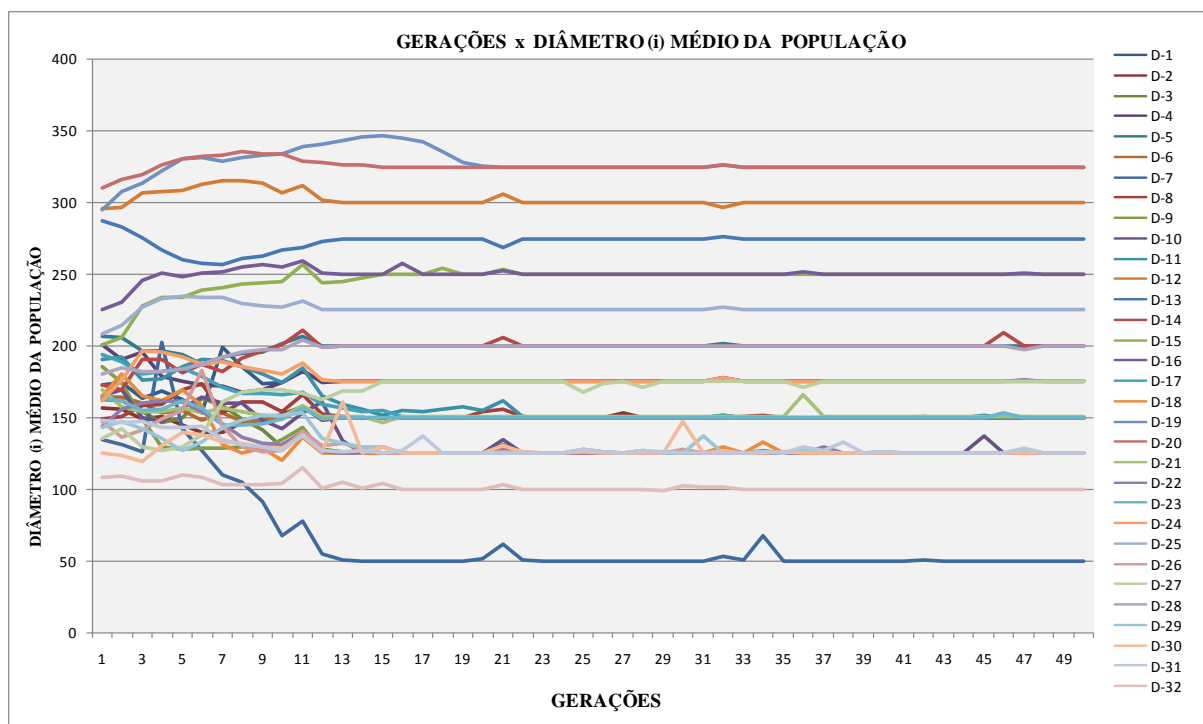


Figura 6.2.10 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 4.

O resultado gráfico, apresentado na figura 6.2.10, demonstra o diâmetro médio de cada conduto variando bastante até a décima terceira geração e pequenas variações nas gerações posteriores.

Em concordância com este gráfico são apresentados na tabela 6.2.13 os valores dos coeficientes de convergência para as 50 gerações de processamento, também com valores superiores a 20% até a décima terceira geração, e com valor nulo pela primeira vez na vigésima terceira geração.

ITER/TUBOS	F0min(i)	F0med(i)	F0max(i)	Coef.Conv.
1	1,873	14,869	203,422	87,4%
2	1,776	42568,065	2127491,526	100,0%
3	1,776	33,640	1228,491	94,7%
4	1,776	29,557	796,178	94,0%
5	1,600	20,210	594,412	92,1%
6	1,600	7,549	124,634	78,8%
7	1,600	4,964	63,224	67,8%
8	1,592	4,442	87,201	64,1%
9	1,592	2,794	29,731	43,0%
10	1,550	1,895	4,721	18,2%
11	1,550	16,163	359,554	90,4%
12	1,550	2,022	6,227	23,3%
13	1,550	1,940	5,391	20,1%
14	1,542	1,567	1,656	1,6%
15	1,542	1,565	1,643	1,5%
16	1,529	1,572	1,838	2,7%
17	1,529	1,708	4,243	10,5%
18	1,529	1,547	1,628	1,2%
19	1,529	1,536	1,564	0,5%
20	1,529	1,536	1,575	0,5%
21	1,529	1,650	2,387	7,4%
22	1,529	1,533	1,657	0,3%
23	1,529	1,529	1,529	0,0%
24	1,529	1,529	1,529	0,0%
25	1,529	1,537	1,606	0,6%
26	1,529	1,530	1,606	0,1%
27	1,529	1,539	1,702	0,7%
28	1,529	1,535	1,606	0,4%
29	1,529	1,531	1,580	0,1%
30	1,529	1,710	3,337	10,6%
31	1,529	1,613	2,937	5,2%
32	1,529	2,179	12,227	29,9%
33	1,529	1,529	1,538	0,0%
34	1,529	4,695	52,765	67,4%
35	1,529	1,530	1,602	0,1%
36	1,529	1,697	3,556	9,9%
37	1,529	1,557	1,863	1,8%
38	1,529	1,636	4,213	6,6%
39	1,529	1,529	1,529	0,0%
40	1,529	1,533	1,750	0,3%
41	1,529	1,529	1,529	0,0%
42	1,529	1,531	1,628	0,1%
43	1,529	1,529	1,529	0,0%
44	1,529	1,529	1,529	0,0%
45	1,529	1,651	3,572	7,4%
46	1,529	1,587	2,358	3,7%
47	1,529	1,559	1,750	1,9%
48	1,529	1,529	1,529	0,0%
49	1,529	1,529	1,529	0,0%
50	1,529	1,529	1,529	0,0%

Tabela 6.2.13 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 4

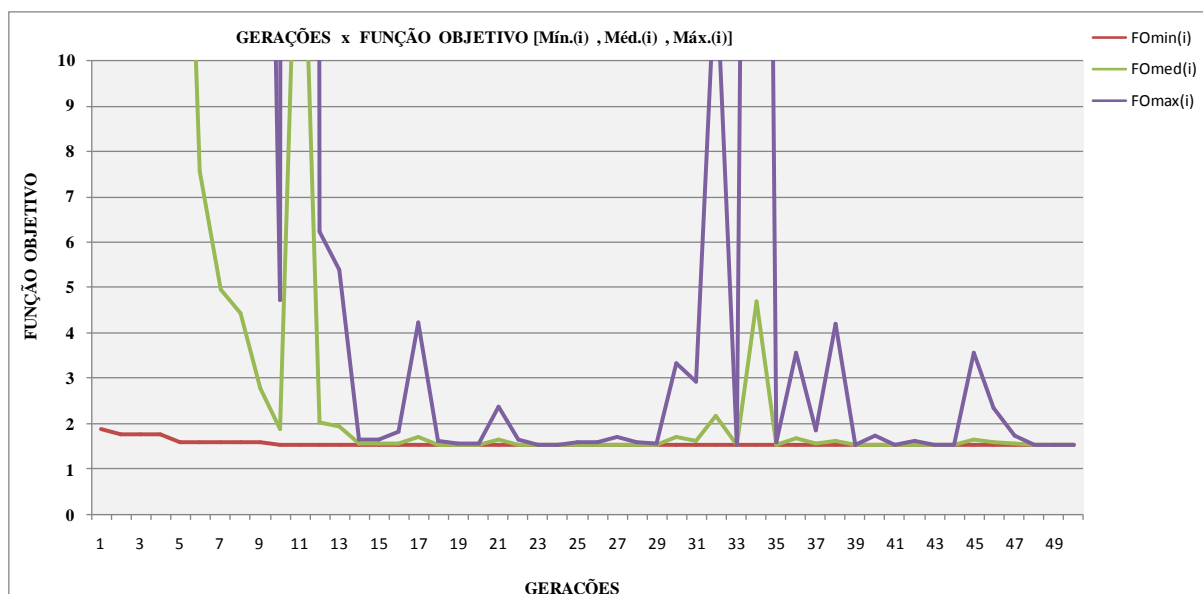


Figura 6.2.11 – Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 4.

Observando a tabela 6.2.13 e a figura 6.2.11 vê-se um ruído randômico também na segunda geração, podendo ser percebido mais intensamente nos valores máximos da função objetiva, com menos intensidade nos valores médios da mesma, no entanto, não podendo afetar os valores mínimos dela.

Caso 4	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32	Função Objetivo
Solução Estimada (PNL) - [A]	250	250	125	250	250	150	100	200	300	200	250	300	350	200	200	250	250	250	300	350	150	100	300	150	150	150	100	200	200	125	125	125	29,742
Melhor Solução Pop.Inicial - [B]	175	150	125	150	200	150	75	150	200	200	225	300	250	100	175	200	150	250	325	325	75	175	250	125	150	175	200	175	100	125	125	125	1,873
Melhor Solução Pop Final - [C]	175	150	125	175	200	150	50	150	125	125	150	300	275	200	250	250	150	125	325	325	150	125	150	175	225	125	200	125	125	100	125	100	1,529
Melhora Absoluta - [C-B]	0	0	0	25	0	0	25	0	75	75	75	0	25	100	75	50	0	125	0	0	75	50	100	66,7	28,6	40,0	0	50	25	0	25	25	0,344
Melhora Relativa % - [C-B]/[C]	0,0	0,0	0,0	14,3	0,0	0,0	50,0	0,0	60,0	60,0	50,0	0,0	9,1	50,0	30,0	20,0	0,0	100,0	0,0	0,0	50,0	40,0	66,7	28,6	33,3	40,0	0,0	40,0	20,0	0,0	25,0	22,526	

Tabela 6.2.14 – Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 4.

A tabela 6.2.14 mostra o resultado dos diâmetros da melhor solução e da função objetivo das populações inicial e final. Resultado este igual ao caso anterior, ou seja, observa-se uma modificação nos diâmetros da melhor solução da população inicial e final em 19 dos 32 condutos.

O gráfico a seguir representa a informação contida nesta tabela demonstrando a comparação dos diâmetros das melhores soluções da primeira e da última geração.



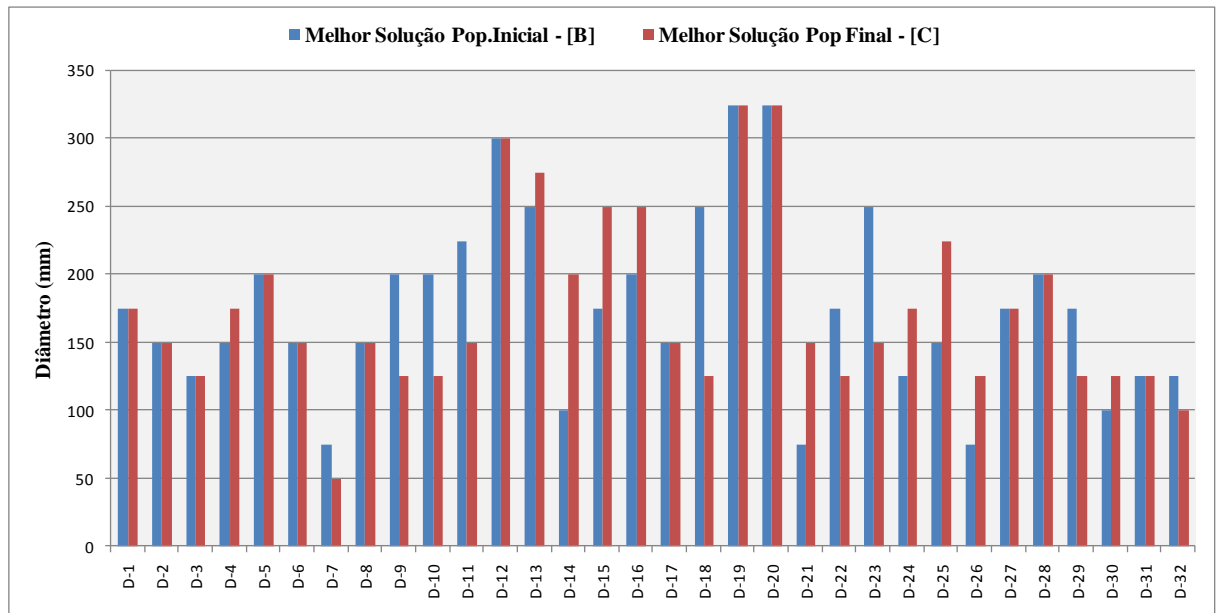


Figura 6.2.12 – Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 4.

### • *Caso 5- Resultados*

SOLUÇÕES	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32
1	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	75	175	100	125
2	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	75	175	100	125
3	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
4	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
5	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
6	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
7	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
8	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
9	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
10	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
11	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
12	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
13	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
14	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
15	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
16	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
17	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
18	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
19	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
20	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
21	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
22	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
23	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
24	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
25	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
26	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
27	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
28	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
29	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
30	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
31	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
32	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
33	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
34	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
35	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
36	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
37	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
38	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
39	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
40	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
41	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
42	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
43	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
44	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
45	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	125	125	175	100	200	150	175	225	100	175	100	125
46	150	125	125	125	200	100	125	175	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	30												

Tabela 6.2.15 – Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 5.

Neste caso os condutos (D-2) e (D-29) são os únicos que apresentam valores diferentes para as cem soluções da última população. Os demais condutos convergiram para valores semelhantes em todas as soluções da população final.

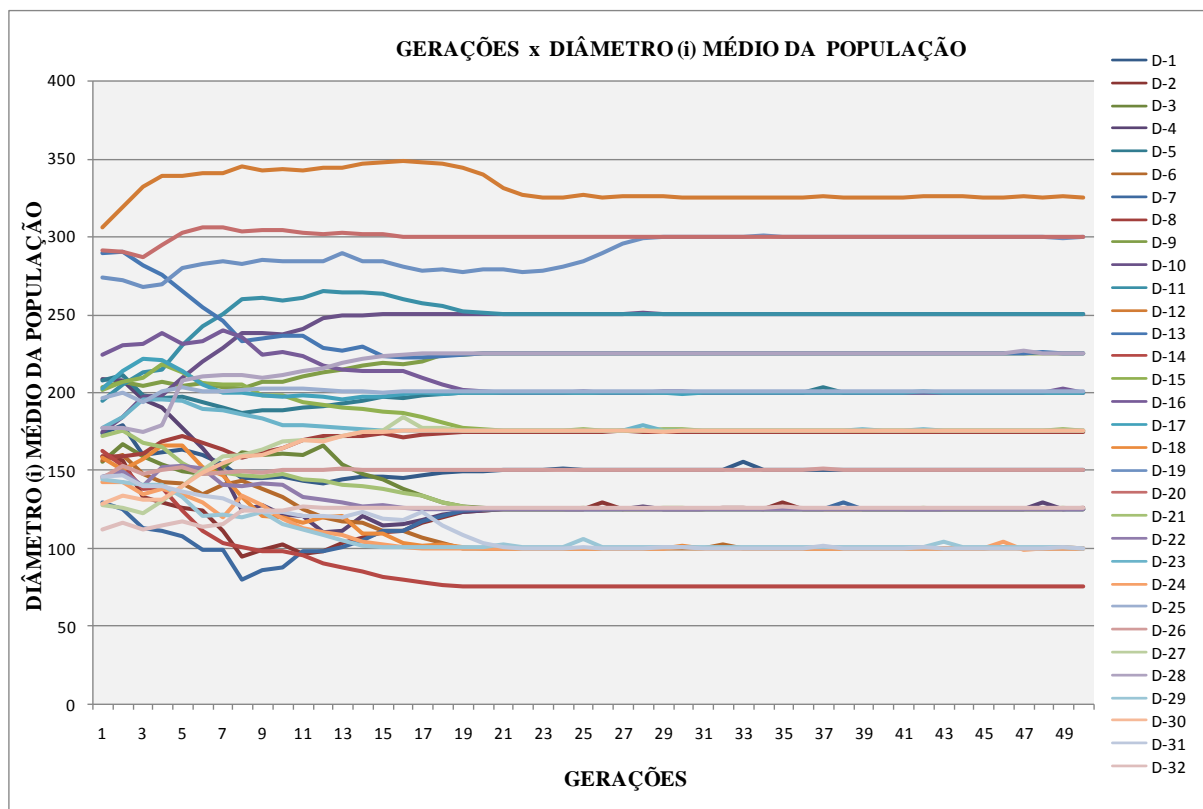


Figura 6.2.13 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 5.

O resultado gráfico mostrado na figura 6.2.13, demonstra o diâmetro médio de cada conduto variando bastante até décima oitava geração e pequenas variações nas gerações posteriores.

Em concordância com o este gráfico é apresentado na tabela 6.2.16, os valores dos coeficientes de convergência para as 50 gerações de processamento, com valores superiores ou bem próximos a 20%, até a décima oitava geração, e com valor nulo pela primeira vez na trigésima sexta geração.

Nota-se que quanto maior o tamanho da população, mais tardiamente (número de gerações) ocorre a redução do coeficiente de convergência, que tem demonstrado ser a própria imagem do comportamento do AG na busca de melhores soluções. Isto é, quanto maior o

valor deste coeficiente, maior a diversidade de soluções e maior a preponderância do operador recombinação para busca de soluções mais aptas.

ITER\TUBOS	FOmin(i)	FOmed(i)	FOmax(i)	Coef.Conv.
1	1,641	943360,037	94317698,139	100,0%
2	1,589	103,466	4138,250	98,5%
3	1,589	14,162	240,735	88,8%
4	1,581	63,573	5303,562	97,5%
5	1,556	4731,323	461736,738	100,0%
6	1,556	175,850	17152,244	99,1%
7	1,470	131,876	12847,796	98,9%
8	1,470	2,739	23,046	46,3%
9	1,470	2,174	13,804	32,4%
10	1,470	2,470	32,104	40,5%
11	1,470	2,162	33,242	32,0%
12	1,470	2,720	75,808	46,0%
13	1,470	56,723	5499,157	97,4%
14	1,470	1,946	13,383	24,5%
15	1,470	1,922	9,081	23,5%
16	1,470	1,706	3,025	13,8%
17	1,470	1,754	5,321	16,2%
18	1,470	1,804	20,043	18,5%
19	1,470	1,563	1,711	6,0%
20	1,470	1,529	1,676	3,9%
21	1,462	1,498	1,859	2,4%
22	1,462	1,474	1,559	0,8%
23	1,462	1,469	1,470	0,4%
24	1,462	1,472	1,605	0,7%
25	1,462	1,531	3,584	4,5%
26	1,462	1,585	7,483	7,7%
27	1,462	1,466	1,599	0,2%
28	1,462	1,497	2,637	2,3%
29	1,462	1,466	1,633	0,2%
30	1,462	1,466	1,601	0,3%
31	1,462	1,464	1,604	0,1%
32	1,462	1,482	2,453	1,3%
33	1,462	1,560	4,734	6,3%
34	1,462	1,463	1,500	0,1%
35	1,462	1,640	10,201	10,9%
36	1,462	1,462	1,462	0,0%
37	1,462	1,494	2,199	2,1%
38	1,462	1,614	9,004	9,4%
39	1,462	1,463	1,515	0,1%
40	1,462	1,462	1,462	0,0%
41	1,462	1,462	1,462	0,0%
42	1,462	1,480	3,120	1,2%
43	1,462	1,505	3,584	2,8%
44	1,462	1,463	1,520	0,1%
45	1,462	1,462	1,462	0,0%
46	1,462	1,504	3,479	2,8%
47	1,462	1,469	1,774	0,5%
48	1,462	1,480	2,346	1,2%
49	1,462	1,476	1,969	0,9%
50	1,450	1,464	1,696	1,0%

Tabela 6.2.16 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 5.

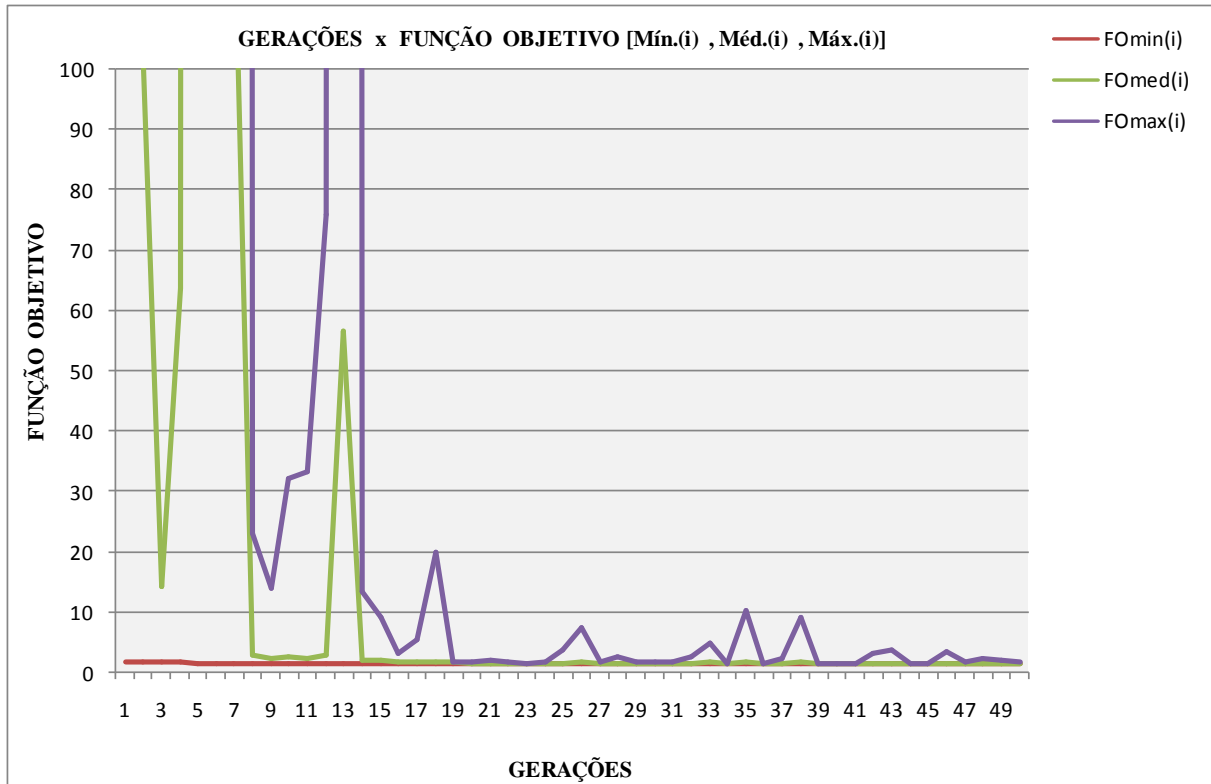


Figura 6.2.14 – Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 5.

Na figura 6.2.14 observa-se ruídos randômicos (tabela 6.2.16) nas primeiras gerações, podendo ser percebido mais intensamente nos valores máximos da função objetiva, com menos intensidade nos valores médios da mesma, no entanto, não podendo afetar os valores mínimos dela.

Caso 5	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32	Função Objetivo
Solução Estimada (PNL) - [A]	250	250	125	250	250	150	200	300	200	200	250	300	350	200	200	250	250	250	300	350	150	100	100	150	150	150	100	200	200	125	125	125	29,742
Melhor Solução Pop.Inicial - [B]	125	50	125	75	250	150	150	150	200	250	275	350	200	100	200	225	200	125	275	300	300	125	150	175	125	150	150	175	100	200	175	125	1,641
Melhor Solução Pop Final - [C]	150	125	125	125	200	100	125	225	225	250	250	325	225	75	175	200	200	100	300	300	0	125	150	175	100	200	150	150	175	100	100	125	1,450
Melhora Absoluta - [C-B]	25	75	50	50	25	50	75	25	25	0	250	25	25	25	25	25	0	200	200	0	0	25	0	0	0	150	150	175	100	200	0	0	0,191
Melhora Relativa % - [C-B]/[C]	16,7	60,0	40,0	40,0	12,5	50,0	60,0	14,3	11,1	0,0	10,0	7,7	11,1	33,3	14,3	12,5	0,0	25,0	8,3	0,0	0,0	20,0	0,0	25,0	0,0	0,0	0,0	11,1	33,3	25,0	0,0	13,183	

Tabela 6.2.17 – Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 5.

A tabela 6.2.17 mostra o resultado dos diâmetros da melhor solução e da função objetivo das populações inicial e final. Resultado este superior aos casos anteriores, ou seja, observa-se que somente 10 dos 32 condutos mantiveram os diâmetros inalterados da melhor solução da população inicial para a melhor da final.

O gráfico mostrado na figura 6.2.15 representa a informação contida na tabela 6.2.17, demonstrando a comparação dos diâmetros das melhores soluções da primeira e da última geração.

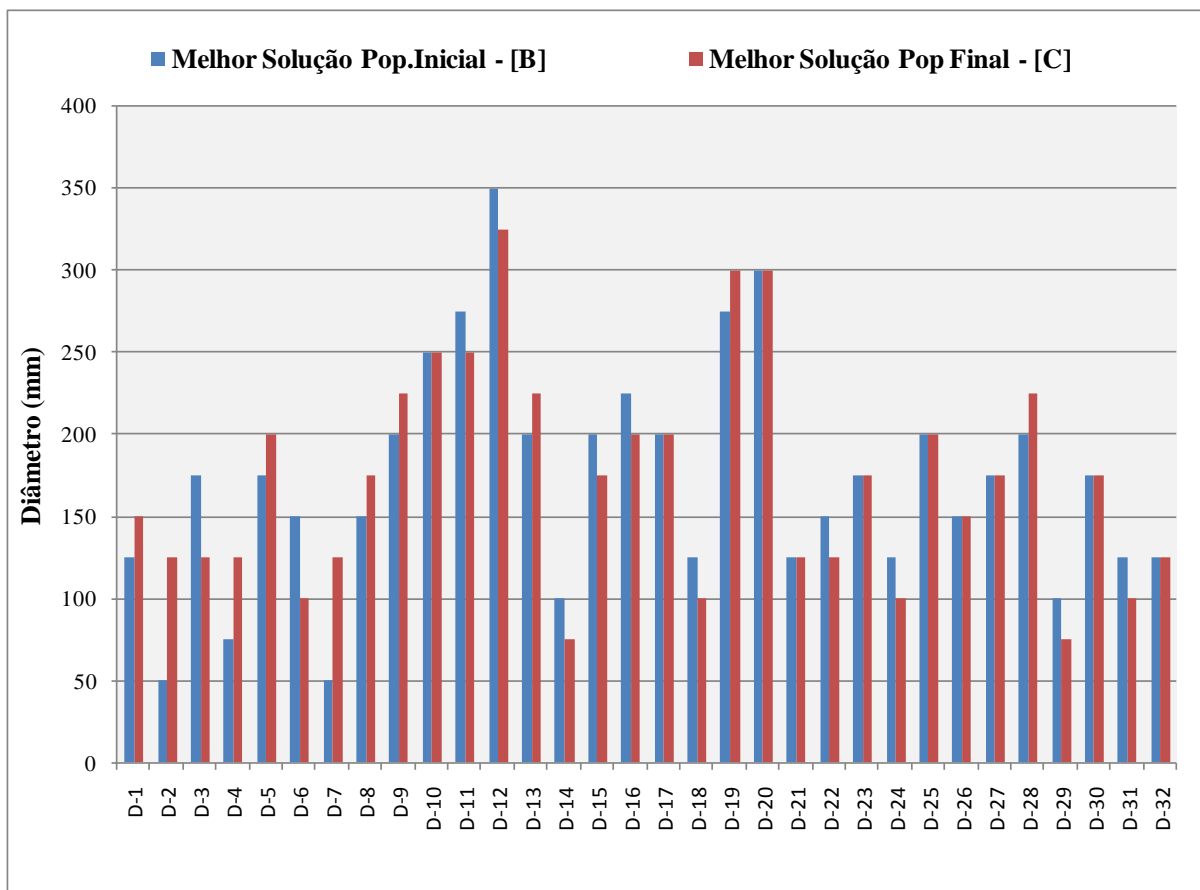


Figura 6.2.15 – Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 5

• *Síntese Analítica do Grupo 1***GRUPO 1**

Nº DA GERAÇÃO	CASO1	CASO2	CASO3	CASO4	CASO5
1	2,817	1,931	1,826	1,873	1,641
2	2,817	1,931	1,826	1,776	1,589
3	2,817	1,931	1,634	1,776	1,589
4	2,748	1,931	1,634	1,776	1,581
5	2,748	1,931	1,628	1,600	1,556
6	2,748	1,931	1,628	1,600	1,556
7	2,748	1,931	1,628	1,600	1,470
8	2,748	1,931	1,628	1,592	1,470
9	2,748	1,931	1,611	1,592	1,470
10	2,748	1,931	1,611	1,550	1,470
11	2,748	1,931	1,611	1,550	1,470
12	2,748	1,931	1,611	1,550	1,470
13	2,748	1,931	1,611	1,550	1,470
14	2,676	1,931	1,611	1,542	1,470
15	2,676	1,931	1,611	1,542	1,470
16	2,676	1,895	1,611	1,529	1,470
17	2,676	1,767	1,611	1,529	1,470
18	2,676	1,767	1,611	1,529	1,470
19	2,676	1,767	1,611	1,529	1,470
20	2,676	1,767	1,611	1,529	1,470
21	2,676	1,767	1,611	1,529	1,462
22	2,676	1,767	1,611	1,529	1,462
23	2,676	1,767	1,611	1,529	1,462
24	2,676	1,767	1,611	1,529	1,462
25	2,676	1,767	1,611	1,529	1,462
26	2,676	1,726	1,611	1,529	1,462
27	2,676	1,726	1,611	1,529	1,462
28	2,676	1,726	1,611	1,529	1,462
29	2,635	1,726	1,611	1,529	1,462
30	2,635	1,726	1,611	1,529	1,462
31	2,635	1,726	1,611	1,529	1,462
32	2,635	1,726	1,611	1,529	1,462
33	2,635	1,726	1,611	1,529	1,462
34	2,451	1,726	1,611	1,529	1,462
35	2,451	1,726	1,571	1,529	1,462
36	2,451	1,726	1,571	1,529	1,462
37	2,451	1,726	1,571	1,529	1,462
38	2,451	1,726	1,571	1,529	1,462
39	2,451	1,726	1,571	1,529	1,462
40	2,451	1,726	1,571	1,529	1,462
41	2,451	1,726	1,571	1,529	1,462
42	2,451	1,726	1,571	1,529	1,462
43	2,451	1,726	1,571	1,529	1,462
44	2,451	1,726	1,571	1,529	1,462
45	2,451	1,726	1,571	1,529	1,462
46	2,451	1,726	1,571	1,529	1,462
47	2,451	1,726	1,571	1,529	1,462
48	2,451	1,726	1,571	1,529	1,462
49	2,451	1,726	1,570	1,529	1,462
50	2,451	1,726	1,570	1,529	1,450

Tabela 6.2.18 – Valores da função objetivo da melhor solução a cada geração nos casos do grupo 1

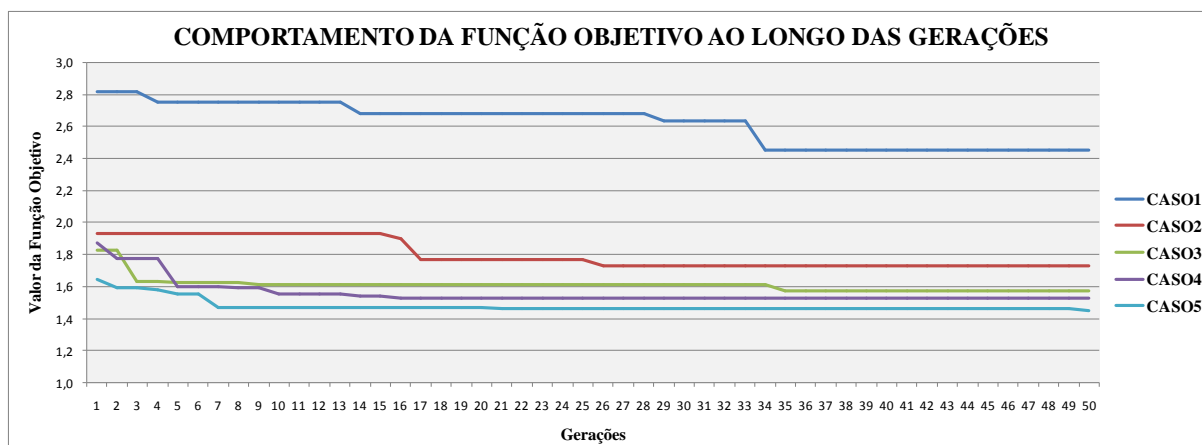


Figura 6.2.16 – Comparação do comportamento da função objetiva ao longo das gerações para os casos do grupo 1

Da figura 6.2.16 que representa a tabela 6.2.18, constata-se algumas relações tácitas esperadas. Dentre elas que, o valor da função objetivo (minimização) da melhor solução da população inicial é inversamente proporcional ao tamanho da população estabelecida, ou seja, quanto maior o tamanho da população, maior a chance de se obter uma solução inicial mais apta (função objetivo com menor valor) gerada aleatoriamente.

Outra relação verificada, sendo consequência da anterior, é que, se a chance de se conseguir uma solução inicial mais apta é maior para tamanhos de populações maiores, nestas há uma convergência mais cedo às soluções melhores e nas gerações seguintes o melhoramento será em menor escala. Enquanto para tamanhos de populações menores, os melhoramentos das soluções acontecem mais tardiamente ao longo das gerações.

E obviamente, na mesma linha de raciocínio constata-se que quanto maior o tamanho da população, mantendo-se os demais parâmetros constantes (análise de sensibilidade), mais aptas são as soluções encontradas.

Porém o aumento do tamanho da população acresce o esforço computacional tanto no tempo de processamento quanto como na capacidade de memória para armazenamento de dados.

O objetivo desta análise de sensibilidade é encontrar para este parâmetro (tamanho da população de soluções) um ponto de equilíbrio do AG entre alentos antagônicos que são a



convergência e qualidade final das soluções e o esforço computacional. Este ponto de equilíbrio resulta no melhor desempenho associado ao tempo de processamento, esforço computacional e proximidade ou convergência da solução ao resultado ótimo do problema.

PARÂMETROS ANALISADOS	CASO1	CASO2	CASO3	CASO4	CASO5
Tamanho da População de Soluções - [A]	10	20	30	50	100
Tempo de Processamento (min) - [B]	5,37	12,78	24,38	56,38	194,32
Tamanho do Arquivo (Kb) - [C]	3,257	4,495	8,589	14,064	27,703
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	34	26	49	16	50
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	2,817	1,931	1,826	1,873	1,641
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	2,451	1,726	1,570	1,529	1,450
Melhora no Valor da Objetivo [G]=[E]-[F]	0,366	0,205	0,256	0,344	0,191
Gradiente de Melhora no Valor da Função Objetivo [H%]=[G]/[D]	1,1%	0,8%	0,5%	2,2%	0,4%

Tabela 6.2.19 – Valores dos parâmetros analisados nas simulações dos casos do grupo 1.

Obs.: Processamento executado na máquina cuja configuração é:

Processador – 3400+ ; 795 MHz ; 480 MB de RAM.

A seguir são representadas graficamente as análises individuais dos parâmetros da tabela 6.2.19.

#### - Tempo de Processamento

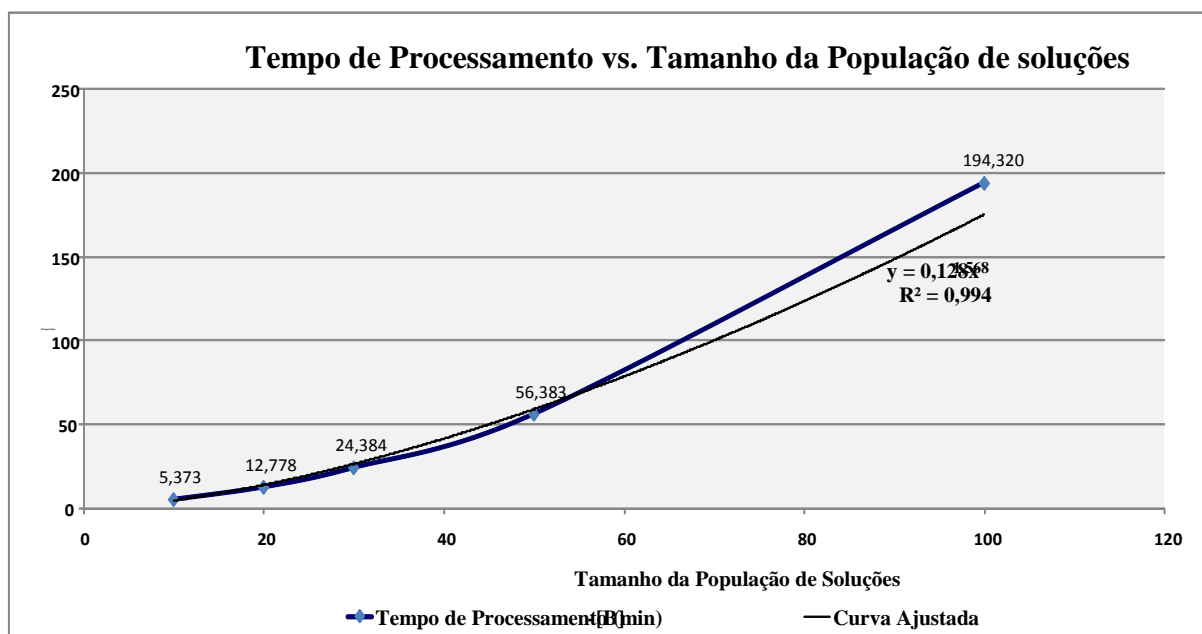


Figura 6.2.17 – Comportamento do tempo de processamento requerido nas simulações dos casos do grupo 1

#### - Tamanho do Arquivo

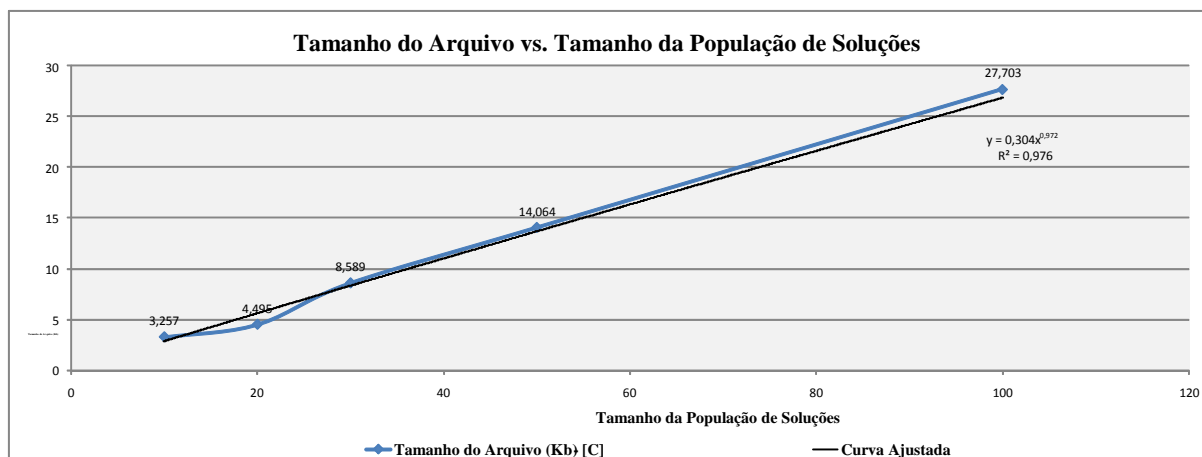


Figura 6.2.18 – Tamanhos dos arquivos resultados das simulações dos casos do grupo 1

#### - Valor da Função Objetivo da Melhor Solução da População Final

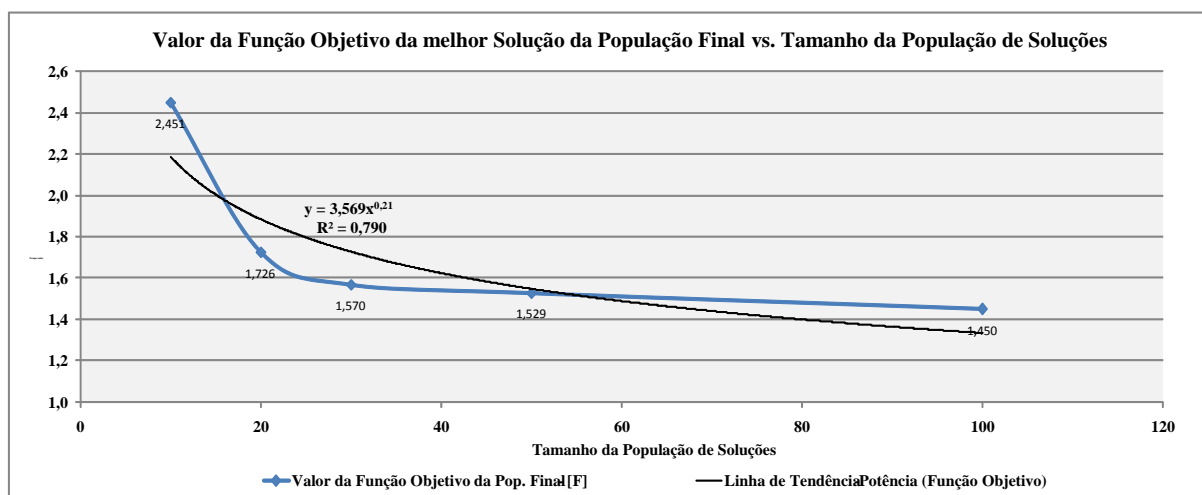


Figura 6.2.19 – Valores da função objetivo da melhor solução da população final dos casos do grupo 1

A tabela 6.2.20 é uma continuação da tabela 6.2.19, analisando os parâmetros relativamente à melhor solução encontrada (caso 5), porém com maior esforço computacional.

As fórmulas nelas contidas são auto-explicativas. Em suma considera-se o desempenho do esforço computacional (média aritmética dos percentuais de desempenho relativos a tempo de processamento e tamanho de arquivo) contrapondo com o desempenho de convergência ou proximidade da melhor solução. A resultante destas forças antagônicas é denominada de desempenho efetivo.

ANÁLISE RELATIVA À MELHOR SOLUÇÃO ENCONTRADA	CASO1	CASO2	CASO3	CASO4	CASO5
Tamanho da População de Soluções - [A]	10	20	30	50	100
Percentual do Tempo de Proc. Relativo a Melhor Solução (TPMS=194,32min) - $[I\%]=[B]/[TPMS]$	2,8%	6,6%	12,5%	29,0%	100,0%
Percentual do Tamanho do Arquivo Relativo a Melhor Solução (TAMS=27,703Kb) - $[J\%]=[C]/[TAMS]$	11,8%	16,2%	31,0%	50,8%	100,0%
Percentual Médio de Desempenho Relativo ao Esforço Computacional - $[K\%]=([I\%]+[J\%])/2$	7,3%	11,4%	21,8%	39,9%	100,0%
Percentual de Desempenho de Convergência ou Proximidade do Valor da Função Objetivo Relativa a Melhor Solução (PFOMS=1,450) - $[L\%]=([F]-[PFOMS])/[PFOMS]$	69,0%	19,0%	8,3%	5,4%	0,0%
Percentual de Desempenho Efetivo - $[M\%]=[K\%]+[L\%]$	76,3%	30,4%	30,0%	45,3%	100,0%

Tabela 6.2.20 – Valores dos parâmetros analisados relativos à melhor solução (caso 5) das simulações do grupo 1.

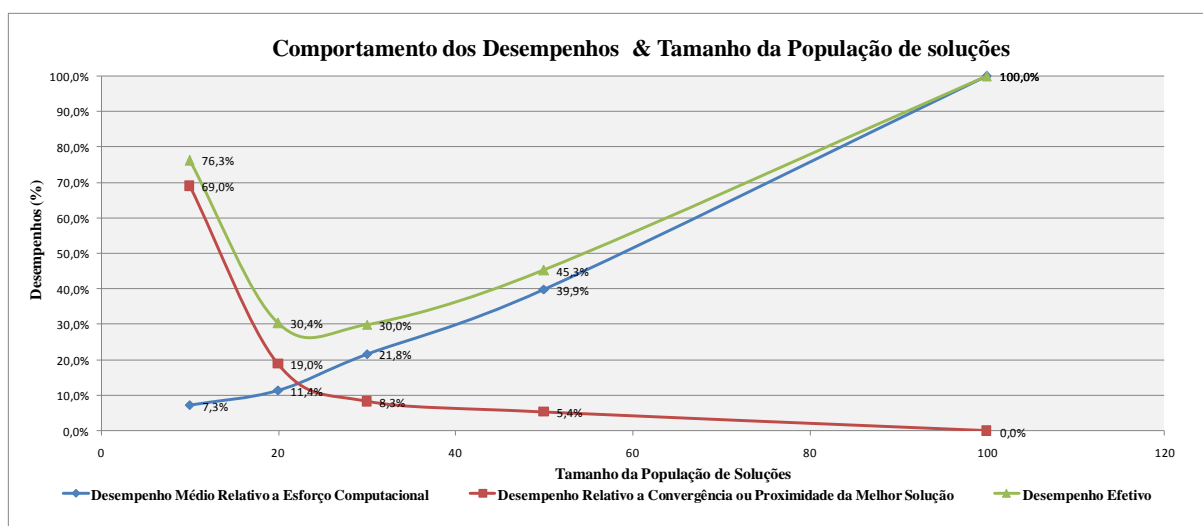


Figura 6.2.20 – Comportamento dos Desempenhos Relativos à melhor solução das simulações dos casos do grupo 1

Aqui compete uma explicação sobre a conotação da palavra desempenho, que nesta análise é a de custo. Ou seja, o percentual de desempenho (custo) de convergência ou proximidade para a melhor solução é zero, e tem este custo aumentado à medida que a solução se distancia deste ponto.

O mesmo raciocínio se aplica ao percentual médio do esforço computacional. Para encontrar a melhor solução realizou-se 100% do custo do esforço computacional, sendo este custo diminuído à medida que as soluções se distanciam desta, ou seja, quanto mais inferior é a solução menos esforço computacional é requerido para encontrá-la.

O gráfico mostrado na figura 6.2.20 representa os dados da tabela 6.2.20 e revela que o tamanho da população que apresenta melhor desempenho efetivo é a do caso 3 com trinta soluções consumindo 21,8% do esforço computacional requerido para encontrar a melhor solução (*caso-5*) e encontrando uma solução 8,3% menos apta do que esta, apresentando um desempenho efetivo de 30,0%.

### 6.2.2 Grupo 2 – Parâmetro em Análise Número de Gerações

Para os cinco casos analisados deste grupo o parâmetro *Número de Gerações* é o único variável, os demais não se alteram sendo os valores lhes atribuídos apresentados à tabela 6.2.2/G2.

Casos	Núm. de Gerações	Tamanho da População de Soluções	Prob. Cruz.(%)	Prob. Mut.(%)	Adoção de Elitismo?	Tipo de Cruz.	Adoção de Coef. de Conv.?	Adoção de Crit. Parada Antecipada?
	20	30	90	0,2	Sim	Clássico (1pt de corte)	Não	Não
7	30							
8	50							
9	100							
10	200							

Tabela 6.2.21 – Parâmetros adotados do AG para o grupo 2.

#### • Caso 6- Resultados

SOLUÇÕES	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32
1	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
2	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
3	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
4	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
5	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
6	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
7	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
8	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
9	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
10	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
11	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
12	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
13	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
14	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
15	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
16	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
17	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
18	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
19	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
20	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
21	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
22	150	100	175	175	200	125	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
23	150	100	175	175	200	350	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
24	150	100	175	175	200	350	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
25	150	100	175	175	200	350	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
26	150	100	175	175	200	350	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
27	150	100	175	175	200	350	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
28	150	100	175	175	200	350	100	175	200	225	225	300	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	75	175	200	175	75	125	125
29	175	150	175	225	200	125	100	175	200	225	225	250	300	100	175	200	200	300	350	350	75	175	250	100	175	75	175	200	175	100	125	125
30	175	150	175	225	200	125	100	175	200	225	225	250	300	100	175	200	200	300	350	350	75	175	250	100	175	75	175	200	175	100	125	125
Diâm. Médio (mm)	152	103	175	178	200	170	100	175	200	225	225	297	253	100	175	200	130	277	327	350	52	175	250	100	152	75	175	200	175	77	125	125

Tabela 6.2.22 – Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 6.

Neste caso doze condutos apresentam valores diferentes para as trinta soluções da ultima população. Os demais condutos convergiram para valores semelhantes em todas as soluções da população final.

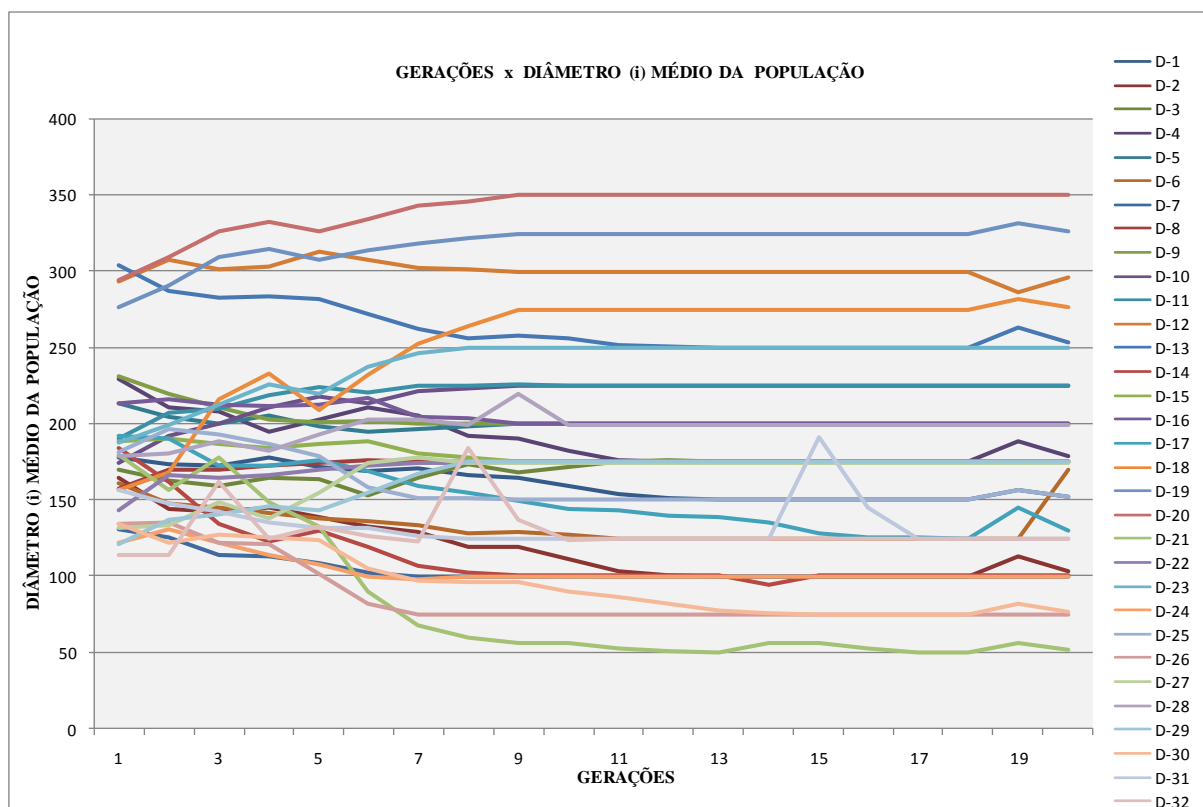


Figura 6.2.21 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 6.

O resultado gráfico apresentado na figura 6.2.21 demonstra o diâmetro médio de cada conduto variando bastante até a nona geração e pequenas variações nas gerações posteriores.

Em concordância com este gráfico é apresentado na tabela 6.2.23 os valores dos coeficientes de convergência para as 20 gerações de processamento, com valores superiores a 20% até a nona geração, e atingindo o valor nulo à geração décima oitava.

ITER\TUBOS	F0min(i)	F0med(i)	F0max(i)	Coef.Conv.
1	1,948	24,425	288,792	92,0%
2	1,948	20,326	299,238	90,4%
3	1,948	22,935	392,023	91,5%
4	1,929	62,218	1519,852	96,9%
5	1,929	6,512	51,351	70,4%
6	1,805	2,533	8,052	28,7%
7	1,805	2,066	2,519	12,6%
8	1,789	3,540	9,549	49,5%
9	1,789	2,728	14,077	34,4%
10	1,742	1,854	2,114	6,0%
11	1,742	1,801	1,929	3,3%
12	1,742	1,782	1,868	2,2%
13	1,742	1,770	1,805	1,6%
14	1,742	1,769	1,816	1,5%
15	1,742	2,937	5,527	40,7%
16	1,742	2,093	5,235	16,8%
17	1,742	1,744	1,789	0,1%
18	1,742	1,742	1,742	0,0%
19	1,742	3,603	8,719	51,6%
20	1,742	2,908	8,719	40,1%

Tabela 6.2.23 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 6.

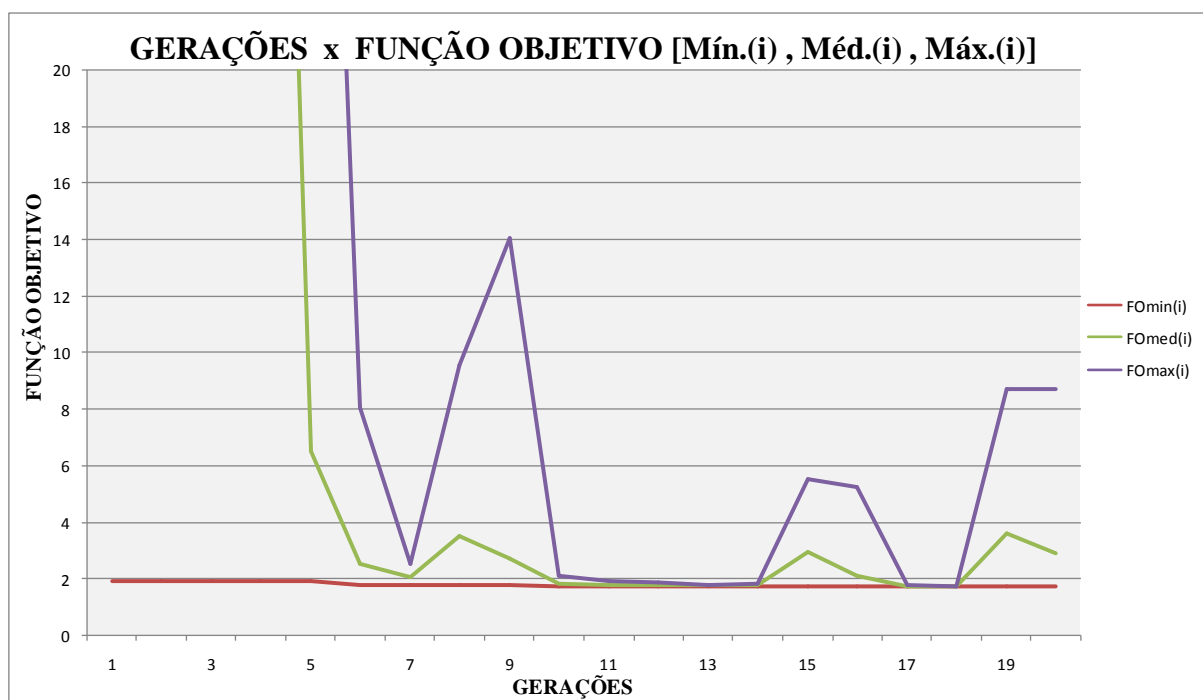


Figura 6.2.22 – Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 6.

Neste caso observamos ruídos randômicos (tabela 6.2.23) nas primeiras gerações, podendo ser percebido mais intensamente nos valores máximos da função objetiva, com menos intensidade nos valores médios da mesma, no entanto, não podendo afetar os valores mínimos dela.

Caso 6	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32	Função Objetivo	
Solução Estimada (PNL) - [A]	250	250	125	250	250	150	100	200	300	200	250	300	350	200	200	250	250	250	300	350	150	100	300	150	150	150	75	100	200	200	125	125	125	29,742
Melhor Solução Pop.Inicial - [B]	150	100	175	175	175	150	100	175	200	200	225	225	250	100	175	200	150	275	325	325	50	175	250	100	150	150	75	175	175	200	100	125	125	1,948
Melhor Solução Pop.Final - [C]	150	100	175	175	200	125	100	175	200	200	225	225	250	100	175	200	125	275	325	350	50	175	250	100	150	150	75	200	200	175	75	125	125	1,742
Melhora Absoluta - [C-B]	0	0	0	0	25	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0,205	
Melhora Relativa % - [C-B]/[C]	0,0	0,0	0,0	0,0	12,5	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33,3	0,0	0,0	11,777	

Tabela 6.2.24 – Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 6.

A tabela 6.2.24 mostra o resultado dos diâmetros da melhor solução e da função objetivo das populações inicial e final. Demonstrando variação somente em quatro condutos os demais mantiveram os diâmetros inalterados da melhor solução da população inicial para a melhor da final.

O gráfico mostrado na figura 6.2.23 representa a informação contida nesta tabela demonstrando a comparação dos diâmetros das melhores soluções da primeira e da última geração.

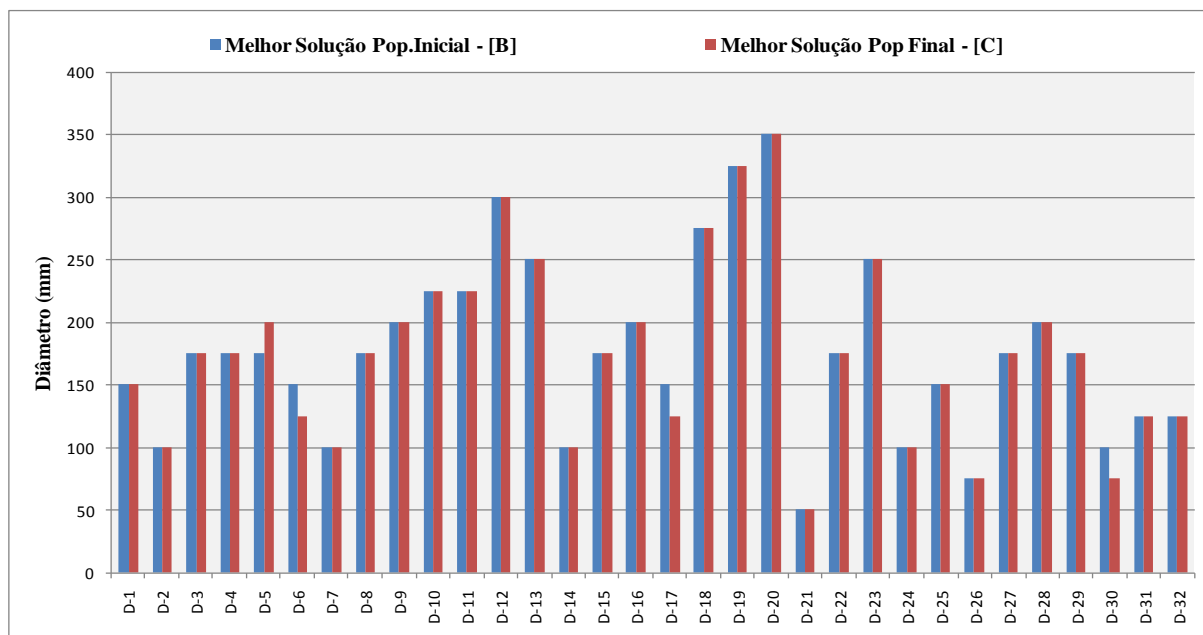


Figura 6.2.23 – Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 6.



• *Caso 7- Resultados*

SOLUÇÕES	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32
1	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	300	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
2	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	300	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
3	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	300	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
4	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	300	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
5	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	300	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
6	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	300	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
7	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	300	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
8	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	300	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
9	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	300	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
10	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	300	300	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
11	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	300	300	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
12	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
13	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
14	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
15	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
16	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
17	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
18	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
19	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
20	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
21	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
22	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
23	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
24	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
25	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
26	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
27	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
28	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
29	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
30	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	275	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50
Diâm. Médio (mm)	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	277	284	150	150	200	75	175	125	125	200	150	125	150	50

Tabela 6.2.25 – Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 7.

Neste caso somente dois condutos apresentam valores diferentes para as trinta soluções da ultima população, demonstrando um quadro de convergência maior que no caso anterior.

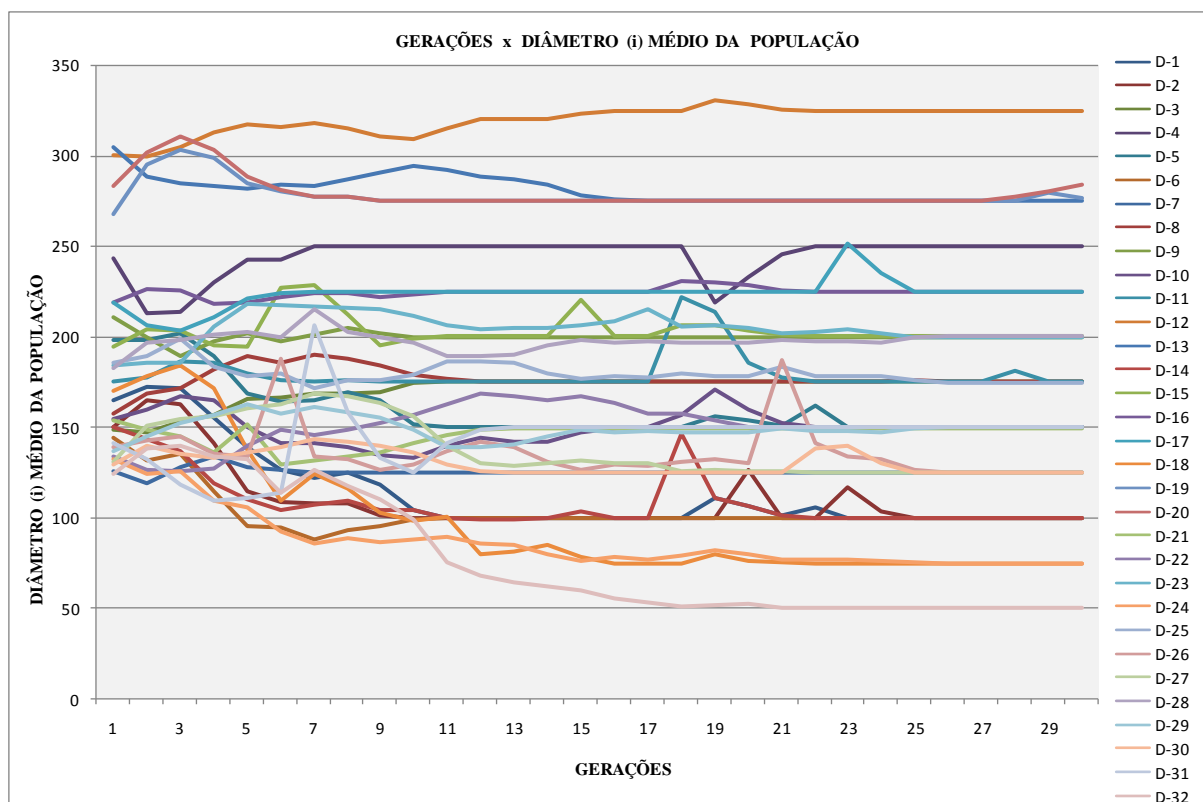


Figura 6.2.24 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 7.

O resultado gráfico mostrado na figura 6.2.24, demonstra o diâmetro médio de cada conduto variando bastante também até a nona geração e pequenas variações nas gerações posteriores.

A tabela 6.2.26 apresenta os valores dos coeficientes de convergência para as 30 gerações de processamento, com valores superiores a 20% até a nona geração, e atingindo valor nulo à vigésima sexta iteração.

<b>ITER\TUBOS</b>	<b>F0min(i)</b>	<b>F0med(i)</b>	<b>F0max(i)</b>	<b>Coef.Conv.</b>
1	1,716	128,559	1722,985	98,7%
2	1,716	71,533	654,302	97,6%
3	1,716	579,705	13439,330	99,7%
4	1,673	4,427	16,657	62,2%
5	1,673	2,889	13,821	42,1%
6	1,673	6,463	98,830	74,1%
7	1,673	114,259	3292,407	98,5%
8	1,673	3,388	7,147	50,6%
9	1,663	2,338	6,309	28,9%
10	1,639	1,900	3,958	13,7%
11	1,639	1,844	5,461	11,1%
12	1,611	1,689	1,795	4,6%
13	1,611	1,669	1,754	3,5%
14	1,611	1,635	1,677	1,5%
15	1,588	1,681	2,039	5,5%
16	1,545	1,616	1,686	4,4%
17	1,545	1,613	1,869	4,2%
18	1,545	2,005	2,706	22,9%
19	1,545	1,699	2,205	9,1%
20	1,545	4,189	24,565	63,1%
21	1,545	2,159	3,791	28,4%
22	1,545	2,012	3,791	23,2%
23	1,545	2,225	4,862	30,6%
24	1,545	1,713	4,551	9,8%
25	1,545	1,549	1,594	0,3%
26	1,545	1,545	1,545	0,0%
27	1,545	1,545	1,545	0,0%
28	1,537	1,548	1,561	0,7%
29	1,537	1,544	1,548	0,5%
30	1,537	1,543	1,545	0,4%

Tabela 6.2.26 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 7.

Observe-se a semelhança do comportamento do coeficiente de convergência ao longo das gerações nos casos 6 e 7.

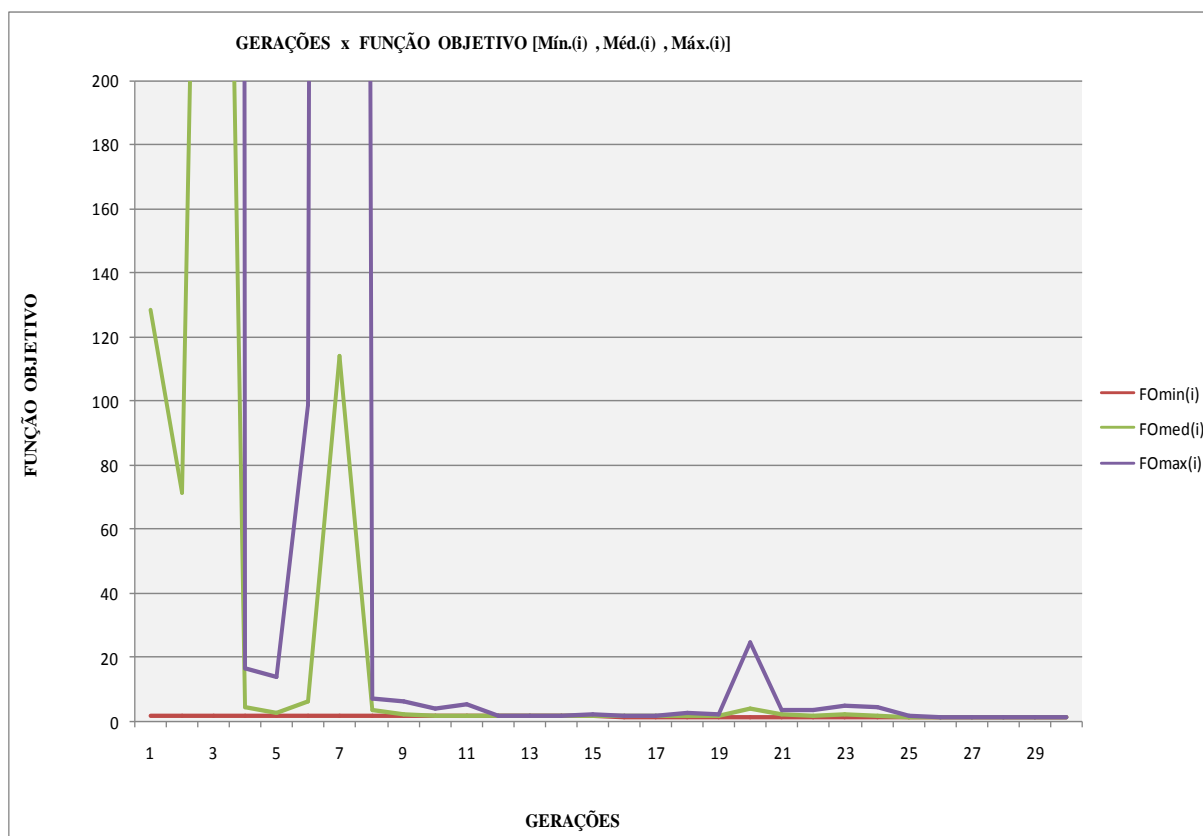


Figura 6.2.25 – Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 7.

Observação comum a todos os casos a presença de ruídos randômicos (tabela 6.2.26) nas primeiras gerações, percebido mais intensamente nos valores máximos da função objetiva, com menos intensidade nos valores médios da mesma, no entanto, não podendo afetar os valores mínimos dela.

Caso 7	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32	Função Objetivo
Solução Estimada (PNL) - [A]	250	250	125	250	250	150	100	200	300	200	250	300	350	200	200	250	250	250	300	350	150	100	300	150	150	100	100	200	200	125	125	125	29,742
Melhor Solução Pop.Inicial - [B]	100	100	175	250	150	75	125	200	200	150	175	325	275	100	175	200	225	125	275	275	275	225	300	75	150	100	200	225	175	150	75	150	1,716
Melhor Solução Pop Final - [C]	100	100	175	250	150	100	125	175	200	150	175	325	275	100	200	225	225	75	275	300	300	200	225	75	175	125	125	200	200	125	125	50	1,537
Melhora Absoluta - [C-B]	0	0	0	0	0	25	0	25	0	0	0	0	0	0	25	25	0	50	0	0	25	25	0	0	0	0	75	25	25	75	100	0,179	
Melhora Relativa % - [C-B]/[C]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	0,0	14,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,5	11,1	0,0	66,7	0,0	8,3	33,3	16,7	12,5	0,0	14,3	20,0	60,0	12,5	50,0	200,0	11,646		

Tabela 6.2.27 – Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 7.

A tabela 6.2.27 demonstra a modificação em dezessete condutos (pouco mais da metade da rede), um resultado bem superior ao caso anterior. O motivo que leva a este melhor resultado é um tanto obvio, o maior número de gerações no AG busca diâmetros que melhorem a aptidão alterando uma quantidade maior de diâmetros em relação à melhor solução da população inicial, embora a melhora relativa no valor da função objetivo seja de 11,65% aproximadamente igual à do caso anterior.

O gráfico, mostrado na figura 6.2.26, representa a informação contida na tabela 6.2.27 demonstrando a comparação dos diâmetros das melhores soluções da primeira e da última geração.

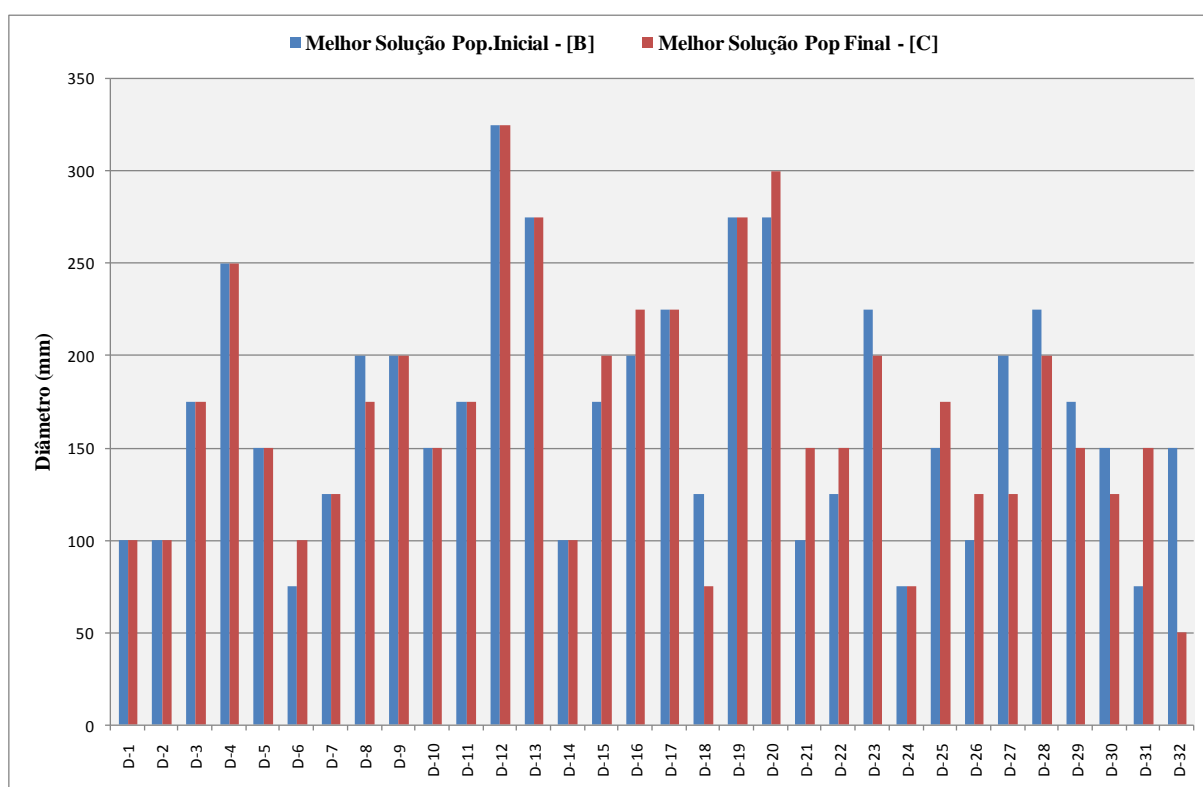


Figura 6.2.26 – Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 7.

• *Caso 8- Resultados*

SOLUÇÕES	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32
1	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
2	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
3	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
4	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
5	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
6	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
7	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
8	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
9	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
10	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
11	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
12	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
13	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
14	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
15	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
16	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
17	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
18	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
19	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
20	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
21	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
22	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
23	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
24	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
25	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
26	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
27	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
28	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
29	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
30	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150
Diâm. Médio (mm)	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	175	75	150

Tabela 6.2.28 – Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 8.

A tabela 6.2.28 apresenta todos os trinta e dois condutos convergindo para valores de diâmetros semelhantes para as trinta soluções na ultima população, o que demonstra um já esperado quadro de convergência superior aos casos anteriores, uma vez que mais gerações foram processadas.

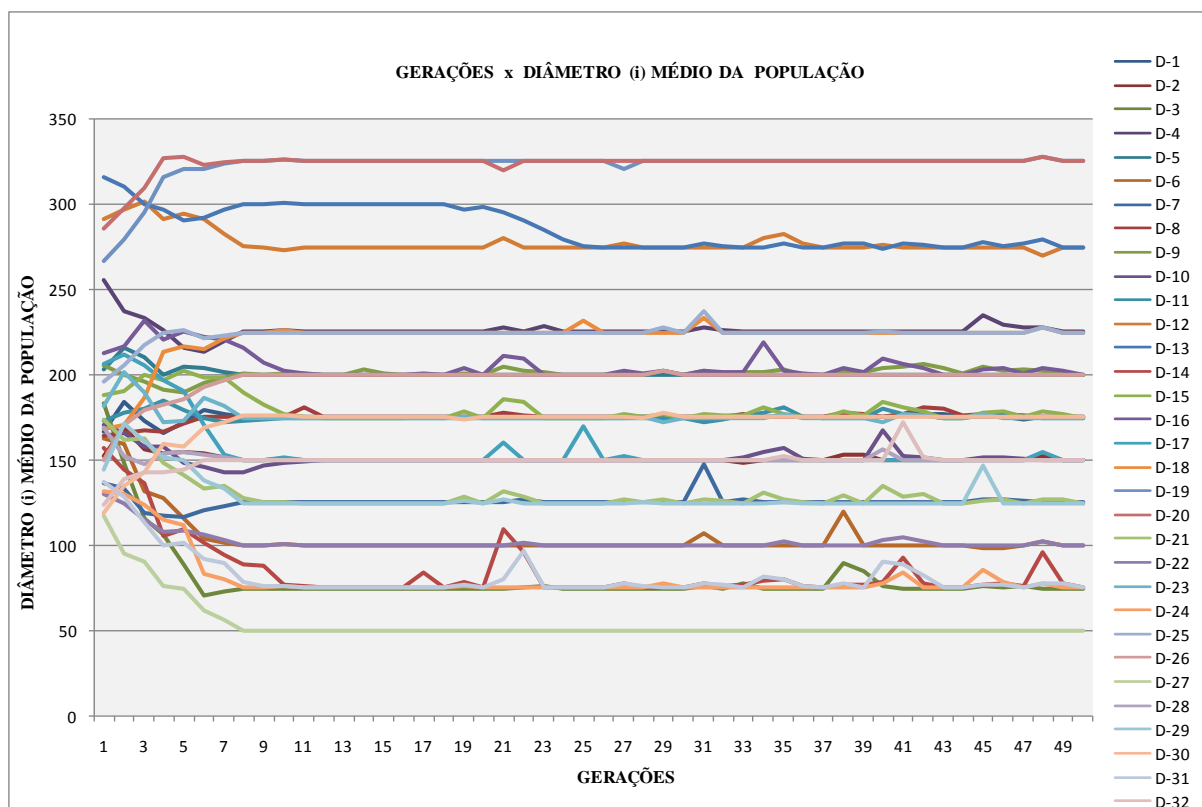


Figura 6.2.27 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 8.

O resultado gráfico mostrado na figura 6.2.27, demonstra o diâmetro médio de cada conduto variando bastante nas gerações iniciais e a partir da nona geração quase não se alterando.

A tabela 6.2.29 apresenta o comportamento do coeficiente de convergência e dos valores mínimos, médios e máximos da função objetivo ao longo das 50 gerações de processamento. Observa-se a redução drástica, em relação aos casos anteriores, do coeficiente de convergência atingindo valor nulo à geração décima segunda.

Nenhum motivo óbvio é encontrado para justificar este fato, cabendo à aleatoriedade intrínseca ao processo, que neste caso ocasiona a redução do coeficiente de convergência prematuramente.

<b>ITER\TUBOS</b>	<b>FOMin(i)</b>	<b>FOMed(i)</b>	<b>FOMax(i)</b>	<b>Coef.Conv.</b>
<b>1</b>	1,692	184,845	4760,496	99,1%
<b>2</b>	1,692	263,355	7159,592	99,4%
<b>3</b>	1,692	11,579	97,571	85,4%
<b>4</b>	1,574	4,311	23,467	63,5%
<b>5</b>	1,574	2,920	9,335	46,1%
<b>6</b>	1,574	1,876	3,195	16,1%
<b>7</b>	1,574	1,739	2,170	9,5%
<b>8</b>	1,574	1,628	1,818	3,3%
<b>9</b>	1,574	1,613	1,987	2,5%
<b>10</b>	1,574	1,662	3,857	5,3%
<b>11</b>	1,574	1,609	2,613	2,2%
<b>12</b>	1,574	1,574	1,574	0,0%
<b>13</b>	1,574	1,574	1,574	0,0%
<b>14</b>	1,574	1,588	1,679	0,9%
<b>15</b>	1,574	1,577	1,679	0,2%
<b>16</b>	1,574	1,574	1,574	0,0%
<b>17</b>	1,574	1,743	6,658	9,7%
<b>18</b>	1,574	1,574	1,574	0,0%
<b>19</b>	1,574	2,012	14,098	21,8%
<b>20</b>	1,538	1,571	1,574	2,1%
<b>21</b>	1,538	2,030	3,980	24,2%
<b>22</b>	1,538	1,973	5,086	22,0%
<b>23</b>	1,538	2,266	12,279	32,1%
<b>24</b>	1,538	1,545	1,574	0,5%
<b>25</b>	1,538	1,988	5,650	22,6%
<b>26</b>	1,538	1,538	1,538	0,0%
<b>27</b>	1,538	1,570	1,855	2,0%
<b>28</b>	1,538	1,552	1,970	0,9%
<b>29</b>	1,538	1,614	2,296	4,7%
<b>30</b>	1,538	1,538	1,538	0,0%
<b>31</b>	1,538	3,196	21,764	51,9%
<b>32</b>	1,538	1,559	1,928	1,3%
<b>33</b>	1,538	1,563	1,908	1,6%
<b>34</b>	1,538	1,679	2,136	8,4%
<b>35</b>	1,538	1,656	2,198	7,1%
<b>36</b>	1,538	1,548	1,850	0,7%
<b>37</b>	1,538	1,538	1,538	0,0%
<b>38</b>	1,538	3,667	21,764	58,1%
<b>39</b>	1,538	1,602	1,914	4,0%
<b>40</b>	1,538	2,307	9,043	33,3%
<b>41</b>	1,538	2,402	9,785	36,0%
<b>42</b>	1,538	1,671	2,198	8,0%
<b>43</b>	1,538	1,562	1,652	1,6%
<b>44</b>	1,538	1,542	1,652	0,2%
<b>45</b>	1,538	1,986	4,351	22,6%
<b>46</b>	1,538	1,620	2,411	5,1%
<b>47</b>	1,538	1,617	2,171	4,9%
<b>48</b>	1,538	2,165	5,713	29,0%
<b>49</b>	1,538	1,563	1,786	1,6%
<b>50</b>	1,538	1,538	1,538	0,0%

Tabela 6.2.29 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 8.



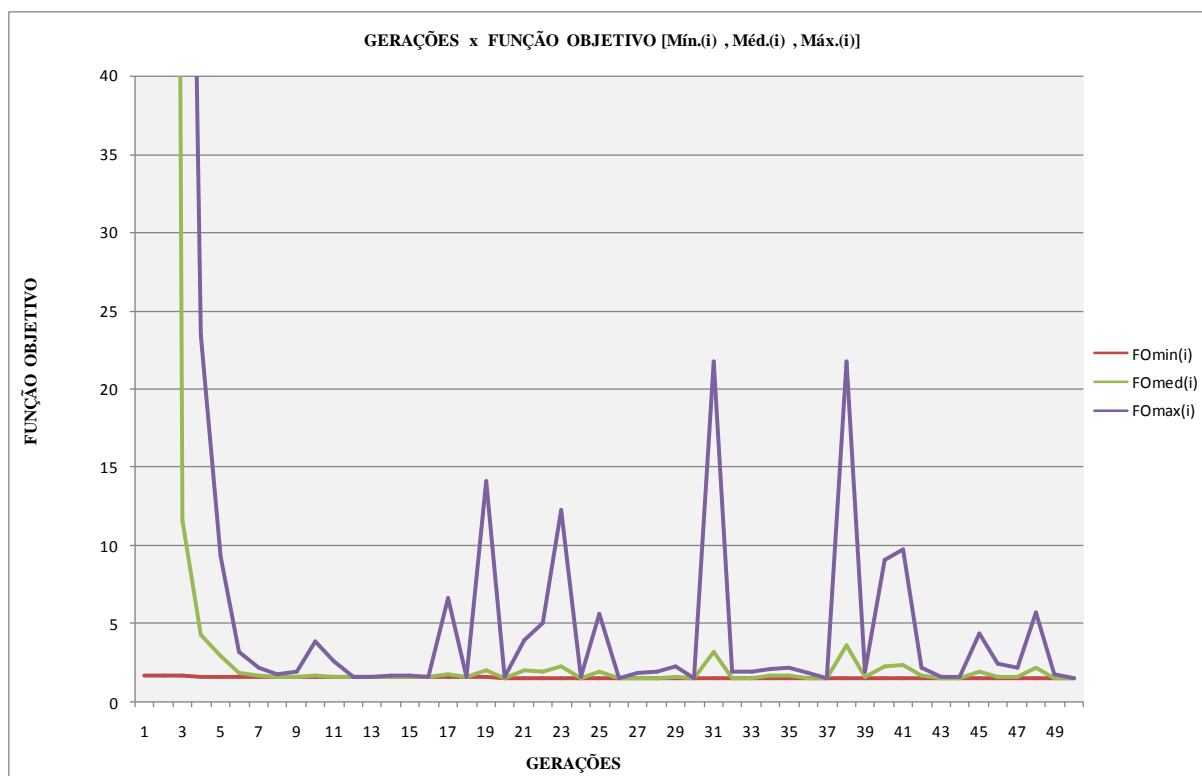


Figura 6.2.28 – Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 8.

Novamente observando-se a tabela 6.2.29 e a figura 6.2.28 nota-se nas primeiras iterações a presença de ruídos randômicos, percebido mais intensamente nos valores máximos da função objetiva, com menos intensidade nos valores médios da mesma, no entanto, não podendo afetar os valores mínimos dela.

Caso 8	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32	Função Objetivo
Solução Estimada (PNL) - [A]	250	250	125	250	250	150	100	200	300	200	250	300	350	200	200	250	250	250	300	350	350	150	100	300	150	150	100	200	200	125	125	125	29,742
Melhor Solução Pop.Inicial - [B]	175	150	75	225	200	100	125	175	200	125	150	250	300	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	75	150	1,692	
Melhor Solução Pop.Final - [C]	175	150	75	225	200	100	125	175	200	150	175	275	275	75	175	200	150	225	325	325	125	100	175	75	225	200	50	150	125	75	150	1,538	
Melhora Absoluta - [C-B]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	25	25	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,154	
Melhora Relativa % - [C-B]/[C]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,7	14,3	9,1	9,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,982	

Tabela 6.2.30 – Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 8.

A tabela 6.2.30 demonstra a modificação somente em quatro condutos, um resultado bem inferior ao caso anterior, mostrando que o aumento do número de gerações não

é o único fator que resulta numa modificação em um maior número de diâmetros em relação à melhor solução da população inicial.

Observa-se neste caso que o valor da função objetivo da melhor solução da população inicial (1,692) é bem menor, portanto mais apto (minimização) que as melhores soluções iniciais encontradas no caso 6 (1,948) e no caso 7 (1,716), reduzindo as chances de se obter resultados melhores mesmo com um número maior de iterações processadas.

Isto não significa que diâmetros não estejam sendo testados, pois as demais soluções que não a melhor, vão testando diferentes diâmetros para a rede, sem contudo, encontrar valor mais apto que a melhor solução.

Porém mesmo modificando somente os diâmetros de quatro condutos da rede a melhora relativa no valor da função objetivo é de 9,982% aproximadamente igual aos valores dos casos anteriores.

O gráfico mostrando na figura 6.2.29 representa a informação contida na tabela 6.2.30, demonstrando a comparação dos diâmetros das melhores soluções da primeira e da última geração.

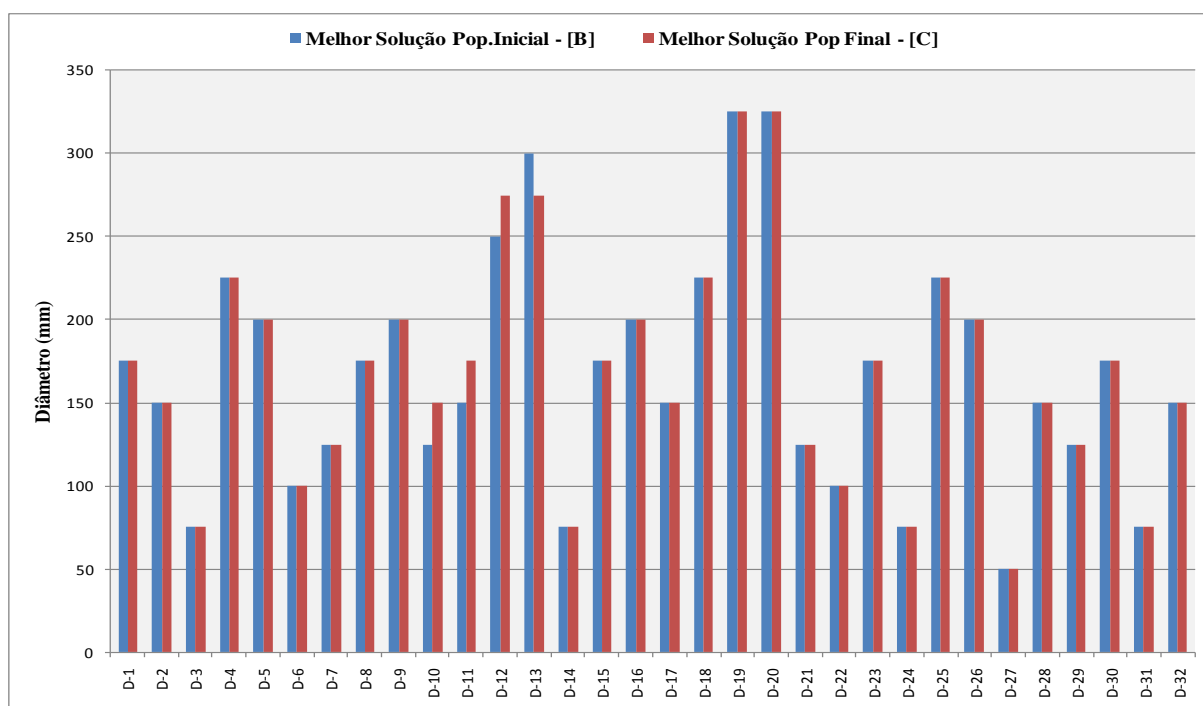


Figura 6.2.29 – Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 8.

• **Caso 9- Resultados**

SOLUÇÕES	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32
1	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
2	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
3	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
4	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
5	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
6	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
7	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
8	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
9	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
10	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
11	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
12	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
13	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
14	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
15	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
16	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
17	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
18	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
19	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
20	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
21	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
22	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
23	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
24	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
25	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
26	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
27	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
28	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
29	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
30	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125
Diâm. Médio (mm)	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	150	100	125

Tabela 6.2.31 – Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 9.

A tabela 6.2.31, mais uma vez apresenta todos os trinta e dois condutos convergindo para valores de diâmetros semelhantes para as trinta soluções na ultima população.

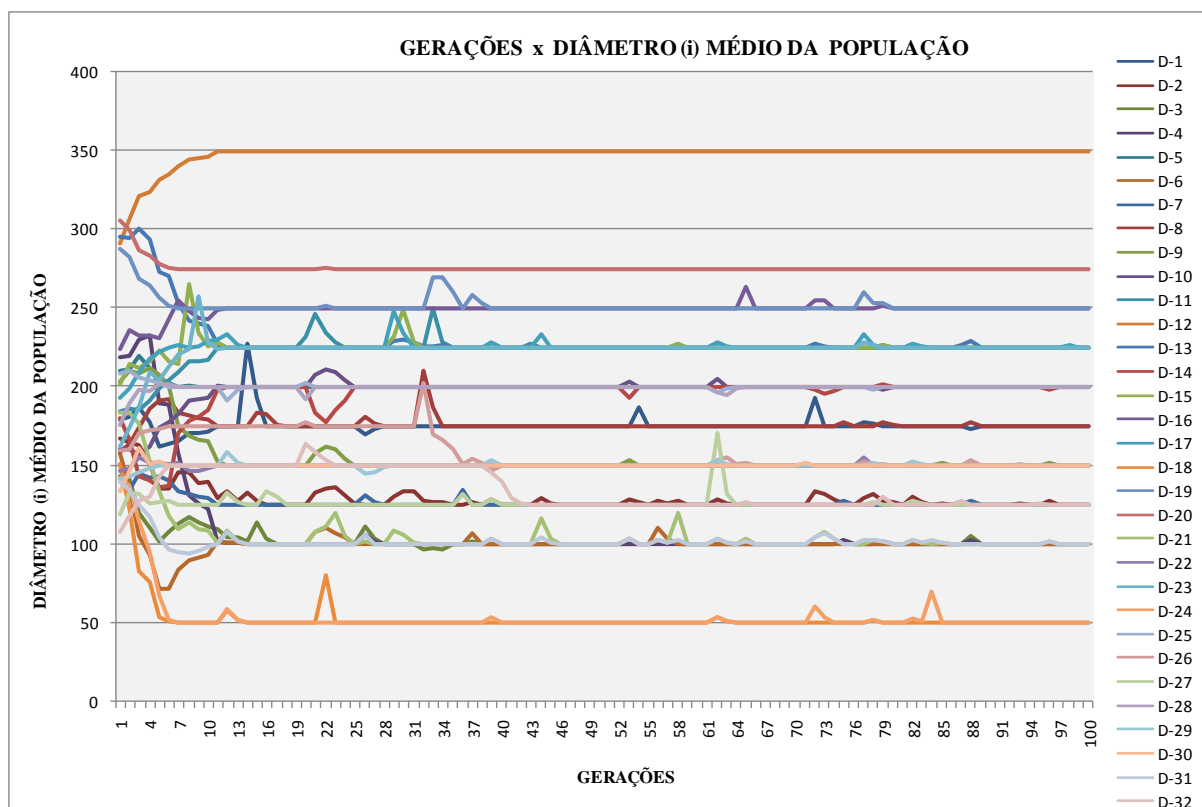


Figura 6.2.30 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 9.

O resultado gráfico, apresentado na figura 6.2.30, demonstra o diâmetro médio de cada conduto variando bastante nas gerações iniciais e a partir da nona geração quase não se alterando.

A tabela 6.2.32 apresenta o comportamento do coeficiente de convergência e dos valores mínimos, médios e máximos da função objetivo ao longo das 100 gerações de processamento.

Observando-se a longa série de gerações notam-se seqüências de gerações (46<sup>a</sup> a 52<sup>a</sup>) onde todas as trinta soluções da população são iguais. Constatando-se a falta de diversidade das mesmas ocasionadas talvez por ser pequena a taxa de mutação. Como este parâmetro será analisado posteriormente, espera-se na oportunidade resolver este problema de diversidade.

<b>ITER\TUBOS</b>	<b>F0min(i)</b>	<b>F0med(i)</b>	<b>F0max(i)</b>	<b>Coef.Conv.</b>
1	1,696	415,495	10344,473	99,6%
2	1,696	180,397	4141,488	99,1%
3	1,673	273,239	7865,218	99,4%
4	1,673	11,938	214,157	86,0%
5	1,662	2,628	7,655	36,7%
6	1,662	2,214	5,218	24,9%
7	1,662	1,958	2,458	15,1%
8	1,633	2,010	3,625	18,7%
9	1,633	2,080	3,296	21,5%
10	1,633	1,868	2,682	12,6%
11	1,633	1,712	1,970	4,6%
12	1,633	1,805	2,123	9,5%
13	1,633	1,677	2,123	2,6%
14	1,633	2,048	3,220	20,3%
15	1,633	1,850	2,987	11,7%
16	1,633	1,675	2,133	2,5%
17	1,633	1,642	1,673	0,5%
18	1,633	1,633	1,633	0,0%
19	1,633	1,633	1,633	0,0%
20	1,633	1,739	1,941	6,1%
21	1,633	1,775	1,951	8,0%
22	1,633	2,275	12,272	28,2%
23	1,633	1,880	6,039	13,1%
24	1,633	1,672	1,829	2,3%
25	1,633	1,635	1,685	0,1%
26	1,633	1,744	2,251	6,4%
27	1,633	1,661	1,868	1,7%
28	1,633	1,636	1,708	0,2%
29	1,633	2,055	3,856	20,5%
30	1,633	1,896	4,165	13,9%
31	1,633	1,663	1,901	1,8%
32	1,545	2,051	3,030	24,7%
33	1,545	1,736	2,643	11,0%
34	1,545	1,612	1,703	4,2%
35	1,545	1,581	1,639	2,3%
36	1,545	1,652	3,419	6,5%
37	1,545	1,608	2,416	4,0%
38	1,545	1,547	1,579	0,1%
39	1,480	1,572	1,845	5,8%
40	1,480	1,517	1,545	2,4%
41	1,480	1,491	1,545	0,7%
42	1,480	1,483	1,545	0,1%
43	1,480	1,483	1,509	0,2%
44	1,480	1,622	2,452	8,7%
45	1,480	1,496	1,941	1,0%
46	1,480	1,480	1,480	0,0%
47	1,480	1,480	1,480	0,0%
48	1,480	1,480	1,480	0,0%
49	1,480	1,480	1,480	0,0%
50	1,480	1,480	1,480	0,0%

<b>ITER\TUBOS</b>	<b>F0min(i)</b>	<b>F0med(i)</b>	<b>F0max(i)</b>	<b>Coef.Conv.</b>
51	1,480	1,480	1,480	0,0%
52	1,480	1,480	1,480	0,0%
53	1,480	1,508	1,691	1,9%
54	1,480	1,570	2,831	5,7%
55	1,480	1,480	1,480	0,0%
56	1,480	1,588	2,558	6,8%
57	1,480	1,516	2,558	2,4%
58	1,480	1,634	3,015	9,4%
59	1,480	1,480	1,480	0,0%
60	1,480	1,480	1,480	0,0%
61	1,480	1,480	1,480	0,0%
62	1,480	2,028	4,252	27,0%
63	1,480	1,572	3,405	5,8%
64	1,480	1,483	1,552	0,2%
65	1,480	1,526	1,749	3,0%
66	1,480	1,480	1,480	0,0%
67	1,480	1,480	1,480	0,0%
68	1,480	1,480	1,480	0,0%
69	1,480	1,480	1,480	0,0%
70	1,480	1,480	1,480	0,0%
71	1,480	1,493	1,852	0,8%
72	1,480	1,679	2,831	11,8%
73	1,480	1,536	1,745	3,6%
74	1,480	1,498	1,640	1,2%
75	1,480	1,501	1,669	1,4%
76	1,480	1,480	1,480	0,0%
77	1,480	1,596	2,452	7,2%
78	1,480	1,533	1,869	3,4%
79	1,480	1,527	1,797	3,0%
80	1,480	1,485	1,531	0,3%
81	1,480	1,480	1,480	0,0%
82	1,480	1,523	1,766	2,8%
83	1,480	1,494	1,766	0,9%
84	1,480	1,667	3,342	11,2%
85	1,480	1,489	1,741	0,6%
86	1,480	1,480	1,480	0,0%
87	1,480	1,492	1,555	0,8%
88	1,480	1,526	1,787	3,0%
89	1,480	1,480	1,480	0,0%
90	1,480	1,480	1,480	0,0%
91	1,480	1,480	1,480	0,0%
92	1,480	1,480	1,480	0,0%
93	1,480	1,485	1,617	0,3%
94	1,480	1,480	1,480	0,0%
95	1,480	1,483	1,545	0,1%
96	1,480	1,493	1,641	0,8%
97	1,480	1,480	1,480	0,0%
98	1,480	1,488	1,596	0,5%
99	1,480	1,480	1,480	0,0%
100	1,480	1,480	1,480	0,0%

Tabela 6.2.32 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 9.

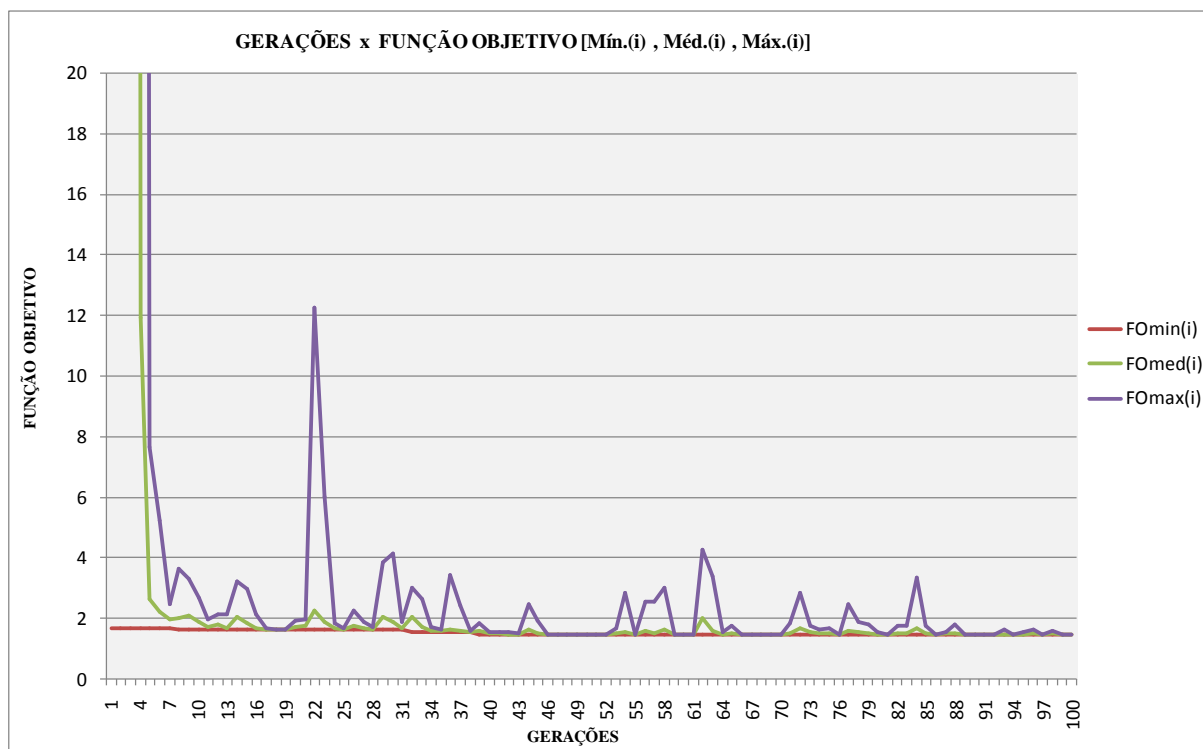


Figura 6.2.31 – Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 9.

Caso 9	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32	Função Objetivo
Solução Estimada (PNL) - [A]	250	250	125	250	250	150	100	200	300	200	250	300	350	200	200	250	250	250	300	350	150	100	300	150	150	150	100	200	200	125	125	125	29,742
Melhor Solução Pop.Inicial - [B]	150	125	100	225	200	50	150	200	225	150	175	325	275	75	175	200	225	50	250	275	100	150	200	50	200	175	125	200	150	75	150	150	1,696
Melhor Solução Pop Final - [C]	175	125	100	100	200	100	125	175	150	200	225	350	225	200	225	250	225	50	250	275	100	150	225	50	200	150	125	200	150	100	125	1,480	
Melhora Absoluta - [C-B]	25	0	0	125	0	50	25	75	50	50	50	25	50	125	50	50	0	0	0	0	0	0	25	0	25	0	0	0	0	25	25	0,216	
Melhora Relativa % - [C-B]/[C]	14,3	0,0	0,0	125,0	0,0	50,0	20,0	14,3	50,0	25,0	22,2	7,1	22,2	62,5	22,2	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,1	0,0	0,0	16,7	0,0	0,0	0,0	25,0	20,0	14,558	

Tabela 6.2.33 – Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 9.

A tabela 6.2.33 demonstra a modificação em dezessete condutos, um resultado semelhante ao caso 7.

O gráfico mostrado na figura 6.2.32 representa a informação contida na tabela 6.2.33, demonstrando a comparação dos diâmetros das melhores soluções da primeira e da última geração.

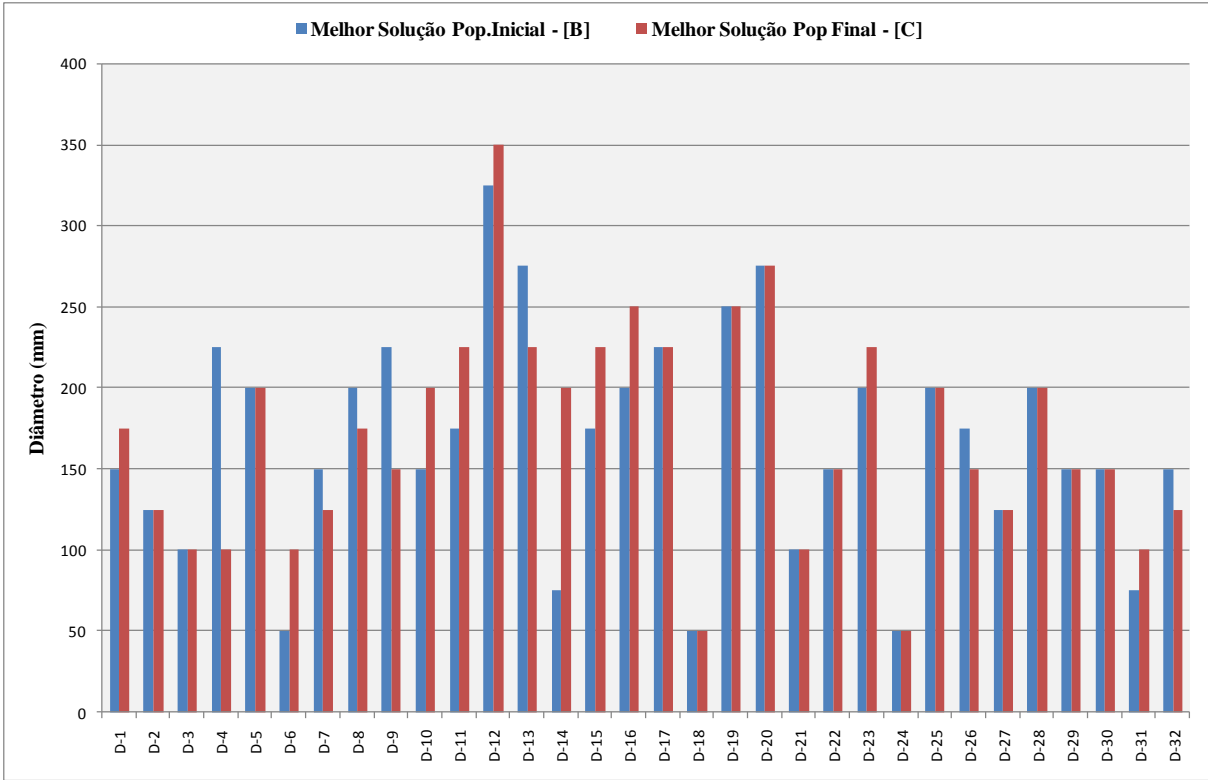


Figura 6.2.32 – Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do caso 9.



• *Caso 10- Resultados*

SOLUÇÕES	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32
1	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
2	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
3	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
4	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
5	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
6	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
7	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
8	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
9	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
10	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
11	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
12	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
13	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
14	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
15	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
16	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
17	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
18	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
19	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
20	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
21	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
22	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
23	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
24	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
25	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
26	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
27	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
28	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
29	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
30	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125
Diâm. Médio (mm)	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	125

Tabela 6.2.34 – Diâmetros da população de soluções da ultima geração do Caso 10.

Também para este caso, último deste grupo, apresentam-se todos os trinta e dois condutos convergindo para valores de diâmetros semelhantes para as trinta soluções na ultima população.

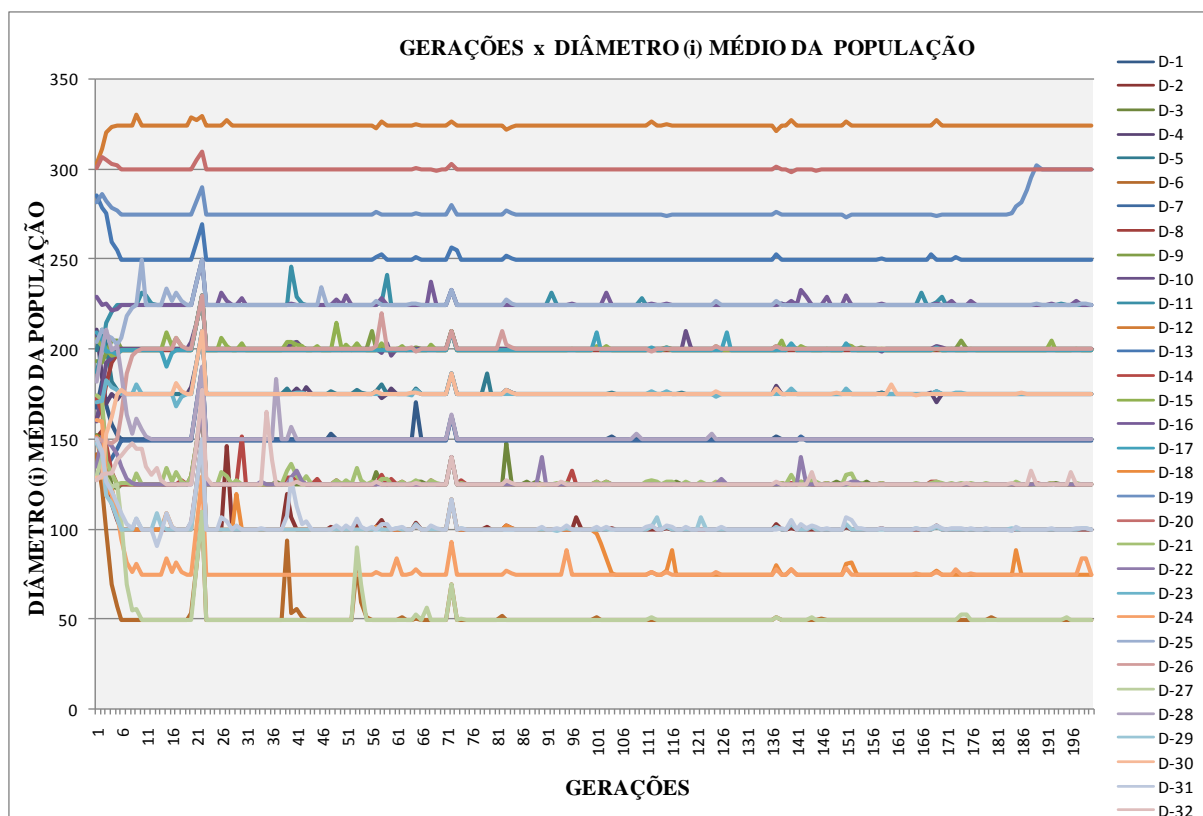


Figura 6.2.33 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 10

O resultado gráfico mostrado na figura 6.2.33, demonstra o diâmetro médio de cada conduto variando bastante nas gerações iniciais e a partir da nona geração quase não se alterando.

A tabela 6.2.35 apresenta o comportamento do coeficiente de convergência e dos valores mínimos, médios e máximos da função objetivo ao longo das 200 gerações de processamento.

Observando-se a longa série de gerações notam-se seqüências de gerações (128<sup>a</sup> a 136<sup>a</sup>) onde todas as trinta soluções da população são iguais. Novamente constatando-se a falta de diversidade.

<b>ITER\TUBOS</b>	<b>F0min(i)</b>	<b>F0med(i)</b>	<b>F0max(i)</b>	<b>Coef.Conv.</b>
<b>1</b>	1,575	73,427	1271,511	97,9%
<b>2</b>	1,523	11,967	104,018	87,3%
<b>3</b>	1,523	6,324	57,256	75,9%
<b>4</b>	1,523	1,899	4,312	19,8%
<b>5</b>	1,523	1,637	2,152	7,0%
<b>6</b>	1,464	1,557	1,666	6,0%
<b>7</b>	1,464	1,529	1,601	4,3%
<b>8</b>	1,464	1,521	1,575	3,8%
<b>9</b>	1,464	1,619	1,954	9,6%
<b>10</b>	1,464	1,725	2,508	15,2%
<b>11</b>	1,464	1,496	1,647	2,2%
<b>12</b>	1,464	1,476	1,523	0,9%
<b>13</b>	1,464	1,488	1,530	1,6%
<b>14</b>	1,464	1,470	1,530	0,5%
<b>15</b>	1,464	1,575	1,767	7,1%
<b>16</b>	1,464	1,484	1,767	1,4%
<b>17</b>	1,464	1,651	2,168	11,4%
<b>18</b>	1,464	1,514	2,168	3,3%
<b>19</b>	1,464	1,464	1,464	0,0%
<b>20</b>	1,464	1,612	2,357	9,2%
<b>21</b>	1,464	37,273	359,554	96,1%
<b>22</b>	1,464	73,100	359,554	98,0%
<b>23</b>	1,464	1,473	1,523	0,7%
<b>24</b>	1,464	1,464	1,464	0,0%
<b>25</b>	1,464	1,464	1,464	0,0%
<b>26</b>	1,464	1,521	1,680	3,8%
<b>27</b>	1,464	3,727	10,998	60,7%
<b>28</b>	1,464	1,464	1,464	0,0%
<b>29</b>	1,464	1,630	3,126	10,2%
<b>30</b>	1,464	1,603	2,513	8,7%
<b>31</b>	1,464	1,464	1,464	0,0%
<b>32</b>	1,464	1,464	1,464	0,0%
<b>33</b>	1,464	1,464	1,464	0,0%
<b>34</b>	1,464	1,469	1,642	0,4%
<b>35</b>	1,464	2,171	5,000	32,6%
<b>36</b>	1,464	1,699	5,000	13,9%
<b>37</b>	1,464	1,985	4,545	26,3%
<b>38</b>	1,464	1,464	1,464	0,0%
<b>39</b>	1,464	3,186	12,581	54,1%
<b>40</b>	1,464	1,871	4,545	21,8%
<b>41</b>	1,464	1,576	2,016	7,1%
<b>42</b>	1,464	1,490	1,739	1,8%
<b>43</b>	1,464	1,499	1,676	2,4%
<b>44</b>	1,464	1,464	1,464	0,0%
<b>45</b>	1,464	1,470	1,565	0,5%
<b>46</b>	1,464	1,546	2,293	5,4%
<b>47</b>	1,464	1,464	1,464	0,0%
<b>48</b>	1,464	1,497	1,967	2,2%
<b>49</b>	1,464	1,519	2,017	3,6%
<b>50</b>	1,464	1,464	1,464	0,0%

<b>ITER\TUBOS</b>	<b>F0min(i)</b>	<b>F0med(i)</b>	<b>F0max(i)</b>	<b>Coef.Conv.</b>
51	1,464	1,489	1,722	1,7%
52	1,464	1,464	1,464	0,0%
53	1,464	8,628	46,578	83,0%
54	1,464	4,851	46,578	69,8%
55	1,464	1,464	1,469	0,0%
56	1,464	1,508	2,137	3,0%
57	1,464	1,538	2,081	4,8%
58	1,464	1,724	2,926	15,1%
59	1,464	1,522	1,902	3,8%
60	1,464	1,474	1,539	0,7%
61	1,464	1,611	5,894	9,2%
62	1,464	1,477	1,672	0,9%
63	1,464	1,464	1,464	0,0%
64	1,464	1,487	2,168	1,6%
65	1,464	1,921	5,177	23,8%
66	1,464	1,470	1,555	0,4%
67	1,464	1,744	9,866	16,1%
68	1,464	1,507	1,901	2,9%
69	1,464	1,469	1,633	0,4%
70	1,464	1,464	1,464	0,0%
71	1,464	1,464	1,464	0,0%
72	1,464	25,336	359,554	94,2%
73	1,464	1,469	1,514	0,3%
74	1,464	1,474	1,692	0,7%
75	1,464	1,464	1,464	0,0%
76	1,464	1,464	1,464	0,0%
77	1,464	1,464	1,464	0,0%
78	1,464	1,464	1,464	0,0%
79	1,464	1,526	2,403	4,1%
80	1,464	1,464	1,464	0,0%
81	1,464	1,464	1,464	0,0%
82	1,464	1,562	2,926	6,3%
83	1,464	2,336	9,568	37,3%
84	1,464	1,484	2,081	1,4%
85	1,464	1,464	1,464	0,0%
86	1,464	1,464	1,464	0,0%
87	1,464	1,470	1,555	0,4%
88	1,464	1,464	1,464	0,0%
89	1,464	1,470	1,555	0,4%
90	1,464	1,711	5,176	14,5%
91	1,464	1,464	1,464	0,0%
92	1,464	1,476	1,648	0,8%
93	1,464	1,468	1,592	0,3%
94	1,464	1,467	1,523	0,3%
95	1,464	1,563	2,898	6,4%
96	1,464	1,512	2,925	3,2%
97	1,464	1,546	2,696	5,3%
98	1,464	1,464	1,464	0,0%
99	1,464	1,464	1,464	0,0%
100	1,464	1,464	1,464	0,0%
101	1,447	1,520	2,120	4,8%

<b>ITER\TUBOS</b>	<b>F0min(i)</b>	<b>F0med(i)</b>	<b>F0max(i)</b>	<b>Coef.Conv.</b>
102	1,447	1,459	1,464	0,8%
103	1,447	1,478	1,836	2,1%
104	1,447	1,465	1,970	1,2%
105	1,447	1,447	1,447	0,0%
106	1,447	1,447	1,447	0,0%
107	1,447	1,447	1,447	0,0%
108	1,447	1,447	1,447	0,0%
109	1,447	1,453	1,540	0,4%
110	1,447	1,452	1,516	0,3%
111	1,447	1,456	1,584	0,6%
112	1,447	1,476	1,774	2,0%
113	1,447	1,484	1,993	2,5%
114	1,447	1,447	1,447	0,0%
115	1,447	2,625	36,791	44,9%
116	1,447	1,526	2,632	5,2%
117	1,447	1,453	1,539	0,4%
118	1,447	1,448	1,472	0,1%
119	1,447	1,484	1,998	2,5%
120	1,447	1,447	1,447	0,0%
121	1,447	1,447	1,447	0,0%
122	1,447	1,484	1,993	2,5%
123	1,447	1,447	1,447	0,0%
124	1,447	1,453	1,540	0,4%
125	1,447	1,492	2,124	3,0%
126	1,447	1,460	1,635	0,9%
127	1,447	1,488	2,062	2,8%
128	1,447	1,447	1,447	0,0%
129	1,447	1,447	1,447	0,0%
130	1,447	1,447	1,447	0,0%
131	1,447	1,447	1,447	0,0%
132	1,447	1,447	1,447	0,0%
133	1,447	1,447	1,447	0,0%
134	1,447	1,447	1,447	0,0%
135	1,447	1,447	1,447	0,0%
136	1,447	1,447	1,447	0,0%
137	1,447	1,554	3,044	6,9%
138	1,447	1,467	1,999	1,3%
139	1,447	1,447	1,447	0,0%
140	1,447	1,790	6,365	19,2%
141	1,447	1,447	1,447	0,0%
142	1,447	1,739	5,284	16,8%
143	1,447	1,462	1,883	1,0%
144	1,447	1,583	4,922	8,6%
145	1,447	1,457	1,608	0,7%
146	1,447	1,447	1,453	0,0%
147	1,447	1,462	1,883	1,0%
148	1,447	1,447	1,447	0,0%
149	1,447	1,456	1,539	0,6%
150	1,447	1,447	1,447	0,0%

<b>ITER\TUBOS</b>	<b>FOmin(i)</b>	<b>FOmed(i)</b>	<b>FOmax(i)</b>	<b>Coef.Conv.</b>
151	1,447	3,823	36,791	62,1%
152	1,447	1,498	1,768	3,4%
153	1,447	1,454	1,635	0,4%
154	1,447	1,454	1,647	0,5%
155	1,447	1,456	1,695	0,6%
156	1,447	1,447	1,447	0,0%
157	1,447	1,447	1,447	0,0%
158	1,447	1,461	1,848	0,9%
159	1,447	1,447	1,447	0,0%
160	1,447	1,487	2,639	2,7%
161	1,447	1,447	1,447	0,0%
162	1,447	1,447	1,447	0,0%
163	1,447	1,447	1,447	0,0%
164	1,447	1,447	1,447	0,0%
165	1,447	1,452	1,593	0,3%
166	1,447	1,460	1,633	0,8%
167	1,447	1,447	1,447	0,0%
168	1,447	1,461	1,788	0,9%
169	1,447	2,637	36,791	45,1%
170	1,447	1,462	1,887	1,0%
171	1,447	1,447	1,447	0,0%
172	1,447	1,456	1,704	0,6%
173	1,447	1,460	1,740	0,9%
174	1,447	1,493	2,120	3,0%
175	1,447	1,471	2,086	1,6%
176	1,447	1,456	1,704	0,6%
177	1,447	1,447	1,447	0,0%
178	1,447	1,447	1,447	0,0%
179	1,447	1,452	1,584	0,3%
180	1,447	1,449	1,496	0,1%
181	1,447	1,447	1,447	0,0%
182	1,447	1,447	1,447	0,0%
183	1,447	1,447	1,447	0,0%
184	1,443	1,449	1,518	0,5%
185	1,443	1,513	2,632	4,7%
186	1,443	1,448	1,515	0,4%
187	1,443	1,445	1,447	0,1%
188	1,443	1,611	6,475	10,4%
189	1,443	1,450	1,520	0,5%
190	1,443	1,443	1,443	0,0%
191	1,443	1,443	1,443	0,0%
192	1,443	1,461	1,991	1,3%
193	1,443	1,446	1,535	0,2%
194	1,443	1,444	1,474	0,1%
195	1,443	1,446	1,526	0,2%
196	1,443	1,554	4,772	7,1%
197	1,443	1,451	1,693	0,6%
198	1,443	1,520	3,772	5,1%
199	1,443	1,520	3,772	5,1%
200	1,443	1,443	1,443	0,0%

Tabela 6.2.35 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 10.

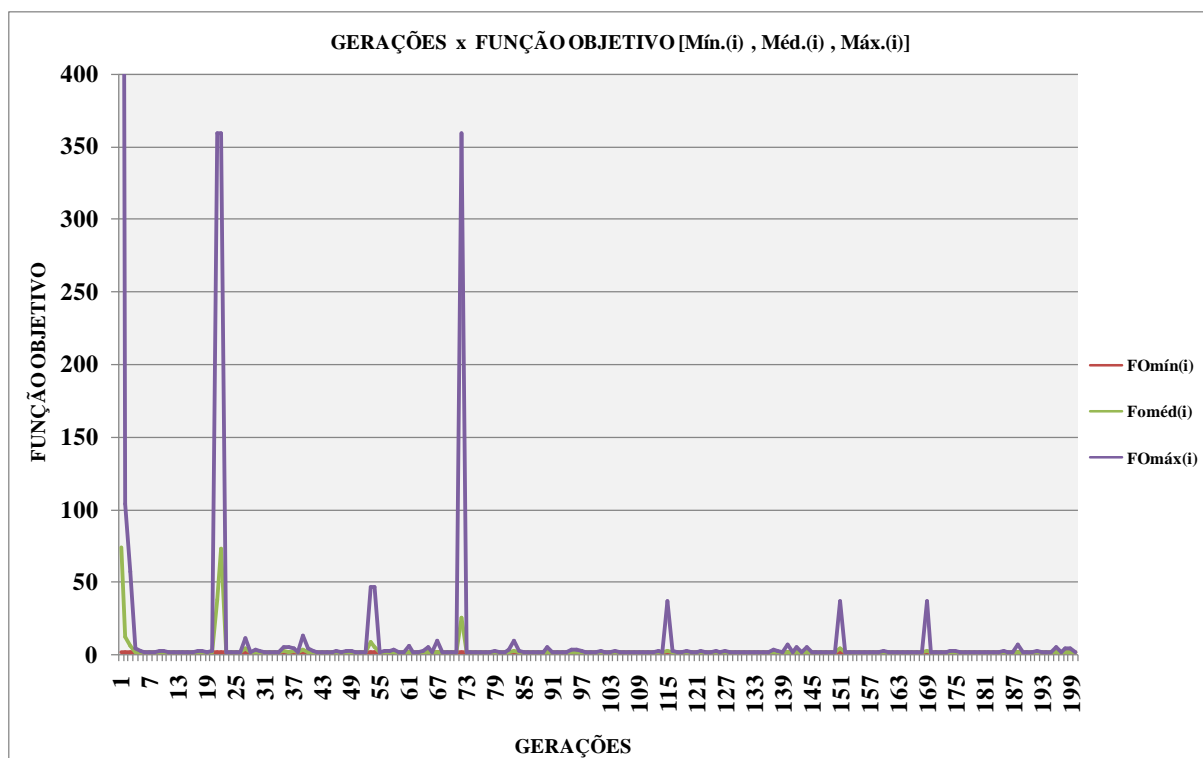


Figura 6.2.34 – Comportamento dos valores mínimo, médio e máximo da função objetivo ao longo das gerações do Caso 10.

Observando-se uma série longa de 200 iterações deste caso notam-se ruídos randômicos maiores nas primeiras iterações, e um pouco menores na 21<sup>a</sup>, 22<sup>a</sup> e 71<sup>a</sup> gerações, no entanto, não podendo afetar os valores mínimos da função objetivo.

Caso 10	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32	Função Objetivo
Solução Estimada (PNL) - [A]	250	250	125	250	250	150	100	200	300	200	250	300	350	200	200	250	250	250	300	350	150	100	300	150	150	100	200	200	200	125	125	125	29,742
Melhor Solução Pop.Inicial - [B]	150	100	125	125	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	100	275	300	125	150	175	125	175	100	200	250	100	175	125	125	1,575
Melhor Solução Pop Final - [C]	150	100	125	175	175	50	150	200	200	200	225	325	250	125	200	225	200	75	300	300	125	125	175	75	225	200	50	150	100	175	100	1,443	
Melhora Absoluta - [C-B]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	25	0	0	25	0	50	100	150	100	0	0	25	0	0,132	
Melhora Relativa % - [C-B]/[C]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33,3	8,3	0,0	0,0	20,0	0,0	66,7	22,2	50,0	300,0	66,7	0,0	25,0	0,0	9,156	

Tabela 6.2.36 – Evolução dos diâmetros e da função objetivo no processamento do Caso 10.

A tabela 6.2.36 demonstra a modificação em apenas nove condutos, apesar do grande número de iterações.

A figura abaixo representa a informação contida nesta tabela demonstrando a comparação dos diâmetros das melhores soluções da primeira e da última geração.

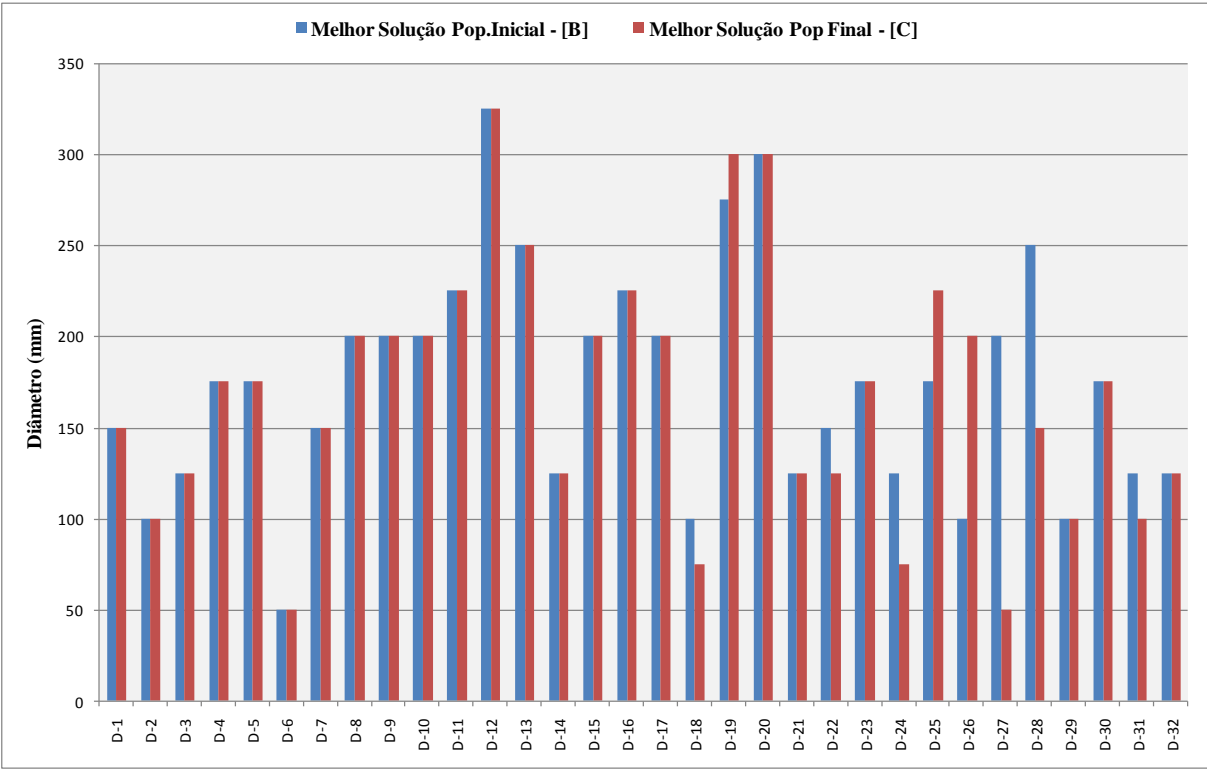


Figura 6.2.35 – Comparação entre os diâmetros das melhores soluções das populações inicial e final do Caso 10



• *Síntese Analítica do Grupo 2*

**GRUPO 2**

Nº DA GERAÇÃO	CASO6	CASO7	CASO8	CASO9	CASO10
1	1,948	1,716	1,692	1,696	1,575
2	1,948	1,716	1,692	1,696	1,523
3	1,948	1,716	1,692	1,673	1,523
4	1,929	1,673	1,574	1,673	1,523
5	1,929	1,673	1,574	1,662	1,523
6	1,805	1,673	1,574	1,662	1,464
7	1,805	1,673	1,574	1,662	1,464
8	1,789	1,673	1,574	1,633	1,464
9	1,789	1,663	1,574	1,633	1,464
10	1,742	1,639	1,574	1,633	1,464
11	1,742	1,639	1,574	1,633	1,464
12	1,742	1,611	1,574	1,633	1,464
13	1,742	1,611	1,574	1,633	1,464
14	1,742	1,611	1,574	1,633	1,464
15	1,742	1,588	1,574	1,633	1,464
16	1,742	1,545	1,574	1,633	1,464
17	1,742	1,545	1,574	1,633	1,464
18	1,742	1,545	1,574	1,633	1,464
19	1,742	1,545	1,574	1,633	1,464
20	1,742	1,545	1,538	1,633	1,464
21	-	1,545	1,538	1,633	1,464
22	-	1,545	1,538	1,633	1,464
23	-	1,545	1,538	1,633	1,464
24	-	1,545	1,538	1,633	1,464
25	-	1,545	1,538	1,633	1,464
26	-	1,545	1,538	1,633	1,464
27	-	1,545	1,538	1,633	1,464
28	-	1,537	1,538	1,633	1,464
29	-	1,537	1,538	1,633	1,464
30	-	1,537	1,538	1,633	1,464
31	-	-	1,538	1,633	1,464
32	-	-	1,538	1,545	1,464
33	-	-	1,538	1,545	1,464
34	-	-	1,538	1,545	1,464
35	-	-	1,538	1,545	1,464
36	-	-	1,538	1,545	1,464
37	-	-	1,538	1,545	1,464
38	-	-	1,538	1,545	1,464
39	-	-	1,538	1,480	1,464
40	-	-	1,538	1,480	1,464
41	-	-	1,538	1,480	1,464
42	-	-	1,538	1,480	1,464
43	-	-	1,538	1,480	1,464
44	-	-	1,538	1,480	1,464
45	-	-	1,538	1,480	1,464
46	-	-	1,538	1,480	1,464
47	-	-	1,538	1,480	1,464
48	-	-	1,538	1,480	1,464
49	-	-	1,538	1,480	1,464
50	-	-	1,538	1,480	1,464

GRUPO 2					
N° DA GERAÇÃO	CASO6	CASO7	CASO8	CASO9	CASO10
51	-	-	-	1,480	1,464
52	-	-	-	1,480	1,464
53	-	-	-	1,480	1,464
54	-	-	-	1,480	1,464
55	-	-	-	1,480	1,464
56	-	-	-	1,480	1,464
57	-	-	-	1,480	1,464
58	-	-	-	1,480	1,464
59	-	-	-	1,480	1,464
60	-	-	-	1,480	1,464
61	-	-	-	1,480	1,464
62	-	-	-	1,480	1,464
63	-	-	-	1,480	1,464
64	-	-	-	1,480	1,464
65	-	-	-	1,480	1,464
66	-	-	-	1,480	1,464
67	-	-	-	1,480	1,464
68	-	-	-	1,480	1,464
69	-	-	-	1,480	1,464
70	-	-	-	1,480	1,464
71	-	-	-	1,480	1,464
72	-	-	-	1,480	1,464
73	-	-	-	1,480	1,464
74	-	-	-	1,480	1,464
75	-	-	-	1,480	1,464
76	-	-	-	1,480	1,464
77	-	-	-	1,480	1,464
78	-	-	-	1,480	1,464
79	-	-	-	1,480	1,464
80	-	-	-	1,480	1,464
81	-	-	-	1,480	1,464
82	-	-	-	1,480	1,464
83	-	-	-	1,480	1,464
84	-	-	-	1,480	1,464
85	-	-	-	1,480	1,464
86	-	-	-	1,480	1,464
87	-	-	-	1,480	1,464
88	-	-	-	1,480	1,464
89	-	-	-	1,480	1,464
90	-	-	-	1,480	1,464
91	-	-	-	1,480	1,464
92	-	-	-	1,480	1,464
93	-	-	-	1,480	1,464
94	-	-	-	1,480	1,464
95	-	-	-	1,480	1,464
96	-	-	-	1,480	1,464
97	-	-	-	1,480	1,464
98	-	-	-	1,480	1,464
99	-	-	-	1,480	1,464
100	-	-	-	1,480	1,464

**GRUPO 2**

N° DA GERAÇÃO	CASO6	CASO7	CASO8	CASO9	CASO10
101	-	-	-	-	1,447
102	-	-	-	-	1,447
103	-	-	-	-	1,447
104	-	-	-	-	1,447
105	-	-	-	-	1,447
106	-	-	-	-	1,447
107	-	-	-	-	1,447
108	-	-	-	-	1,447
109	-	-	-	-	1,447
110	-	-	-	-	1,447
111	-	-	-	-	1,447
112	-	-	-	-	1,447
113	-	-	-	-	1,447
114	-	-	-	-	1,447
115	-	-	-	-	1,447
116	-	-	-	-	1,447
117	-	-	-	-	1,447
118	-	-	-	-	1,447
119	-	-	-	-	1,447
120	-	-	-	-	1,447
121	-	-	-	-	1,447
122	-	-	-	-	1,447
123	-	-	-	-	1,447
124	-	-	-	-	1,447
125	-	-	-	-	1,447
126	-	-	-	-	1,447
127	-	-	-	-	1,447
128	-	-	-	-	1,447
129	-	-	-	-	1,447
130	-	-	-	-	1,447
131	-	-	-	-	1,447
132	-	-	-	-	1,447
133	-	-	-	-	1,447
134	-	-	-	-	1,447
135	-	-	-	-	1,447
136	-	-	-	-	1,447
137	-	-	-	-	1,447
138	-	-	-	-	1,447
139	-	-	-	-	1,447
140	-	-	-	-	1,447
141	-	-	-	-	1,447
142	-	-	-	-	1,447
143	-	-	-	-	1,447
144	-	-	-	-	1,447
145	-	-	-	-	1,447
146	-	-	-	-	1,447
147	-	-	-	-	1,447
148	-	-	-	-	1,447
149	-	-	-	-	1,447
150	-	-	-	-	1,447

**GRUPO 2**

N° DA GERAÇÃO	CASO6	CASO7	CASO8	CASO9	CASO10
151	-	-	-	-	1,447
152	-	-	-	-	1,447
153	-	-	-	-	1,447
154	-	-	-	-	1,447
155	-	-	-	-	1,447
156	-	-	-	-	1,447
157	-	-	-	-	1,447
158	-	-	-	-	1,447
159	-	-	-	-	1,447
160	-	-	-	-	1,447
161	-	-	-	-	1,447
162	-	-	-	-	1,447
163	-	-	-	-	1,447
164	-	-	-	-	1,447
165	-	-	-	-	1,447
166	-	-	-	-	1,447
167	-	-	-	-	1,447
168	-	-	-	-	1,447
169	-	-	-	-	1,447
170	-	-	-	-	1,447
171	-	-	-	-	1,447
172	-	-	-	-	1,447
173	-	-	-	-	1,447
174	-	-	-	-	1,447
175	-	-	-	-	1,447
176	-	-	-	-	1,447
177	-	-	-	-	1,447
178	-	-	-	-	1,447
179	-	-	-	-	1,447
180	-	-	-	-	1,447
181	-	-	-	-	1,447
182	-	-	-	-	1,447
183	-	-	-	-	1,447
184	-	-	-	-	1,443
185	-	-	-	-	1,443
186	-	-	-	-	1,443
187	-	-	-	-	1,443
188	-	-	-	-	1,443
189	-	-	-	-	1,443
190	-	-	-	-	1,443
191	-	-	-	-	1,443
192	-	-	-	-	1,443
193	-	-	-	-	1,443
194	-	-	-	-	1,443
195	-	-	-	-	1,443
196	-	-	-	-	1,443
197	-	-	-	-	1,443
198	-	-	-	-	1,443
199	-	-	-	-	1,443
200	-	-	-	-	1,443

Tabela 6.2.37 – Valores da função objetivo da melhor solução a cada geração nos casos do grupo 2.

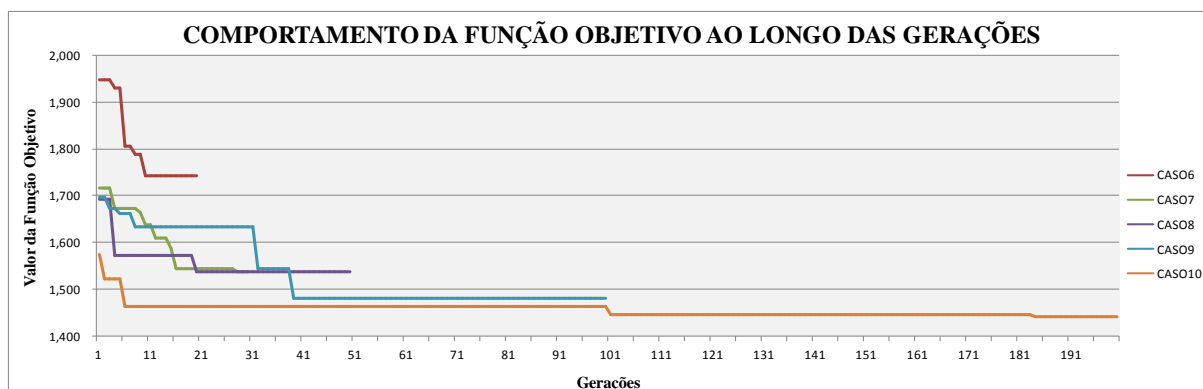


Figura 6.2.36 – Comparação do comportamento da função objetivo ao longo das gerações para os casos do grupo 2

Observando a figura 6.2.36, que representa a tabela 6.2.37 estabelecem-se algumas relações evidentes. Dentre elas que, o maior número iterações ou gerações resultam em resultados melhores do valor da função objetivo (minimização).

Outra observação pertinente é que para todos os casos deste grupo os melhoramentos mais expressivos na função objetivo ocorrem até a quadragésima geração. A partir da qual ocorrem pequenos melhoramentos mais espaçados ao longo das gerações.

Este fato está relacionado à redução do coeficiente de convergência que quando tem seu valor nulo ( $FO_{med} = FO_{min}$ ), significa que todas as soluções da população são iguais, impossibilitando o operador recombinação de gerar filhos diferentes dos pais que são clones perfeitos, passando a depender somente do operador mutação para encontrar diâmetros que melhorem (minimizem) o valor da função objetivo.

As primeiras iterações onde o coeficiente de convergência se torna nulo aconteceram respectivamente para os casos 6, 7, 8, 9 e 10, nas iterações de números 18, 26, 12, 18 e 19. Em média para os casos deste grupo o coeficiente de convergência se torna nulo na 19ª iteração.

O aumento do número de gerações resulta em melhores resultados na função objetivo, porém acresce o esforço computacional tanto no tempo de processamento quanto na capacidade de memória para armazenamento de dados.

O objetivo desta análise de sensibilidade é encontrar para este parâmetro (número de gerações) um ponto de equilíbrio do AG entre forças antagônicas que são a qualidade final das soluções e o esforço computacional. Este ponto de equilíbrio resulta no melhor desempenho associado ao tempo de processamento, esforço computacional e proximidade ou convergência da solução ao resultado ótimo do problema.

PARÂMETROS ANALISADOS	CASO6	CASO7	CASO8	CASO9	CASO10
Número de Gerações - [A]	20	30	50	100	200
Tempo de Processamento (min) - [B]	6,41	11,88	49,41	81,53	291,06927
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,01	1,731	2,511	4,844	9,094
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	10	28	20	39	184
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,948	1,716	1,692	1,696	1,575
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,742	1,537	1,538	1,480	1,443
Melhora no Valor da Objetivo [G]=[E]-[F]	0,205	0,179	0,154	0,216	0,132
Gradiente de Melhora no Valor da Objetivo [H%]=[G]/[D]	2,1%	0,6%	0,8%	0,6%	0,1%

Tabela 6.2.38 – Valores dos parâmetros analisados nas simulações dos casos do grupo 2.

A seguir são representadas graficamente as análises individuais dos parâmetros da tabela acima.

#### - Tempo de Processamento

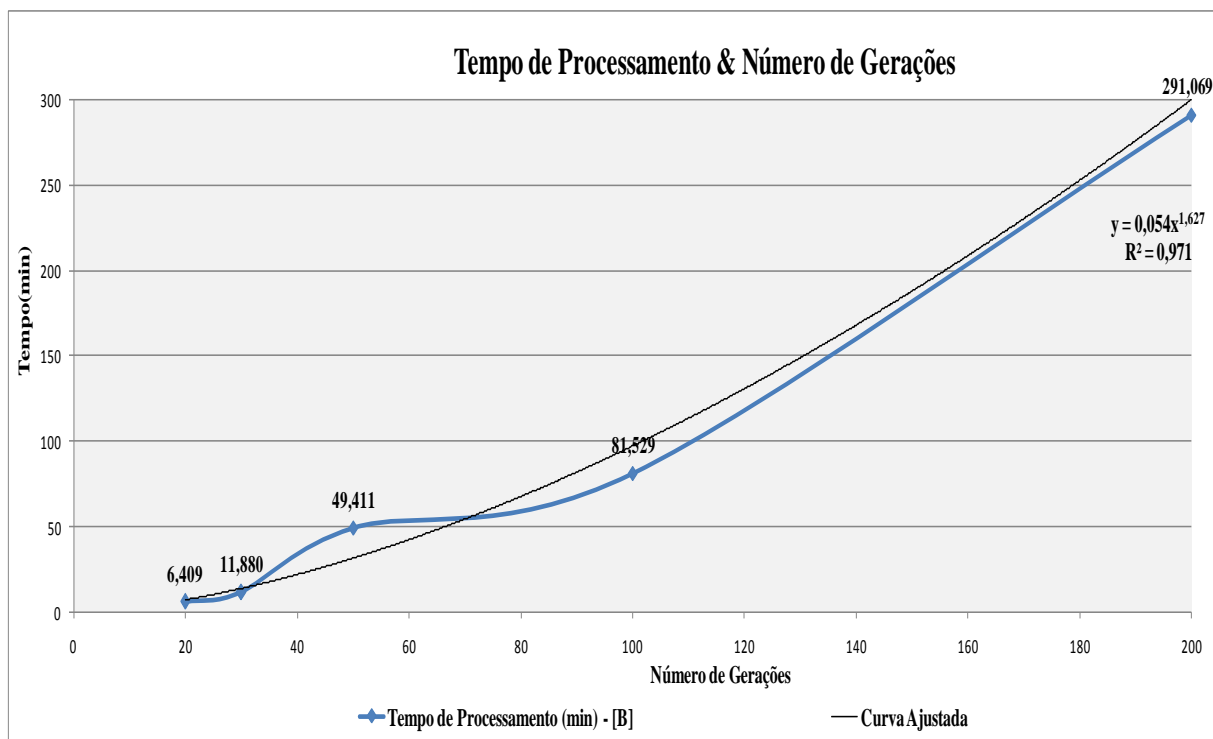


Figura 6.2.37 – Comportamento do tempo de processamento requerido nas simulações dos casos do grupo 2

### - Tamanho do Arquivo

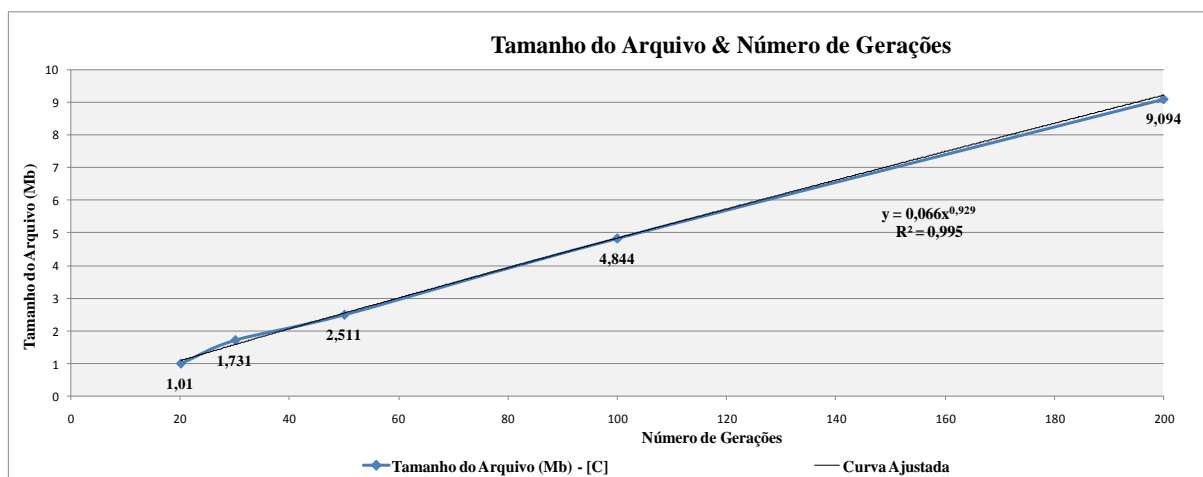


Figura 6.2.38 – Tamanhos dos arquivos resultados das simulações dos casos do grupo 2

### - Valor da Função Objetivo da Melhor Solução da População Final

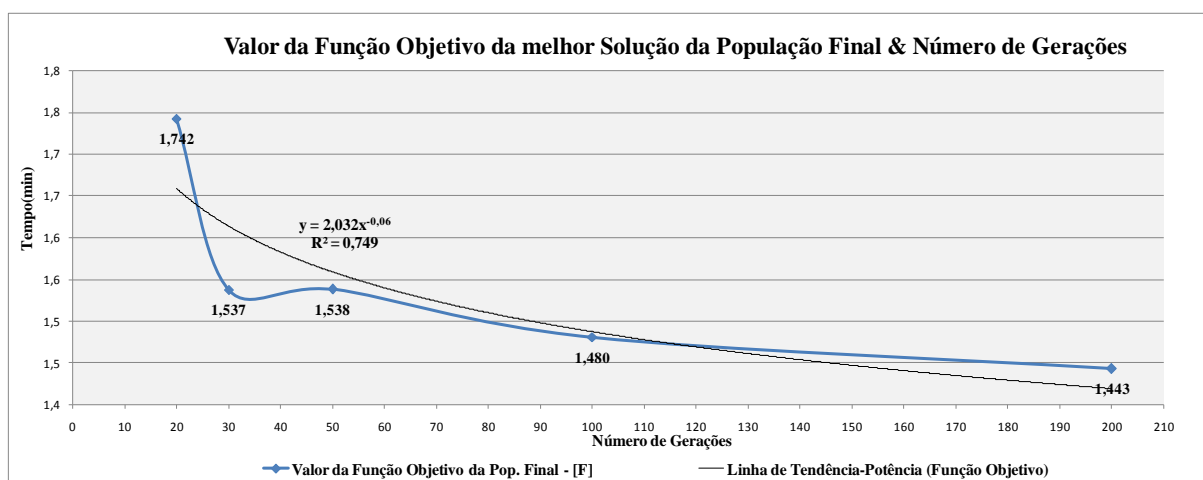


Figura 6.2.39 – Valores da função objetivo da melhor solução da população final dos casos do grupo 2

A tabela 6.2.39 é uma continuação da tabela 6.2.38, analisando os parâmetros relativamente à melhor solução encontrada (caso 10), porém com maior esforço computacional.

As fórmulas nelas contidas são auto-explicativas. Em suma considera-se o desempenho do esforço computacional (média aritmética dos percentuais de desempenho relativos a tempo de processamento e tamanho de arquivo) contrapondo com o desempenho

de convergência ou proximidade da melhor solução. A resultante destas forças antagônicas é denominada de desempenho efetivo.

ANÁLISE RELATIVA À MELHOR SOLUÇÃO ENCONTRADA	CASO6	CASO7	CASO8	CASO9	CASO10
Número de Gerações - [A]	20	30	50	100	200
Percentual do Tempo de Proc. Relativo a Melhor Solução (TPMS=194,32min) - [I%]=[B]/[TPMS]	2,2%	4,1%	17,0%	28,0%	100,0%
Percentual do Tamanho do Arquivo Relativo a Melhor Solução (TAMS=27,703Kb) - [J%]=[C]/[TAMS]	11,1%	19,0%	27,6%	53,3%	100,0%
Percentual Médio de Desempenho Relativo ao Esforço Computacional - [K%]=[I%]+[J%]/2	6,7%	11,6%	22,3%	40,6%	100,0%
Melhor Solução (PFOMS=1,450) - [L%]=[F]-[PFOMS]/[PFOMS]	20,8%	6,5%	6,6%	2,6%	0,0%
Percentual de Desempenho Efetivo - [M%]=[K%]+[L%]	27,4%	18,1%	28,9%	43,2%	100,0%

Tabela 6.2.39 – Valores dos parâmetros analisados relativos à melhor solução (caso 5) das simulações do grupo 2

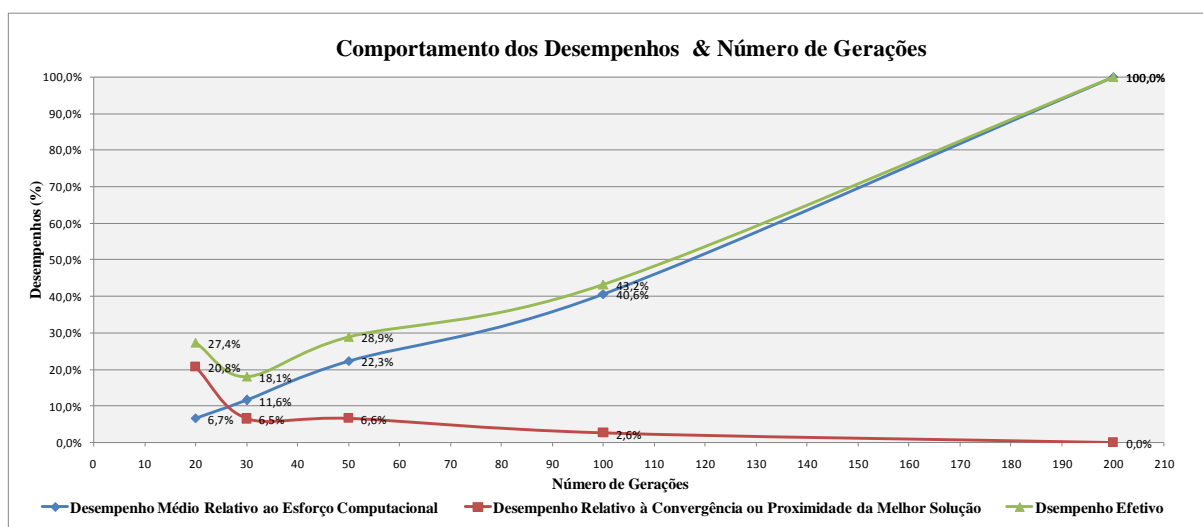


Figura 6.2.40 – Comportamento dos Desempenhos Relativos à melhor solução das simulações dos casos do grupo 2

A figura 6.2.40 representa os dados da tabela 6.2.39, e revela que o número de gerações que apresenta melhor desempenho efetivo é a do caso 7 com trinta gerações (iterações) consumindo 11,6% do esforço computacional requerido para encontrar a melhor solução (*caso-10*) e encontrando uma solução 6,5% menos apta do que esta, apresentando um desempenho efetivo de 18,1%.



### 6.2.3 Grupo 3 – Parâmetro em Análise Taxa de Recombinação

Sendo a recombinação o principal mecanismo de busca do AG, conclui-se daí que uma taxa de recombinação maior deve favorecer a localização de melhores soluções, desde que o problema não seja do tipo *AG-deceptivo*, não apresentando altos níveis de epistasia.

Diferentes taxas de recombinação serão mais adequadas a diferentes tipos de funções com diferentes graus de epistasia, necessitando-se para o problema em questão selecionar, novamente através de análise de sensibilidade, a taxa mais adequada.

Embora não se sabendo ainda o nível de epistasia envolvido no problema, neste grupo analisa-se somente o crossover clássico, já que Syswerda (1989) sugere para problemas de alta epistasia o crossover uniforme. Registre-se que tipo de recombinação será parâmetro para análise em outro grupo.

Devido ao caráter aleatório da geração da população inicial e do processo seletivo das soluções que sofrerão recombinação (randômico com maior chance às mais aptas), se faz necessário adotar um comportamento médio obtido de várias simulações com os mesmos parâmetros para reduzir este efeito aleatório.

Para os cinco casos analisados deste grupo o parâmetro *Taxa de Recombinação* é o único variável, os demais não se alteram, sendo-lhes os valores atribuídos apresentados na tabela 6.2.40. E para cada um dos cinco casos foram realizadas cinco simulações obtendo-se um comportamento médio destas.

Casos	Prob. Cruz.(%)	Tamanho da População de Soluções	Núm. de Gerações	Prob. Mut.(%)	Adoção de Elitismo ?	Tipo de Cruz.	Adoção de Coef. de Conv.?	Adoção de Crit. Parada Antecipada?
1	50	30	30	0,2	Sim	Clássico (1pt de corte)	Não	Não
12	70							
13	80							
14	90							
15	100							

Tabela 6.2.40 – Parâmetros adotados do AG para o grupo 3.

• *Caso 11 - Resultados*

Nº DA GERAÇÃO	CASO11	CASO11A	CASO11B	CASO11C	CASO11D	CASO11E
1	1,891	1,563	1,828	2,015	2,150	1,901
2	1,813	1,531	1,815	1,911	2,150	1,656
3	1,812	1,526	1,815	1,911	2,150	1,656
4	1,793	1,501	1,815	1,911	2,150	1,587
5	1,780	1,501	1,815	1,862	2,137	1,587
6	1,763	1,501	1,727	1,862	2,137	1,587
7	1,727	1,501	1,666	1,743	2,137	1,587
8	1,727	1,501	1,666	1,743	2,137	1,587
9	1,727	1,501	1,666	1,743	2,137	1,587
10	1,707	1,501	1,589	1,743	2,118	1,587
11	1,707	1,501	1,589	1,743	2,118	1,587
12	1,707	1,501	1,589	1,743	2,118	1,587
13	1,707	1,501	1,589	1,743	2,118	1,587
14	1,707	1,501	1,589	1,743	2,118	1,587
15	1,706	1,501	1,589	1,743	2,118	1,579
16	1,706	1,501	1,589	1,743	2,118	1,579
17	1,706	1,501	1,589	1,743	2,118	1,579
18	1,703	1,501	1,573	1,743	2,118	1,579
19	1,703	1,501	1,573	1,743	2,118	1,579
20	1,703	1,501	1,573	1,743	2,118	1,579
21	1,703	1,501	1,573	1,743	2,118	1,579
22	1,703	1,501	1,573	1,743	2,118	1,579
23	1,703	1,501	1,573	1,743	2,118	1,579
24	1,703	1,501	1,573	1,743	2,118	1,579
25	1,703	1,501	1,573	1,743	2,118	1,579
26	1,653	1,501	1,573	1,743	1,868	1,579
27	1,653	1,501	1,573	1,743	1,868	1,579
28	1,653	1,501	1,573	1,743	1,868	1,579
29	1,653	1,501	1,573	1,743	1,868	1,579
30	1,644	1,501	1,573	1,722	1,847	1,579
Taxa de Recombinação - [A %]	50%					
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,625	11,527	11,471	12,289	11,458	11,379
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,496	1,498	1,519	1,523	1,455	1,485
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	19,000	4,000	18,000	30,000	30,000	15,000
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,891	1,563	1,828	2,015	2,150	1,901
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,644	1,501	1,573	1,722	1,847	1,579
Melhora no Valor da F. Objetivo [G]=[E]-[F]	0,247	0,062	0,255	0,293	0,302	0,322
Melhora Relativa no Valor da F. Objetivo [H%]=[G]/[D]	1,42%	1,55%	1,41%	0,98%	1,01%	2,15%

Tabela 6.2.41 – Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do caso 11.

Observe-se que os valores obtidos para a coluna *CASO 11* são uma média aritmética dos valores das simulações *11A*, *11B*, *11C*, *11D* e *11E*.

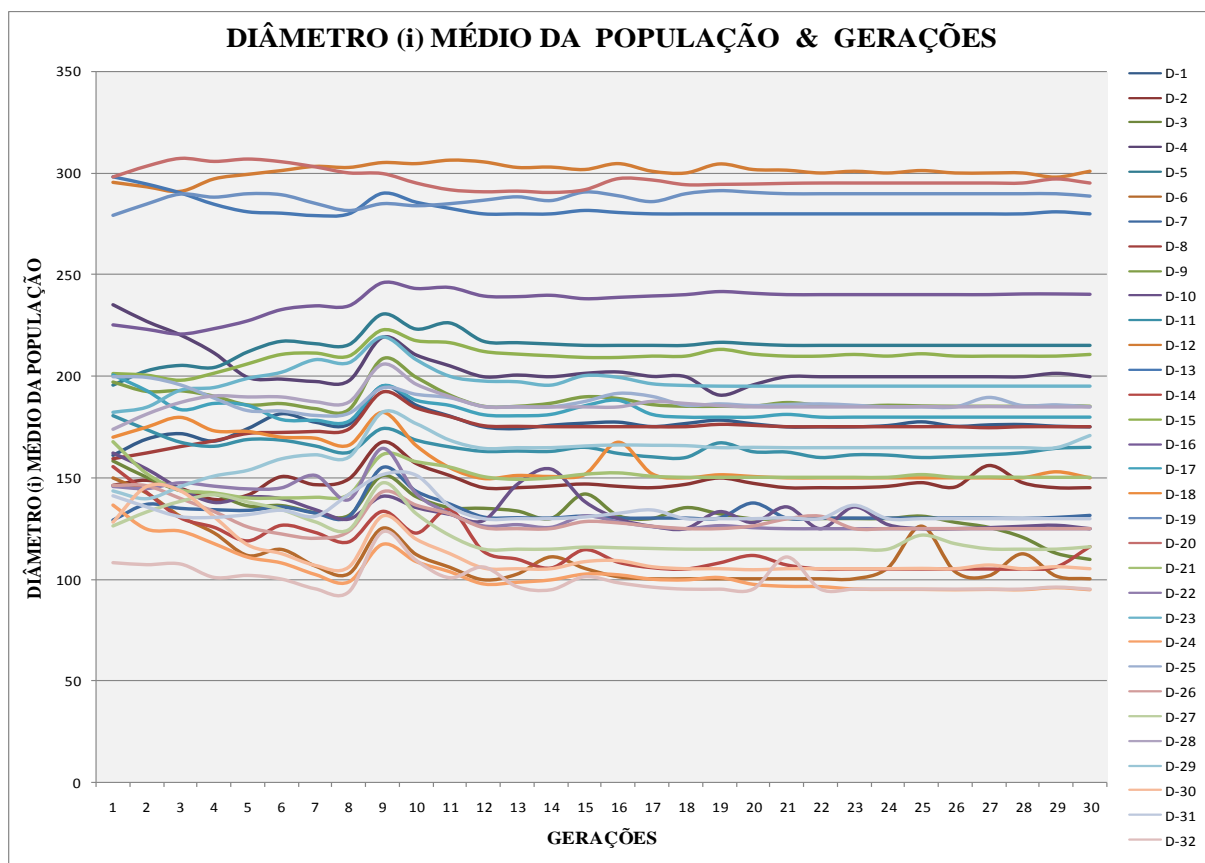


Figura 6.2.41 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 11.

ITER\TUBOS	FOmin(i)	FOmed(i)	FOmax(i)	Coef.Conv.
1	1,891	242,271	5.696,831	96,9%
2	1,813	303,945	8.888,012	82,1%
3	1,812	6,321	58,956	64,5%
4	1,793	2,732	7,503	30,4%
5	1,780	62,178	1.793,832	40,1%
6	1,763	4,667	79,673	32,7%
7	1,727	2,159	3,182	17,3%
8	1,727	2,261	6,980	22,6%
9	1,727	37,843	75,185	32,4%
10	1,707	18,079	75,122	34,5%
11	1,707	7,932	57,013	31,9%
12	1,707	2,241	3,260	14,5%
13	1,707	2,235	4,815	15,1%
14	1,707	2,418	7,049	24,0%
15	1,706	2,422	10,176	21,8%
16	1,706	12,454	61,739	29,5%
17	1,706	2,319	15,528	15,3%
18	1,703	1,897	2,558	6,7%
19	1,703	6,347	74,422	19,9%
20	1,703	2,558	7,442	21,8%
21	1,703	5,524	16,384	21,9%
22	1,703	1,717	1,753	0,9%
23	1,703	2,005	3,176	11,4%
24	1,703	1,782	2,696	4,2%
25	1,703	2,393	4,250	20,7%
26	1,653	1,810	4,076	7,8%
27	1,653	2,453	6,749	24,2%
28	1,653	2,134	3,728	13,5%
29	1,653	1,963	3,359	9,1%
30	1,644	1,910	3,183	10,5%

Tabela 6.2.42 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 11.

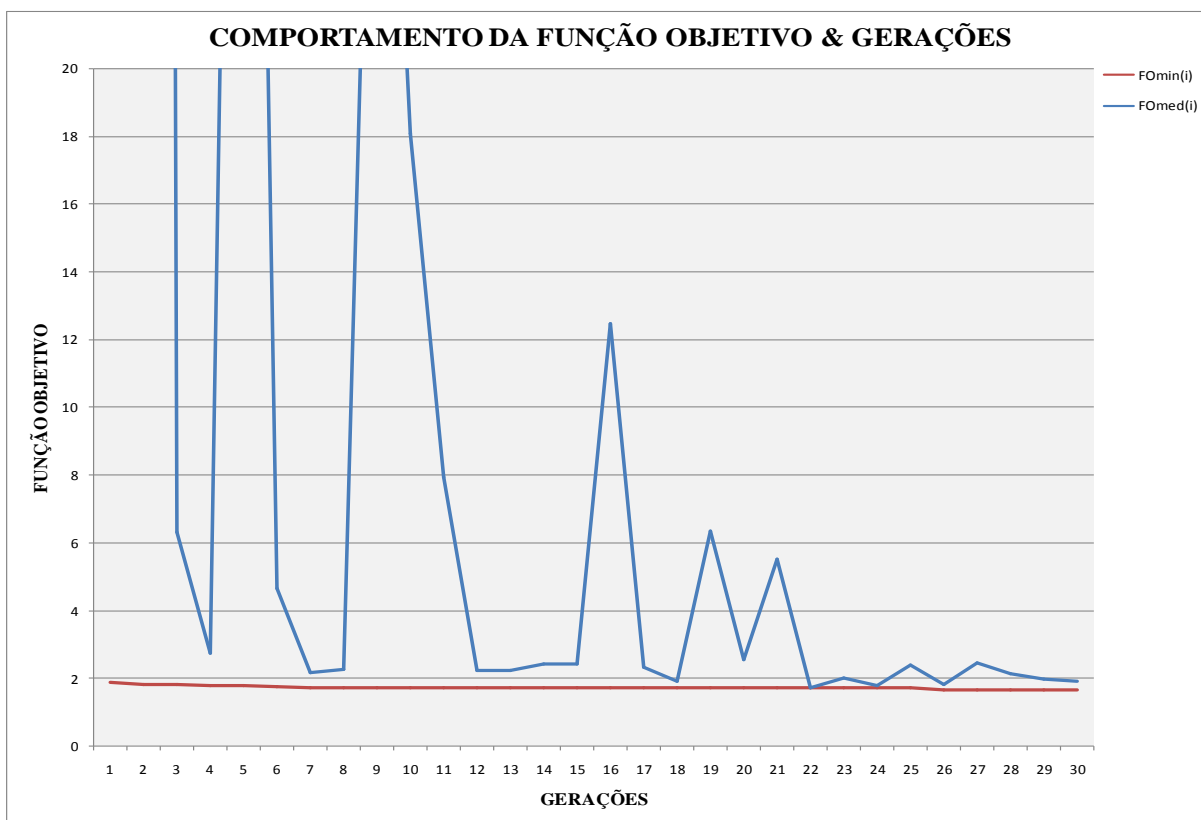


Figura 6.2.42 – Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 11.

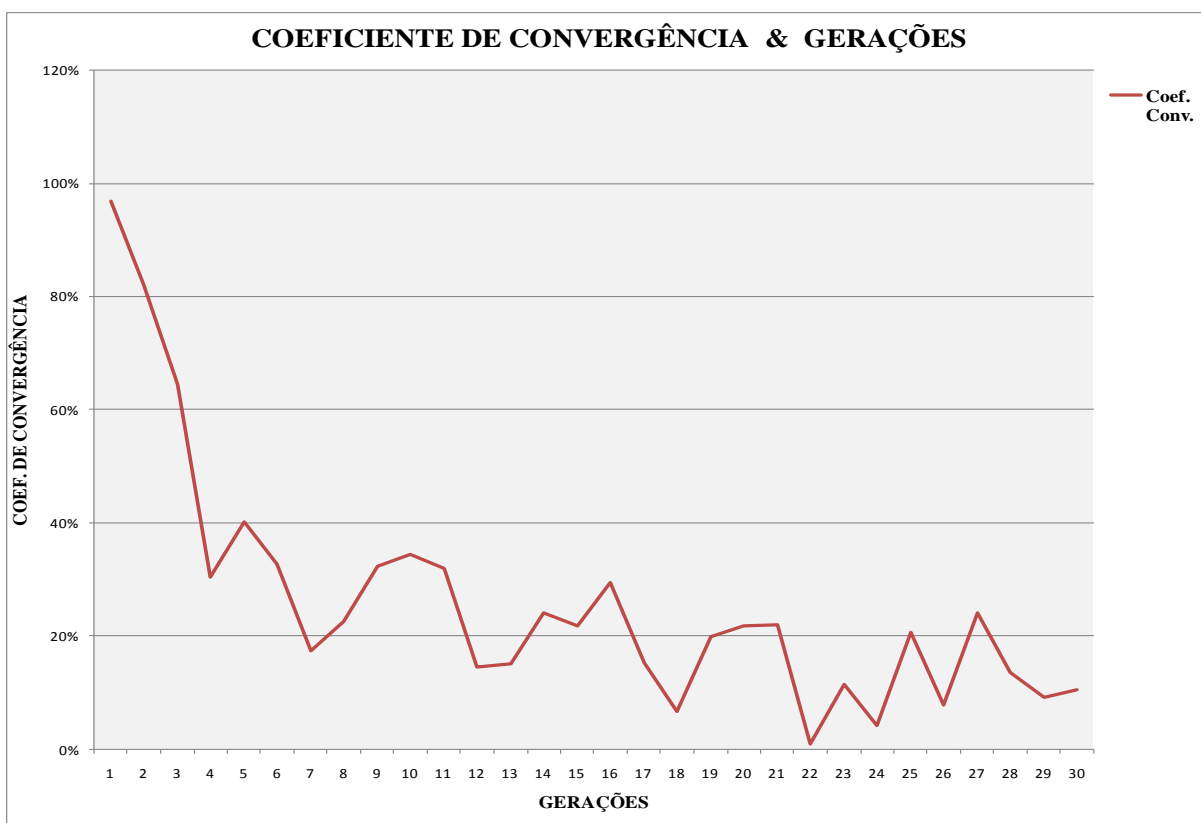


Figura 6.2.43 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 11.

• *Caso 12 – Resultados*

N° DA GERAÇÃO	CASO12	CASO12A	CASO12B	CASO12C	CASO12D	CASO12E
1	1,818	1,935	1,928	1,866	1,781	1,581
2	1,786	1,935	1,928	1,841	1,643	1,581
3	1,770	1,935	1,888	1,805	1,643	1,581
4	1,717	1,816	1,794	1,799	1,643	1,535
5	1,717	1,816	1,794	1,799	1,643	1,535
6	1,717	1,816	1,794	1,799	1,643	1,535
7	1,705	1,816	1,794	1,774	1,605	1,535
8	1,699	1,816	1,777	1,763	1,605	1,535
9	1,681	1,816	1,687	1,763	1,605	1,535
10	1,674	1,816	1,678	1,763	1,581	1,535
11	1,673	1,816	1,671	1,763	1,581	1,535
12	1,668	1,816	1,671	1,739	1,581	1,535
13	1,643	1,816	1,568	1,714	1,581	1,535
14	1,641	1,809	1,568	1,714	1,581	1,535
15	1,624	1,758	1,568	1,680	1,581	1,535
16	1,619	1,758	1,543	1,680	1,581	1,535
17	1,619	1,758	1,543	1,680	1,581	1,535
18	1,606	1,690	1,543	1,680	1,581	1,535
19	1,600	1,681	1,543	1,680	1,562	1,535
20	1,600	1,681	1,543	1,680	1,562	1,535
21	1,592	1,681	1,543	1,680	1,521	1,535
22	1,592	1,681	1,543	1,680	1,521	1,535
23	1,592	1,681	1,543	1,680	1,521	1,535
24	1,590	1,681	1,543	1,680	1,513	1,535
25	1,590	1,681	1,543	1,680	1,513	1,535
26	1,590	1,681	1,543	1,680	1,513	1,535
27	1,590	1,681	1,543	1,680	1,513	1,535
28	1,590	1,681	1,543	1,680	1,513	1,535
29	1,590	1,681	1,543	1,680	1,513	1,535
30	1,590	1,681	1,543	1,680	1,513	1,535
Taxa de Recombinação - [A%]	70%					
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,451	11,473	11,410	11,441	11,480	11,451
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,550	1,508	1,587	1,613	1,587	1,457
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	16,000	19,000	16,000	15,000	24,000	4,000
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,818	1,935	1,928	1,866	1,781	1,581
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,590	1,681	1,543	1,680	1,513	1,535
Melhora no Valor da F. Objetivo [G]=[E]-[F]	0,228	0,254	0,385	0,186	0,268	0,046
Melhora Relativa no Valor da F. Objetivo [H%]=[G]/[D]	1,45%	1,34%	2,41%	1,24%	1,12%	1,14%

Tabela 6.2.43 – Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do caso 12.

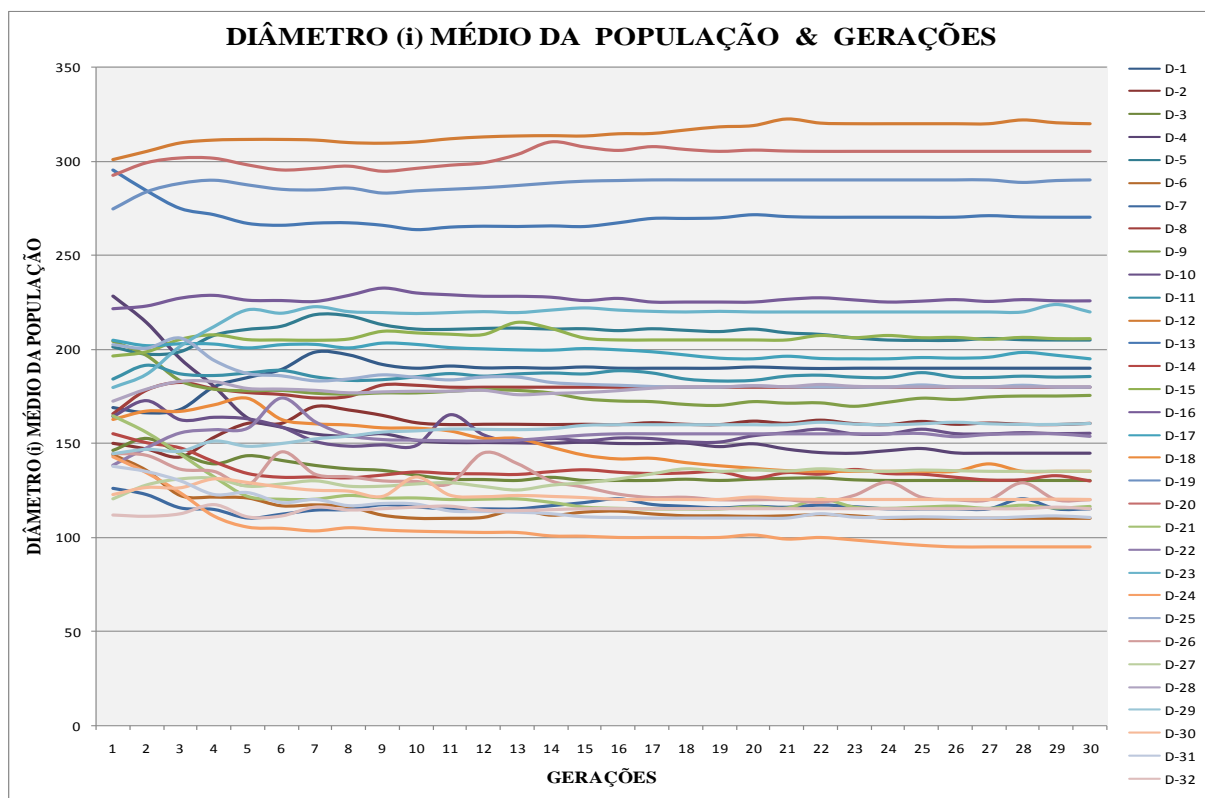


Figura 6.2.44 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 12.

ITER\TUBOS	FOmin(i)	FOmed(i)	FOmax(i)	Coef.Conv.
1	1,818	3.003,578	89.506,440	91,9%
2	1,786	324,102	9.383,916	83,2%
3	1,770	18,058	219,774	66,7%
4	1,717	7,739	123,489	53,0%
5	1,717	2,313	4,821	24,1%
6	1,717	2,990	18,787	30,3%
7	1,705	2,271	5,890	21,4%
8	1,699	1,868	2,791	8,5%
9	1,681	1,864	3,527	9,8%
10	1,674	1,996	7,294	14,6%
11	1,673	1,990	3,235	11,0%
12	1,668	1,897	2,773	10,4%
13	1,643	1,833	2,334	10,1%
14	1,641	1,728	2,260	5,0%
15	1,624	1,676	1,812	3,0%
16	1,619	1,693	2,906	4,1%
17	1,619	1,643	1,689	1,4%
18	1,606	1,655	2,381	2,7%
19	1,600	1,615	1,672	0,9%
20	1,600	2,706	33,423	16,3%
21	1,592	1,642	2,037	3,0%
22	1,592	1,682	2,231	5,2%
23	1,592	1,656	2,416	3,6%
24	1,590	1,779	2,401	8,1%
25	1,590	1,662	2,497	4,2%
26	1,590	1,604	1,718	0,8%
27	1,590	1,610	1,697	1,3%
28	1,590	1,975	3,370	14,9%
29	1,590	1,860	5,054	10,1%
30	1,590	1,598	1,658	0,5%

Tabela 6.2.44 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 12.

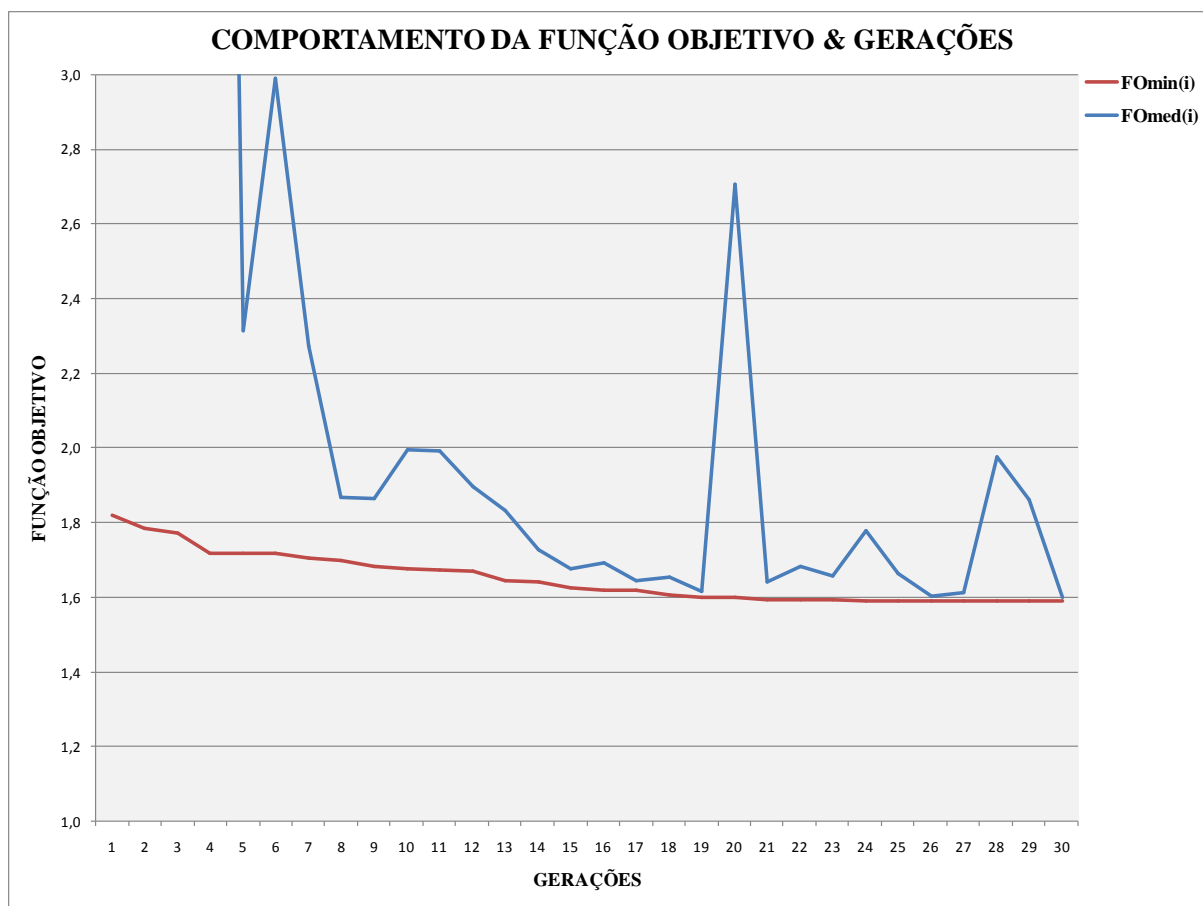


Figura 6.2.45 – Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 12.

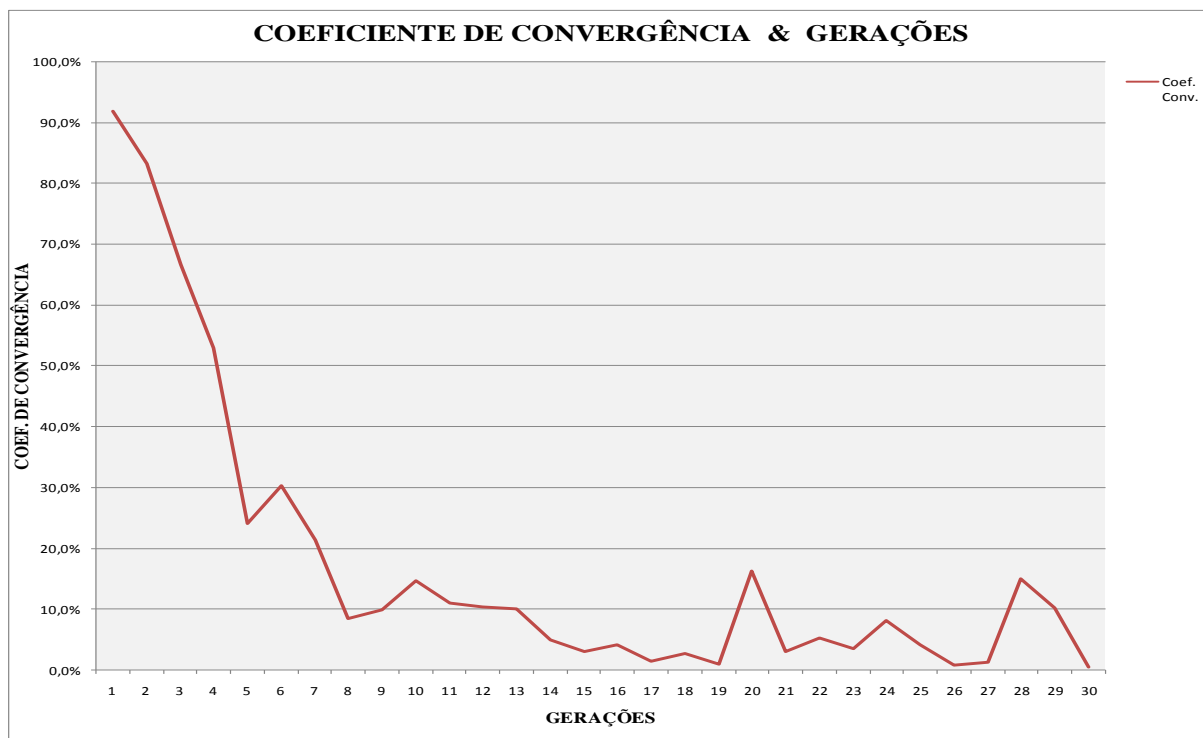


Figura 6.2.46 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 12.

• *Caso 13 – Resultados*

N° DA GERAÇÃO	CASO13	CASO13A	CASO13B	CASO13C	CASO13D	CASO13E
1	1,851	2,337	1,564	2,043	1,708	1,605
2	1,814	2,304	1,564	1,946	1,708	1,550
3	1,759	2,067	1,564	1,946	1,708	1,512
4	1,742	1,980	1,564	1,946	1,708	1,512
5	1,739	1,967	1,564	1,946	1,708	1,512
6	1,714	1,967	1,564	1,854	1,708	1,477
7	1,708	1,938	1,564	1,854	1,708	1,477
8	1,698	1,938	1,564	1,820	1,708	1,460
9	1,680	1,920	1,564	1,800	1,708	1,411
10	1,680	1,920	1,564	1,800	1,708	1,411
11	1,680	1,920	1,564	1,800	1,708	1,411
12	1,680	1,920	1,564	1,800	1,708	1,411
13	1,680	1,920	1,564	1,800	1,708	1,411
14	1,675	1,907	1,564	1,800	1,708	1,398
15	1,673	1,907	1,564	1,800	1,708	1,385
16	1,673	1,907	1,564	1,800	1,708	1,385
17	1,673	1,907	1,564	1,800	1,708	1,385
18	1,670	1,907	1,564	1,800	1,708	1,372
19	1,670	1,907	1,564	1,800	1,708	1,372
20	1,665	1,907	1,564	1,800	1,681	1,372
21	1,665	1,907	1,564	1,800	1,681	1,372
22	1,665	1,907	1,564	1,800	1,681	1,372
23	1,665	1,907	1,564	1,800	1,681	1,372
24	1,665	1,907	1,564	1,800	1,681	1,372
25	1,662	1,907	1,550	1,800	1,681	1,372
26	1,662	1,907	1,550	1,800	1,681	1,372
27	1,662	1,907	1,550	1,800	1,681	1,372
28	1,662	1,907	1,550	1,800	1,681	1,372
29	1,662	1,907	1,550	1,800	1,681	1,372
30	1,662	1,907	1,550	1,800	1,681	1,372
Taxa de Recombinação - [A%]	80%					
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,490	11,550	11,493	11,414	11,552	11,441
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,555	1,517	1,553	1,551	1,497	1,655
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	17,000	14,000	25,000	9,000	20,000	18,000
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,851	2,337	1,564	2,043	1,708	1,605
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,662	1,907	1,550	1,800	1,681	1,372
Melhora no Valor da F. Objetivo [G]=[E]-[F]	0,189	0,430	0,014	0,243	0,027	0,232
Melhora Relativa no Valor da F. Objetivo [H%]=[G]/[D]	1,45%	3,07%	0,05%	2,71%	0,13%	1,29%

Tabela 6.2.45 – Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do caso 13.



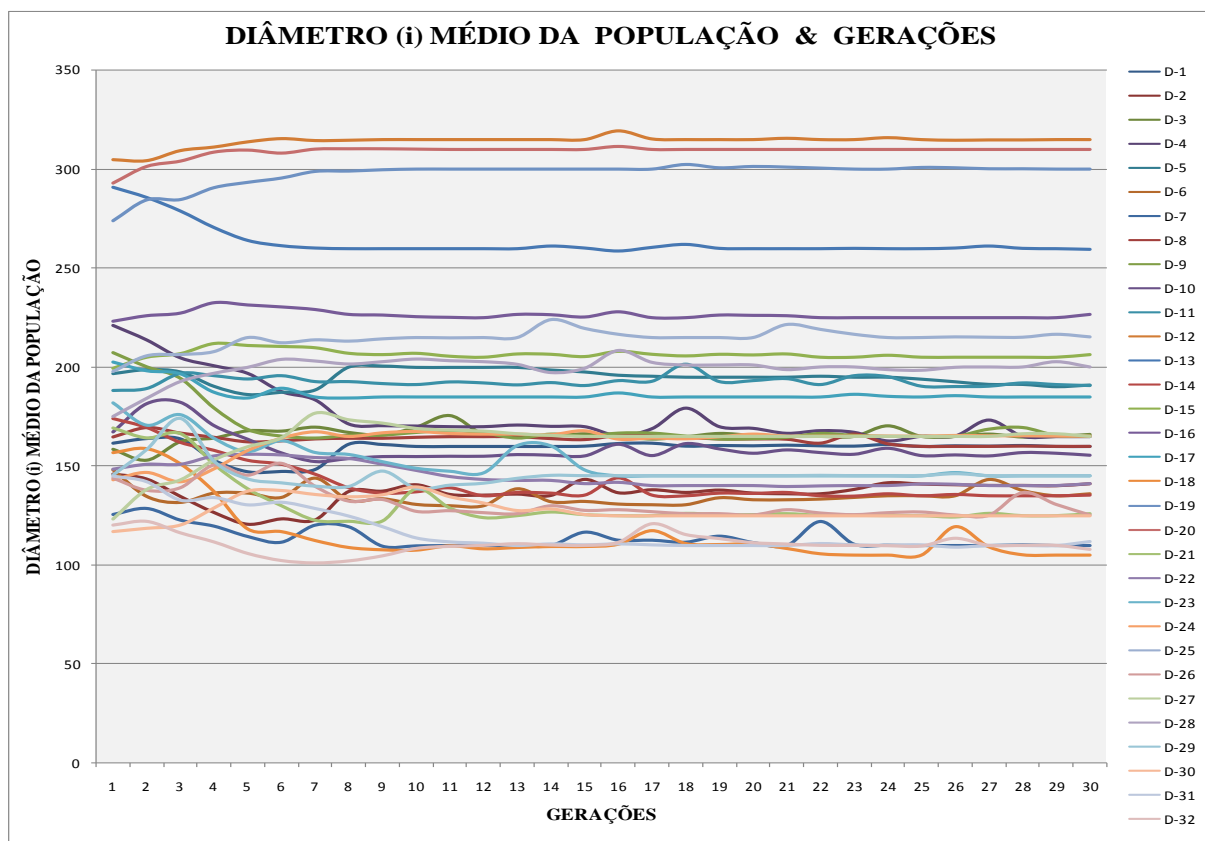


Figura 6.2.47 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 13.

ITER\TUBOS	F0min(i)	F0med(i)	F0max(i)	Coef.Conv.
1	1,851	2.464,623	67.374,857	98,2%
2	1,814	48,618	1.226,653	83,8%
3	1,759	7,527	56,913	64,8%
4	1,742	7,212	109,505	58,2%
5	1,739	102,168	2.906,135	52,4%
6	1,714	5,810	16,087	38,1%
7	1,708	4,993	48,940	41,3%
8	1,698	2,290	4,925	18,6%
9	1,680	2,034	5,494	16,6%
10	1,680	2,074	4,010	13,9%
11	1,680	1,888	3,734	10,9%
12	1,680	1,696	1,782	1,0%
13	1,680	1,902	2,810	8,6%
14	1,675	1,892	2,416	10,3%
15	1,673	8,154	47,878	27,5%
16	1,673	2,210	4,359	20,5%
17	1,673	2,017	3,147	13,7%
18	1,670	1,841	3,158	8,8%
19	1,670	1,782	2,120	6,1%
20	1,665	1,728	2,059	3,7%
21	1,665	1,753	2,030	5,0%
22	1,665	2,167	4,304	15,2%
23	1,665	1,740	2,101	3,9%
24	1,665	1,782	2,629	6,7%
25	1,662	1,683	1,789	1,2%
26	1,662	2,309	4,398	13,7%
27	1,662	2,210	5,385	18,3%
28	1,662	1,930	3,244	10,4%
29	1,662	1,767	2,604	4,7%
30	1,662	1,676	1,746	0,9%

Tabela 6.2.46 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 13

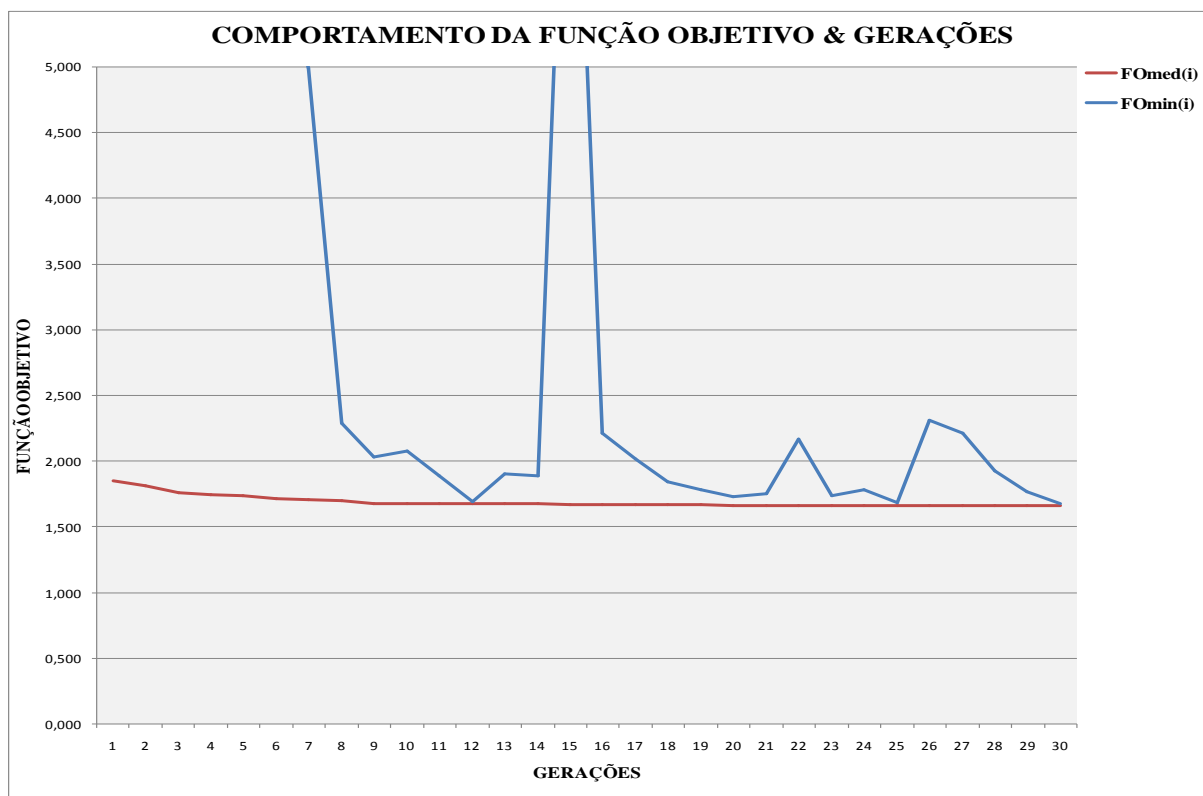


Figura 6.2.48 – Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do caso 13.

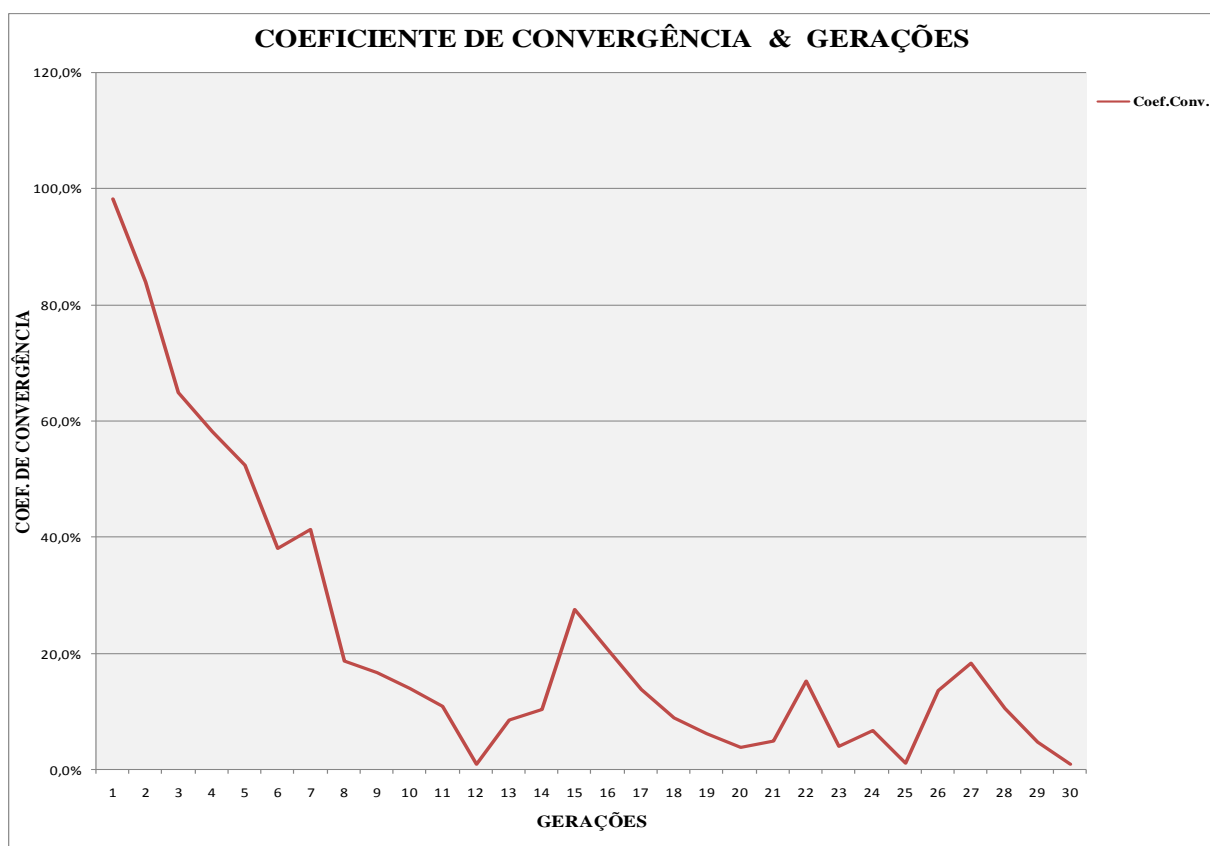


Figura 6.2.49 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do caso 13.

• *Caso 14 – Resultados*

Nº DA GERAÇÃO	CASO14	CASO14A	CASO14B	CASO14C	CASO14D	CASO14E
1	1,808	1,810	1,774	1,769	2,019	1,667
2	1,802	1,810	1,774	1,740	2,019	1,667
3	1,773	1,810	1,774	1,595	2,019	1,667
4	1,754	1,746	1,746	1,595	2,019	1,667
5	1,693	1,746	1,570	1,591	1,891	1,667
6	1,687	1,746	1,540	1,591	1,891	1,667
7	1,674	1,715	1,540	1,559	1,891	1,667
8	1,674	1,715	1,539	1,559	1,891	1,667
9	1,669	1,689	1,539	1,559	1,891	1,667
10	1,663	1,685	1,539	1,532	1,891	1,667
11	1,652	1,685	1,487	1,532	1,891	1,667
12	1,648	1,685	1,487	1,509	1,891	1,667
13	1,627	1,580	1,487	1,509	1,891	1,667
14	1,627	1,580	1,487	1,509	1,891	1,667
15	1,627	1,580	1,487	1,509	1,891	1,667
16	1,627	1,580	1,487	1,509	1,891	1,667
17	1,625	1,580	1,487	1,509	1,885	1,667
18	1,625	1,580	1,487	1,509	1,885	1,667
19	1,625	1,580	1,487	1,509	1,885	1,667
20	1,625	1,580	1,487	1,509	1,885	1,667
21	1,625	1,580	1,487	1,509	1,885	1,667
22	1,625	1,580	1,487	1,509	1,885	1,667
23	1,625	1,580	1,487	1,509	1,885	1,667
24	1,625	1,580	1,487	1,509	1,885	1,667
25	1,625	1,580	1,487	1,509	1,885	1,667
26	1,625	1,580	1,487	1,509	1,885	1,667
27	1,622	1,580	1,487	1,509	1,870	1,667
28	1,622	1,580	1,487	1,509	1,870	1,667
29	1,622	1,580	1,487	1,509	1,870	1,667
30	1,622	1,580	1,487	1,509	1,870	1,667
Taxa de Recombinação - [A%]	90%					
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,474	11,432	11,503	11,426	11,413	11,597
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,572	1,606	1,584	1,626	1,515	1,530
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	13,000	13,000	11,000	12,000	27,000	1,000
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,808	1,810	1,774	1,769	2,019	1,667
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,622	1,580	1,487	1,509	1,870	1,667
Melhora no Valor da F. Objetivo [G]=[E]-[F]	0,186	0,230	0,288	0,261	0,149	0,000
Melhora Relativa no Valor da F. Objetivo [H%]=[G]/[D]	1,42%	1,77%	2,61%	2,17%	0,55%	0,00%

Tabela 6.2.47 – Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do caso 14.

Observe-se que a simulação *CASO 14E*, não melhorou o valor da função objetivo, obtendo o mesmo valor mínimo para a função objetivo em todas as gerações.

Isto quer dizer que para esta simulação há melhora nos valores médios da função objetivo (constatado na tabela 6.2.47), ou seja, há convergência na população, mas não se pode melhorar o valor mínimo devido ao fator da aleatoriedade, de se obter já na primeira geração um valor muito baixo para a função objetivo, e de ao longo do processo os operadores de recombinação (com certo teor randômico) e de mutação (randômico) coincidentemente não gerarem soluções mais aptas.

<b>ITER\TUBOS</b>	<b>FOmin(i)</b>	<b>FOmed(i)</b>	<b>FOmax(i)</b>	<b>Coef.Conv.</b>
1	1,667	29,040	326,452	94,3%
2	1,667	61,829	1.038,471	97,3%
3	1,667	344,886	9.865,068	99,5%
4	1,667	43,023	1.073,171	96,1%
5	1,667	7,636	142,732	78,2%
6	1,667	13,423	329,993	87,6%
7	1,667	1,913	3,119	12,9%
8	1,667	1,727	2,173	3,5%
9	1,667	1,944	2,498	14,2%
10	1,667	2,318	7,626	28,1%
11	1,667	1,944	2,496	14,2%
12	1,667	1,821	2,177	8,4%
13	1,667	1,725	2,172	3,4%
14	1,667	1,674	1,719	0,4%
15	1,667	1,880	2,117	11,3%
16	1,667	1,741	2,117	4,3%
17	1,667	1,667	1,667	0,0%
18	1,667	2,501	4,147	33,4%
19	1,667	1,827	4,147	8,8%
20	1,667	4,736	12,976	64,8%
21	1,667	1,714	2,060	2,8%
22	1,667	1,668	1,708	0,1%
23	1,667	1,904	2,682	12,4%
24	1,667	49,661	359,554	96,6%
25	1,667	1,756	2,558	5,1%
26	1,667	1,667	1,667	0,0%
27	1,667	1,667	1,667	0,0%
28	1,667	1,719	2,188	3,0%
29	1,667	1,667	1,667	0,0%
30	1,667	1,707	1,909	2,4%

Tabela 6.2.48 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração para a simulação do Caso 14E

Ressalte-se que nas gerações 17, 26, 27 e 29 o coeficiente de convergência iguala-se a zero, significando que nestas gerações todas as soluções da população convergiram ao mesmo valor para todos os respectivos diâmetros da rede e conseqüentemente ao mesmo valor da função objetivo. Porém não se gera uma solução mais apta que a encontrada já na primeira geração.

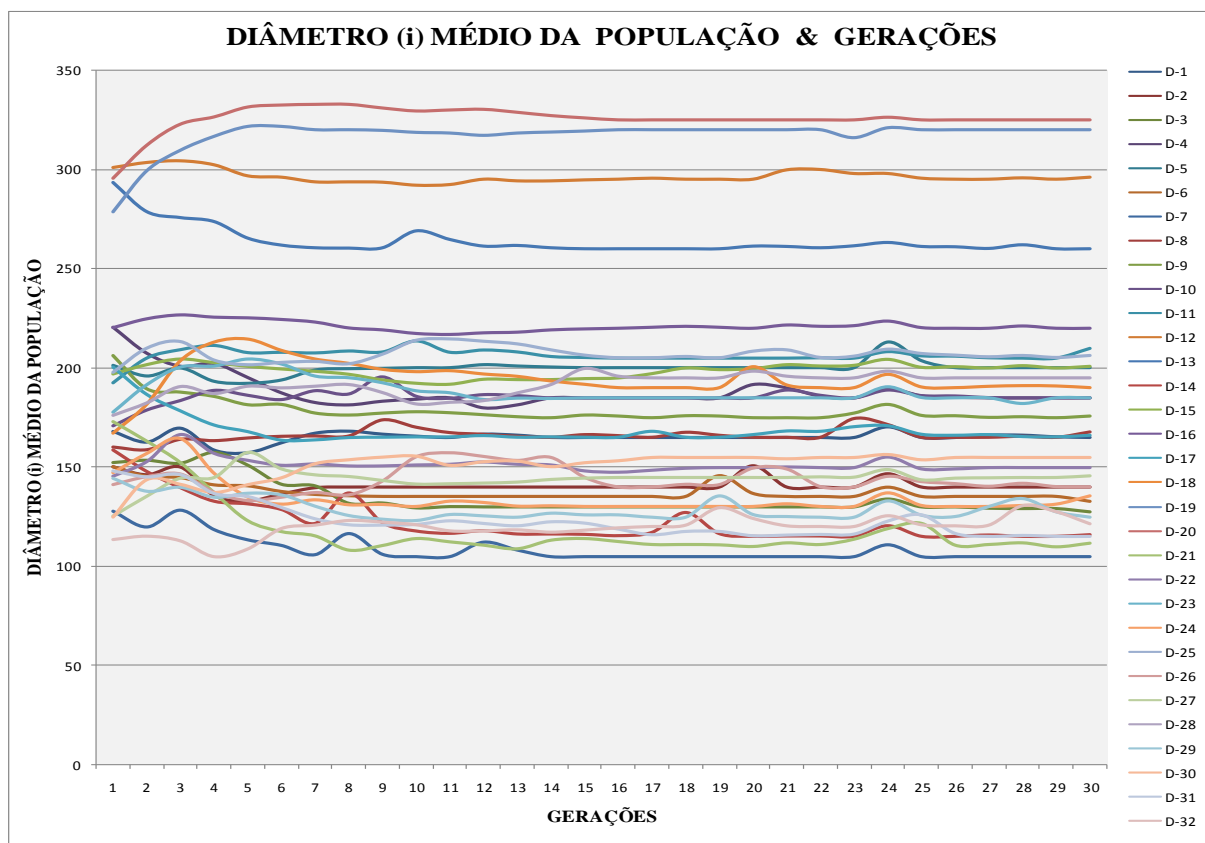


Figura 6.2.50 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 14.

ITER\TUBOS	FOMin(i)	FOMed(i)	FOMax(i)	Coef.Conv.
1	1,808	180,321	4.478,011	97,2%
2	1,802	43,273	721,655	88,6%
3	1,773	2.006,836	59.650,944	89,2%
4	1,754	16,831	321,707	72,3%
5	1,693	37,952	1.041,448	75,4%
6	1,687	4,922	78,902	48,4%
7	1,674	2,087	3,344	19,2%
8	1,674	2,703	8,184	28,7%
9	1,669	2,230	5,124	20,1%
10	1,663	1,969	5,783	14,7%
11	1,652	1,838	3,403	9,7%
12	1,648	2,122	3,695	17,1%
13	1,627	1,759	2,236	7,1%
14	1,627	1,765	2,521	6,7%
15	1,627	1,714	2,008	4,8%
16	1,627	1,652	1,751	1,5%
17	1,625	1,693	2,280	3,3%
18	1,625	1,804	2,179	7,3%
19	1,625	7,040	23,871	26,3%
20	1,625	2,960	10,185	31,2%
21	1,625	6,032	126,100	20,7%
22	1,625	1,664	2,067	2,3%
23	1,625	1,757	2,155	7,4%
24	1,625	11,349	74,014	24,7%
25	1,625	2,270	5,670	22,8%
26	1,625	1,680	2,693	3,3%
27	1,622	1,692	2,179	4,0%
28	1,622	2,521	6,449	17,1%
29	1,622	1,808	2,701	7,1%
30	1,622	1,772	4,780	8,0%

Tabela 6.2.49 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 14.

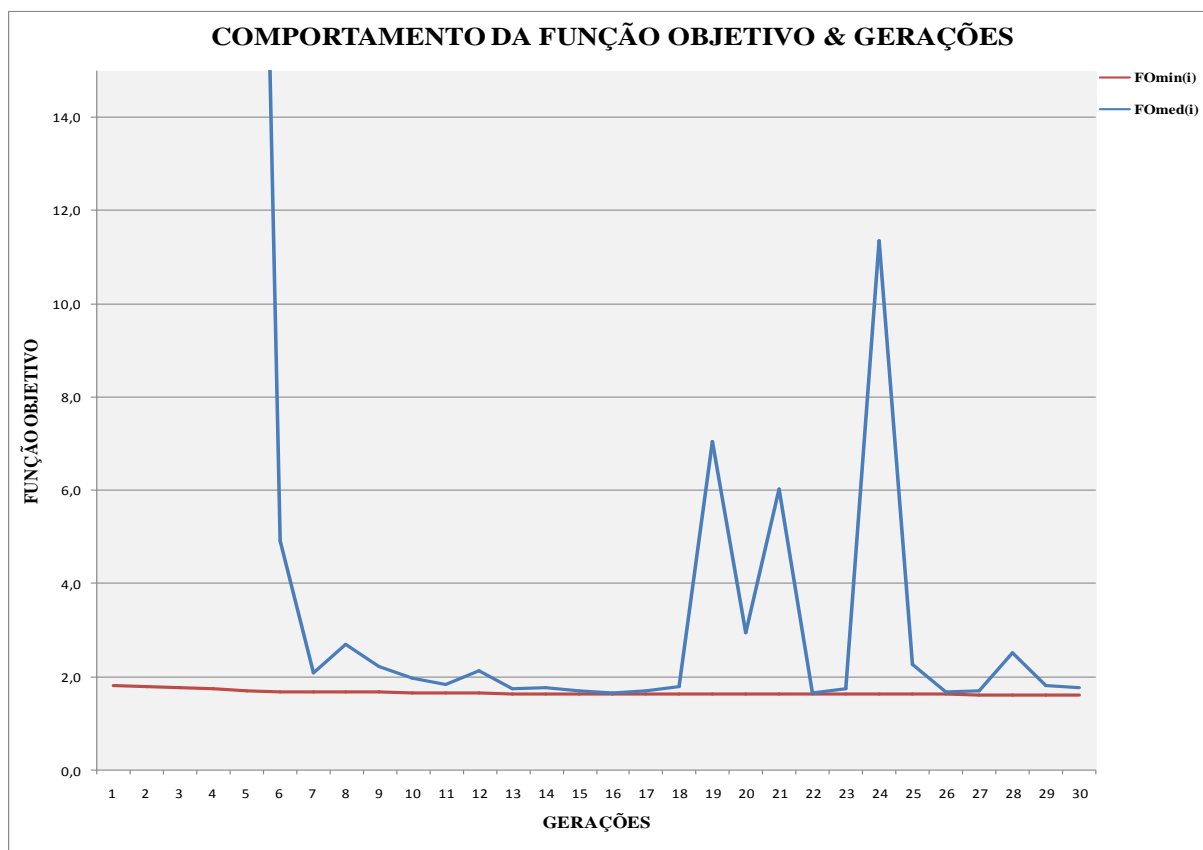


Figura 6.2.51 – Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 14.

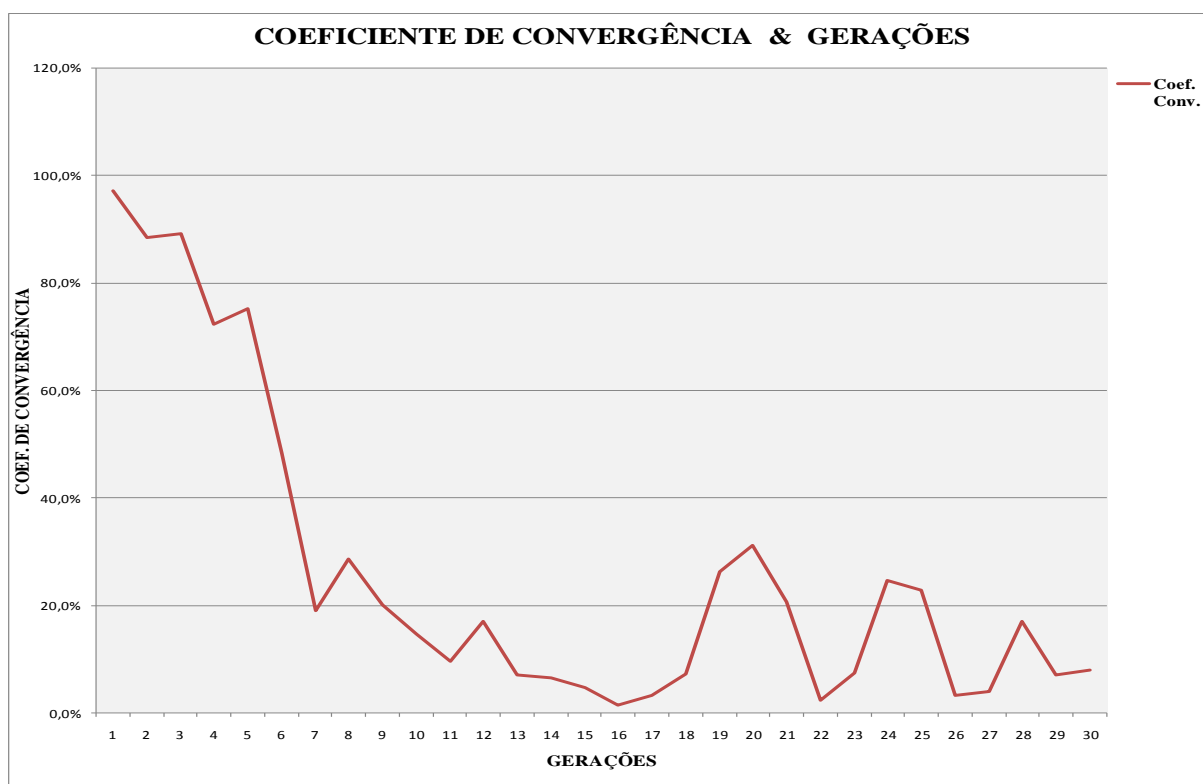


Figura 6.2.52 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 14.

• *Caso 15 – Resultados*

Nº DA GERAÇÃO	CASO15	CASO15A	CASO15B	CASO15C	CASO15D	CASO15E
1	1,978	1,775	2,477	2,138	1,970	1,530
2	1,890	1,730	2,477	1,743	1,970	1,530
3	1,780	1,730	1,997	1,743	1,899	1,530
4	1,776	1,710	1,997	1,743	1,899	1,530
5	1,767	1,710	1,965	1,743	1,888	1,530
6	1,713	1,710	1,741	1,743	1,841	1,530
7	1,712	1,705	1,741	1,743	1,841	1,530
8	1,708	1,685	1,741	1,743	1,841	1,530
9	1,671	1,685	1,573	1,743	1,824	1,530
10	1,671	1,685	1,573	1,743	1,824	1,530
11	1,671	1,685	1,573	1,743	1,824	1,530
12	1,671	1,685	1,573	1,743	1,824	1,530
13	1,671	1,685	1,573	1,743	1,824	1,530
14	1,669	1,674	1,573	1,743	1,824	1,530
15	1,657	1,674	1,573	1,682	1,824	1,530
16	1,657	1,674	1,573	1,682	1,824	1,530
17	1,657	1,674	1,573	1,682	1,824	1,530
18	1,656	1,674	1,573	1,679	1,823	1,530
19	1,656	1,674	1,573	1,679	1,823	1,530
20	1,656	1,674	1,573	1,679	1,823	1,530
21	1,656	1,674	1,573	1,679	1,823	1,530
22	1,652	1,674	1,573	1,661	1,823	1,530
23	1,652	1,674	1,573	1,661	1,823	1,530
24	1,652	1,674	1,573	1,661	1,823	1,530
25	1,652	1,674	1,573	1,661	1,823	1,530
26	1,646	1,674	1,573	1,661	1,823	1,502
27	1,646	1,674	1,573	1,661	1,823	1,502
28	1,630	1,674	1,573	1,661	1,739	1,502
29	1,622	1,637	1,573	1,661	1,739	1,502
30	1,622	1,637	1,573	1,661	1,739	1,502
Taxa de Recombinação - [A%]	100%					
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,566	11,545	11,514	11,358	11,580	11,832
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,609	1,65	1,6	1,565	1,631	1,597
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	23,000	29	9	22	28	26
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,978	1,775	2,477	2,138	1,970	1,530
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,622	1,637	1,573	1,661	1,739	1,502
Melhora no Valor da F. Objetivo [G]=[E]-[F]	0,356	0,138	0,904	0,477	0,231	0,028
Melhora Relativa no Valor da F. Objetivo [H%]=[G]/[D]	2,72%	0,48%	10,04%	2,17%	0,83%	0,11%

Tabela 6.2.50 – Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do Caso 15.

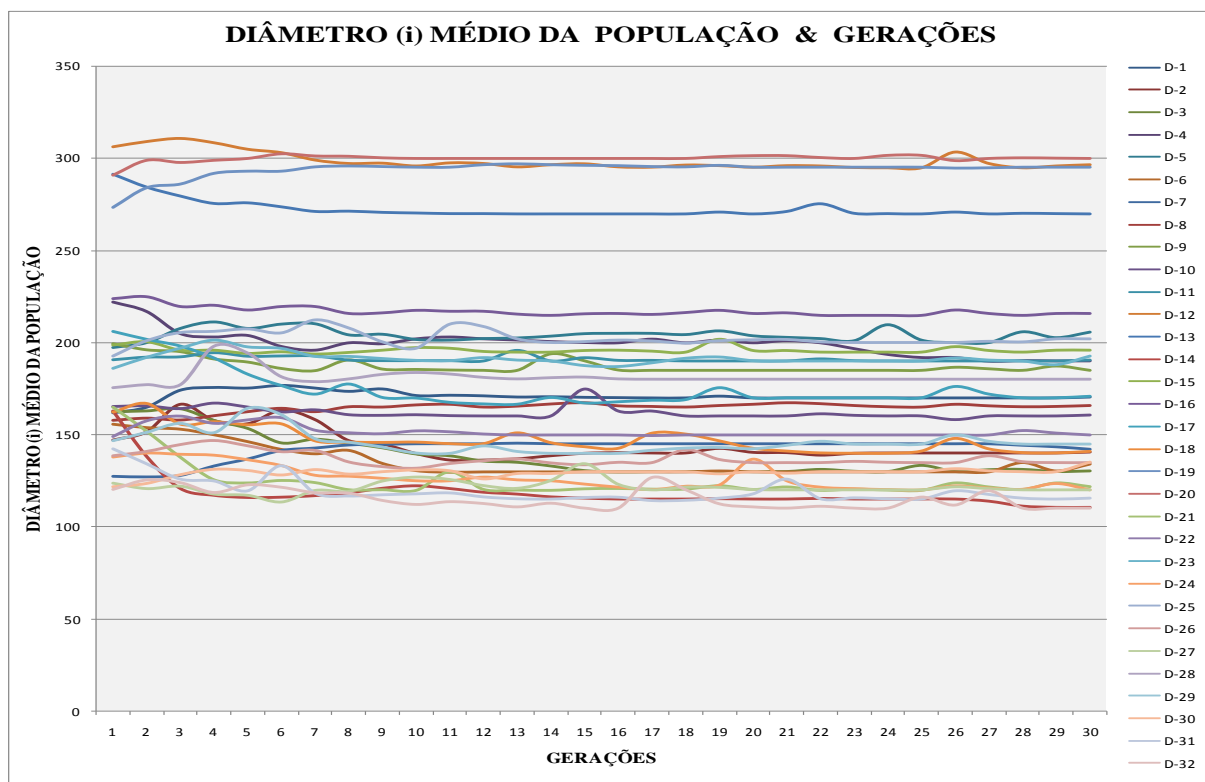


Figura 6.2.53 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 15.

ITER\TUBOS	F0min(i)	F0med(i)	F0max(i)	Coef.Conv.
1	1,978	677,618	18.836,851	98,8%
2	1,890	43,910	820,210	95,4%
3	1,780	8,005	67,525	77,6%
4	1,776	5,906	69,442	61,9%
5	1,767	380,543	11.150,723	61,7%
6	1,713	25,673	266,969	60,6%
7	1,712	3,725	47,613	48,3%
8	1,708	2,163	3,708	20,5%
9	1,671	2,007	5,104	15,3%
10	1,671	1,814	2,627	7,7%
11	1,671	2,008	5,662	16,1%
12	1,671	1,746	1,958	4,2%
13	1,671	1,802	2,436	6,8%
14	1,669	2,131	5,995	18,5%
15	1,657	1,995	2,847	14,8%
16	1,657	1,749	2,444	4,9%
17	1,657	2,387	4,453	17,6%
18	1,656	3,029	35,195	22,8%
19	1,656	1,920	3,597	12,0%
20	1,656	1,794	2,353	7,3%
21	1,656	1,896	3,086	9,5%
22	1,652	1,703	1,952	3,0%
23	1,652	1,672	1,776	1,2%
24	1,652	1,698	1,900	2,5%
25	1,652	1,995	4,603	11,9%
26	1,646	1,889	2,454	10,2%
27	1,646	2,202	5,139	17,4%
28	1,630	1,926	4,212	10,5%
29	1,622	1,721	2,422	5,7%
30	1,622	1,902	3,679	13,7%

Tabela 6.2.51 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 15.



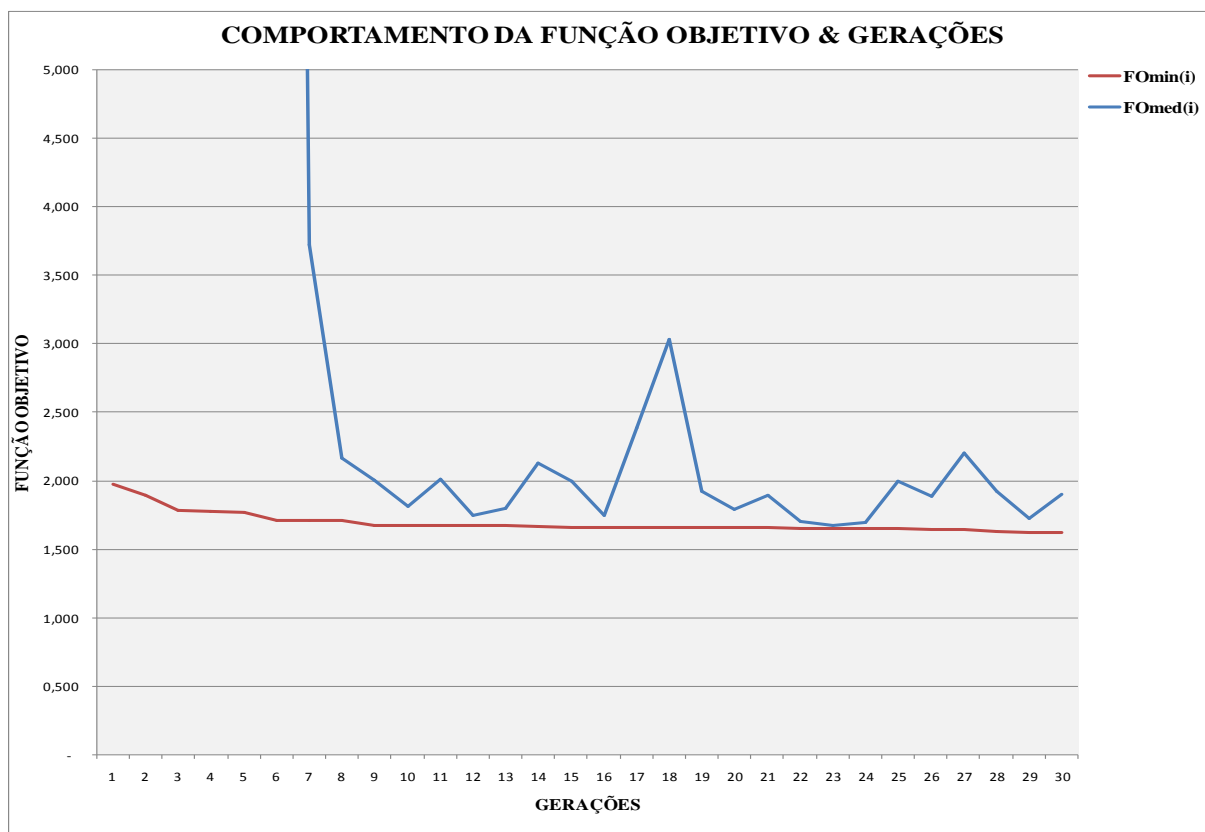


Figura 6.2.54 – Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 15.

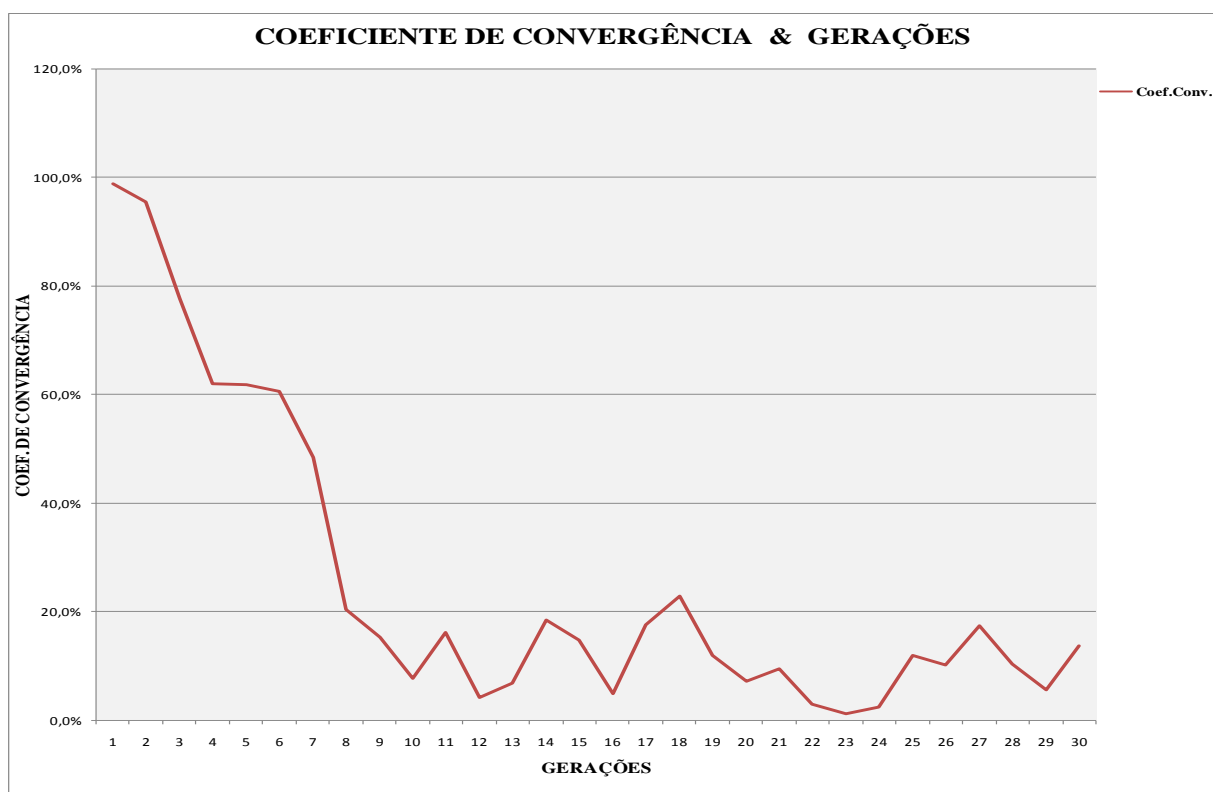


Figura 6.2.55 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 15.

• *Síntese Analítica do Grupo 3*

Nº DA GERAÇÃO	CASO11	CASO12	CASO13	CASO14	CASO15
1	1,891	1,818	1,851	1,808	1,978
2	1,813	1,786	1,814	1,802	1,890
3	1,812	1,770	1,759	1,773	1,780
4	1,793	1,717	1,742	1,754	1,776
5	1,780	1,717	1,739	1,693	1,767
6	1,763	1,717	1,714	1,687	1,713
7	1,727	1,705	1,708	1,674	1,712
8	1,727	1,699	1,698	1,674	1,708
9	1,727	1,681	1,680	1,669	1,671
10	1,707	1,674	1,680	1,663	1,671
11	1,707	1,673	1,680	1,652	1,671
12	1,707	1,668	1,680	1,648	1,671
13	1,707	1,643	1,680	1,627	1,671
14	1,707	1,641	1,675	1,627	1,669
15	1,706	1,624	1,673	1,627	1,657
16	1,706	1,619	1,673	1,627	1,657
17	1,706	1,619	1,673	1,625	1,657
18	1,703	1,606	1,670	1,625	1,656
19	1,703	1,600	1,670	1,625	1,656
20	1,703	1,600	1,665	1,625	1,656
21	1,703	1,592	1,665	1,625	1,656
22	1,703	1,592	1,665	1,625	1,652
23	1,703	1,592	1,665	1,625	1,652
24	1,703	1,590	1,665	1,625	1,652
25	1,703	1,590	1,662	1,625	1,652
26	1,653	1,590	1,662	1,625	1,646
27	1,653	1,590	1,662	1,622	1,646
28	1,653	1,590	1,662	1,622	1,630
29	1,653	1,590	1,662	1,622	1,622
30	1,644	1,590	1,662	1,622	1,622
Taxa de Recombinação - [A%]	50%	70%	80%	90%	100%
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,625	11,451	11,490	11,474	11,566
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,496	1,550	1,555	1,572	1,609
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	19,000	16,000	17,000	13,000	23,000
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,891	1,818	1,851	1,808	1,978
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,644	1,590	1,662	1,622	1,622
Melhora no Valor da F. Objetivo [G]=[E]-[F]	0,247	0,228	0,189	0,186	0,356
Melhora Relativa no Valor da F. Objetivo [H%]=[G]/[D]	1,42%	1,45%	1,45%	1,42%	2,72%

Tabela 6.2.52 – Valores da função objetivo da melhor solução a cada geração nos casos do grupo 3.

A análise dos resultados apresentados na tabela 6.2.52, que para cada caso sintetiza a média aritmética de cinco simulações, demonstra em primeiro lugar uma proximidade de valores mínimos da função objetivo, o menos apto (caso11 - FOmin=1,644) é apenas 4,53% maior que o melhor resultado (caso12 - FOmin=1,590). Ou seja, as melhores soluções de cada caso convergindo para valores muito próximos.

Em segundo lugar, uma proximidade também nos desempenhos associados ao esforço computacional como tempo de processamento e capacidade (tamanho) requerida do arquivo. O caso 11 requer mais tempo de processamento (11,625 minutos) cerca de 1,52% a mais que o caso 12 (11,451 minutos), o mais rápido.

Para ambos os parâmetros o efeito da aleatoriedade não permite uma perfeita correlação com a taxa de recombinação. Explica-se: esperava-se que uma taxa de recombinação maior favorecesse a localização de melhores soluções. E conseqüentemente aguardava-se um maior tempo de processamento para uma maior taxa de recombinação, o que não ocorrem nos resultados apresentados.

Quanto à outra componente do esforço computacional, a capacidade requerida do arquivo, demonstrou ter uma perfeita correlação com a taxa de recombinação, embora também a relação de diferença nos desempenhos do pior (caso 15 – 1,609Mb) para o melhor (caso 11 – 1,496Mb) esteja muito próxima, cerca de 7,55%.

O índice de melhora relativa no valor da função objetivo é mais adequado para representar os desempenhos dos casos com diferentes taxas de recombinação, por levar em consideração somente as iterações até a geração onde se encontra a melhor solução. Sintetizando mais apropriadamente o gradiente de pressão que o operador crossover realiza na busca de uma solução mais apta.

Para este último parâmetro observa-se certa correlação com a taxa de recombinação, a exceção é o *CASO 14*, que em uma de suas simulações (*CASO 14E*), apresenta a mesma melhor solução para todas as gerações (apresentado anteriormente).

Desconsiderando esta simulação, ou seja, considerando o *CASO 14* como a média aritmética das outras quatro simulações, o índice de melhora relativa no valor da função objetivo deste caso elevar-se-ia para 1,78%, demonstrando assim uma perfeita correlação com a taxa de recombinação.

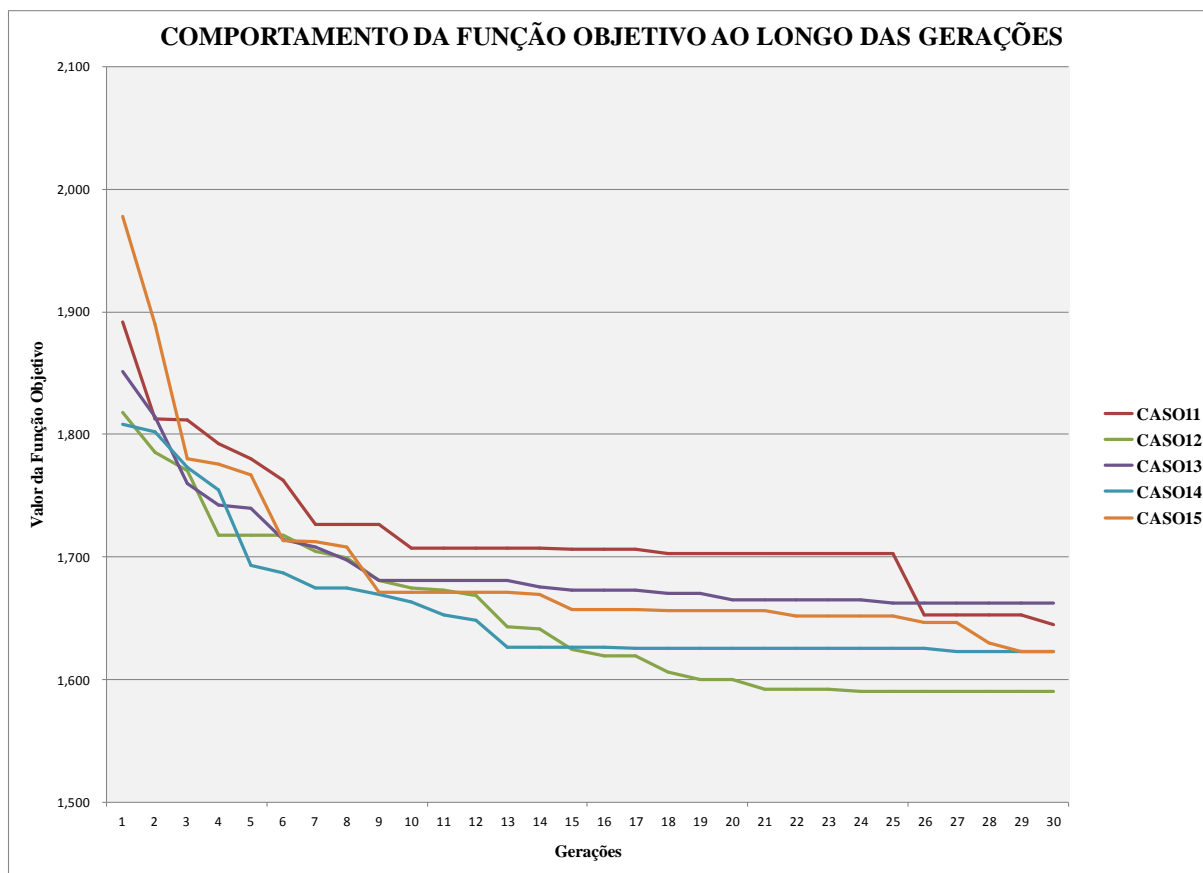


Figura 6.2.56 – Comparação do comportamento da função objetiva ao longo das gerações para os casos do grupo 3.

A figura 6.2.56 demonstra a proximidade de convergência e de desempenhos para as diferentes taxas de recombinação de cada caso, evidenciando também a falta de correlação entre as maiores taxas e as melhores soluções, devido à aleatoriedade envolvida no processo.

Podem-se observar ainda através da figura 6.2.56 as correlações entre as maiores taxas de recombinação e os maiores gradientes (diminuição) iniciais dos valores mínimos da função objetivo.

Devido à proximidade dos desempenhos no esforço computacional dos casos deste grupo (1,52% para tempo de processamento e 7,55% para memória requerida), os mesmos tornam-se irrelevantes frente à tentativa de melhorar o desempenho de convergência ou proximidade da solução ao resultado ótimo do problema.

<b>N° DA GERAÇÃO</b>	<b>CASO11</b>	<b>CASO12</b>	<b>CASO13</b>	<b>CASO14</b>	<b>CASO15</b>
<b>1</b>	96,9%	91,9%	98,2%	97,2%	98,8%
<b>2</b>	82,1%	83,2%	83,8%	88,6%	95,4%
<b>3</b>	64,5%	66,7%	64,8%	89,2%	77,6%
<b>4</b>	30,4%	53,0%	58,2%	72,3%	61,9%
<b>5</b>	40,1%	24,1%	52,4%	75,4%	61,7%
<b>6</b>	32,7%	30,3%	38,1%	48,4%	60,6%
<b>7</b>	17,3%	21,4%	41,3%	19,2%	48,3%
<b>8</b>	22,6%	8,5%	18,6%	28,7%	20,5%
<b>9</b>	32,4%	9,8%	16,6%	20,1%	15,3%
<b>10</b>	34,5%	14,6%	13,9%	14,7%	7,7%
<b>11</b>	31,9%	11,0%	10,9%	9,7%	16,1%
<b>12</b>	14,5%	10,4%	1,0%	17,1%	4,2%
<b>13</b>	15,1%	10,1%	8,6%	7,1%	6,8%
<b>14</b>	24,0%	5,0%	10,3%	6,7%	18,5%
<b>15</b>	21,8%	3,0%	27,5%	4,8%	14,8%
<b>16</b>	29,5%	4,1%	20,5%	1,5%	4,9%
<b>17</b>	15,3%	1,4%	13,7%	3,3%	17,6%
<b>18</b>	6,7%	2,7%	8,8%	7,3%	22,8%
<b>19</b>	19,9%	0,9%	6,1%	26,3%	12,0%
<b>20</b>	21,8%	16,3%	3,7%	31,2%	7,3%
<b>21</b>	21,9%	3,0%	5,0%	20,7%	9,5%
<b>22</b>	0,9%	5,2%	15,2%	2,3%	3,0%
<b>23</b>	11,4%	3,6%	3,9%	7,4%	1,2%
<b>24</b>	4,2%	8,1%	6,7%	24,7%	2,5%
<b>25</b>	20,7%	4,2%	1,2%	22,8%	11,9%
<b>26</b>	7,8%	0,8%	13,7%	3,3%	10,2%
<b>27</b>	24,2%	1,3%	18,3%	4,0%	17,4%
<b>28</b>	13,5%	14,9%	10,4%	17,1%	10,5%
<b>29</b>	9,1%	10,1%	4,7%	7,1%	5,7%
<b>30</b>	10,5%	0,5%	0,9%	8,0%	13,7%

Tabela 6.2.53 – Valores dos Coeficientes de Convergência a cada geração nos casos do grupo 3.

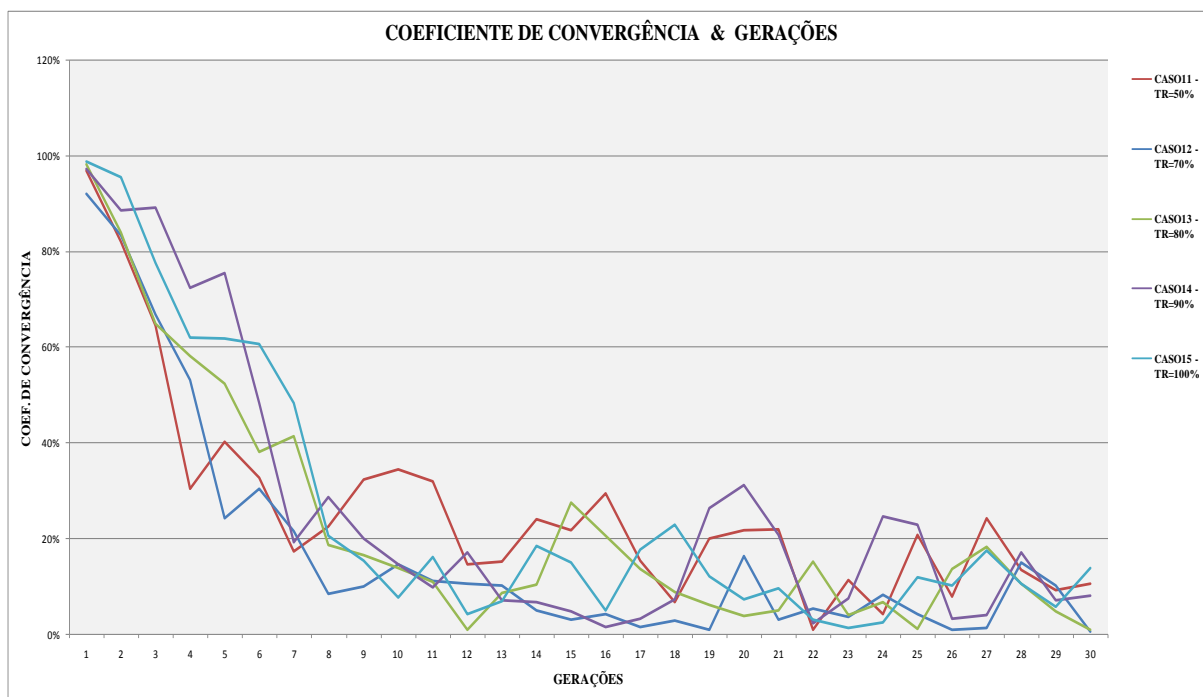


Figura 6.2.57 – Comparação do comportamento dos Coeficientes de Convergência ao longo das gerações para os casos do grupo 3

A tabela 6.2.53 e a figura 6.2.57 apresentam os valores dos coeficientes de convergência dos casos do grupo 3 a cada geração.

O coeficiente de convergência representa a diversidade dos cromossomos na população, quando nulo ( $FO_{med} = FO_{min}$ ) significa que todas as soluções convergem a um único valor, passando o AG a depender unicamente do operador mutação, pois o cruzamento de soluções (pais) iguais resultam em filhos iguais aos pais.

Por outro lado, quando este coeficiente se mantém em elevado percentual por um número maior de gerações denota uma garantia de boa diversidade evitando-se a convergência prematura para um ótimo local.

A figura 6.2.57 demonstra que uma maior taxa de recombinação protela o declínio dos coeficientes de convergência e eleva o gradiente de pressão que o operador crossover realiza na busca de melhores soluções constatado através do índice de melhora relativa no valor da função objetivo estabelecendo um melhor desempenho na busca de uma solução mais apta.

Outra comprovação deste gradiente de pressão que o operador crossover (maior taxa de recombinação) exerce na busca de melhores soluções pode ser observada na tabela 6.2.54 e as figuras 6.2.58 e 6.2.59 que demonstram o comportamento do valor médio da função objetiva da população a cada geração.

Ressalte-se que mesmo quando, por vezes, depois de algumas gerações o processamento do AG não encontrar uma solução mais apta (menor) que a existente, está acontecendo o melhoramento de elementos desta população tornando-a mais apta que as anteriores. Este melhoramento é mensurado pelo valor médio da função objetiva da população.

Nº DA GERAÇÃO	CASO11 - TM=50%			CASO12 - TM=70%			CASO13 - TM=80%			CASO14 - TM=90%			CASO15 - TM=100%		
	F0min(i)	F0med(i)	Coef.C(i)	F0min(i)	F0med(i)	Coef.C(i)	F0min(i)	F0med(i)	Coef.C(i)	F0min(i)	F0med(i)	Coef.C(i)	F0min(i)	F0med(i)	Coef.C(i)
1	1,891	242,271	96,9%	1,818	3.003,578	91,9%	1,851	2.464,623	98,2%	1,808	180,321	97,2%	1,978	677,618	98,8%
2	1,813	303,945	82,1%	1,786	324,102	83,2%	1,814	48,618	83,8%	1,802	43,273	88,6%	1,890	43,910	95,4%
3	1,812	6,321	64,5%	1,770	18,058	66,7%	1,759	7,527	64,8%	1,773	2.006,836	89,2%	1,780	8,005	77,6%
4	1,793	2,732	30,4%	1,717	7,739	53,0%	1,742	7,212	58,2%	1,754	16,831	72,3%	1,776	5,906	61,9%
5	1,780	62,178	40,1%	1,717	2,313	24,1%	1,739	102,168	52,4%	1,693	37,952	75,4%	1,767	380,543	61,7%
6	1,763	4,667	32,7%	1,717	2,990	30,3%	1,714	5,810	38,1%	1,687	4,922	48,4%	1,713	25,673	60,6%
7	1,727	2,159	17,3%	1,705	2,271	21,4%	1,708	4,993	41,3%	1,674	2,087	19,2%	1,712	3,725	48,3%
8	1,727	2,261	22,6%	1,699	1,868	8,5%	1,698	2,290	18,6%	1,674	2,703	28,7%	1,708	2,163	20,5%
9	1,727	37,843	32,4%	1,681	1,864	9,8%	1,680	2,034	16,6%	1,669	2,230	20,1%	1,671	2,007	15,3%
10	1,707	18,079	34,5%	1,674	1,996	14,6%	1,680	2,074	13,9%	1,663	1,969	14,7%	1,671	1,814	7,7%
11	1,707	7,932	31,9%	1,673	1,990	11,0%	1,680	1,888	10,9%	1,652	1,838	9,7%	1,671	2,008	16,1%
12	1,707	2,241	14,5%	1,668	1,897	10,4%	1,680	1,696	1,0%	1,648	2,122	17,1%	1,671	1,746	4,2%
13	1,707	2,235	15,1%	1,643	1,833	10,1%	1,680	1,902	8,6%	1,627	1,759	7,1%	1,671	1,802	6,8%
14	1,707	2,418	24,0%	1,641	1,728	5,0%	1,675	1,892	10,3%	1,627	1,765	6,7%	1,669	2,131	18,5%
15	1,706	2,422	21,8%	1,624	1,676	3,0%	1,673	8,154	27,5%	1,627	1,714	4,8%	1,657	1,995	14,8%
16	1,706	12,454	29,5%	1,619	1,693	4,1%	1,673	2,210	20,5%	1,627	1,652	1,5%	1,657	1,749	4,9%
17	1,706	2,319	15,3%	1,619	1,643	1,4%	1,673	2,017	13,7%	1,625	1,693	3,3%	1,657	2,387	17,6%
18	1,703	1,897	6,7%	1,606	1,655	2,7%	1,670	1,841	8,8%	1,625	1,804	7,3%	1,656	3,029	22,8%
19	1,703	6,347	19,9%	1,600	1,615	0,9%	1,670	1,782	6,1%	1,625	7,040	26,3%	1,656	1,920	12,0%
20	1,703	2,558	21,8%	1,600	2,706	16,3%	1,665	1,728	3,7%	1,625	2,960	31,2%	1,656	1,794	7,3%
21	1,703	5,524	21,9%	1,592	1,642	3,0%	1,665	1,753	5,0%	1,625	6,032	20,7%	1,656	1,896	9,5%
22	1,703	1,717	0,9%	1,592	1,682	5,2%	1,665	2,167	15,2%	1,625	1,664	2,3%	1,652	1,703	3,0%
23	1,703	2,005	11,4%	1,592	1,656	3,6%	1,665	1,740	3,9%	1,625	1,757	7,4%	1,652	1,672	1,2%
24	1,703	1,782	4,2%	1,590	1,779	8,1%	1,665	1,782	6,7%	1,625	11,349	24,7%	1,652	1,698	2,5%
25	1,703	2,393	20,7%	1,590	1,662	4,2%	1,662	1,683	1,2%	1,625	2,270	22,8%	1,652	1,995	11,9%
26	1,653	1,810	7,8%	1,590	1,604	0,8%	1,662	2,309	13,7%	1,625	1,680	3,3%	1,646	1,889	10,2%
27	1,653	2,453	24,2%	1,590	1,610	1,3%	1,662	2,210	18,3%	1,622	1,692	4,0%	1,646	2,202	17,4%
28	1,653	2,134	13,5%	1,590	1,975	14,9%	1,662	1,930	10,4%	1,622	2,521	17,1%	1,630	1,926	10,5%
29	1,653	1,963	9,1%	1,590	1,860	10,1%	1,662	1,767	4,7%	1,622	1,808	7,1%	1,622	1,721	5,7%
30	1,644	1,910	10,5%	1,590	1,598	0,5%	1,662	1,676	0,9%	1,622	1,772	8,0%	1,622	1,902	13,7%
VALORES TOTAIS=	51,563	748,967	778,0%	49,488	3.402,280	520,2%	50,758	2.691,476	677,2%	49,748	2.356,015	786,1%	50,717	1.190,526	758,3%
VALORES MÉDIOS=	1,719	<b>24,966</b>	25,9%	1,650	<b>113,409</b>	17,3%	1,692	<b>89,716</b>	22,6%	1,658	<b>78,534</b>	26,2%	1,691	<b>39,684</b>	25,3%

Tabela 6.2.54 – Comparativo dos comportamentos da F0min, F0med e dos Valores dos Coeficientes de Convergência a cada geração nos casos do grupo 3.

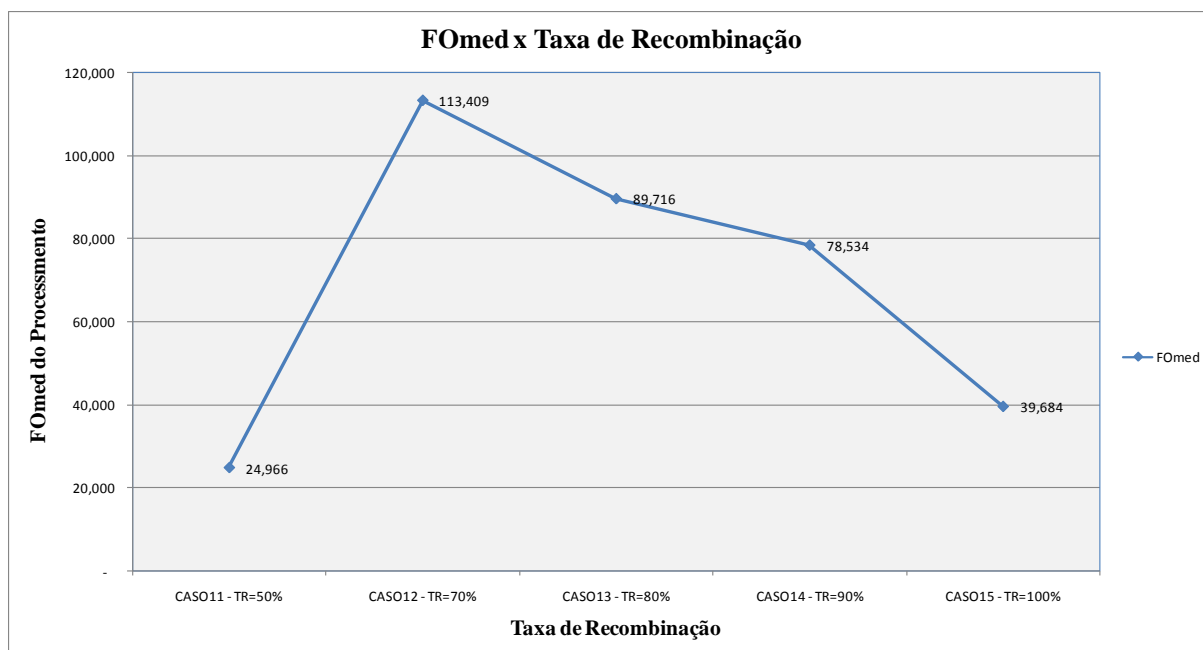


Figura 6.2.58 – Comparação dos valores médios da função objetivo (FOmed) obtidas no final do processamento das gerações para os casos do grupo 3

Observe-se da figura 6.2.58, que com exceção do caso 11 (taxa de recombinação 50%), o desempenho dos valores médios da função objetivo melhorou (minimizou) com o aumento da taxa de recombinação.

A figura 6.2.59 visualiza o comportamento dos dois casos de melhor desempenho ao longo das gerações. Observe-se que após a sétima geração o desempenho do caso 15, com taxa de recombinação de 100% é mais apto (valores inferiores - minimização) do que o caso 11 com taxa de crossover de 50%.

Observando-se a tabela 6.2.54, na primeira geração, onde a população é gerada e conseqüentemente não sofre influência da taxa de recombinação, nota-se aí a causa da parcial vantagem do caso 11 (FOmed=242,271) em relação ao caso 15 (FOmed=677,618), influenciando os respectivos desempenhos até a sétima geração quando o gradiente de pressão exercido pela maior taxa de recombinação recupera e mantém o melhor desempenho do caso 15.

Portanto desta análise conclui-se primeiramente, que o problema obedece à hipótese dos blocos de construção não apresentando altos níveis de epistasia nem se caracterizando como AG deceptivo. E confirmando a indagação inicialmente proposta,



conclui-se que, também para este problema, uma taxa de recombinação maior favorece a localização de melhores soluções.

E como o custo do esforço computacional relativo a uma maior taxa de recombinação se mostra irrelevante é preterida como taxa de crossover 100%.

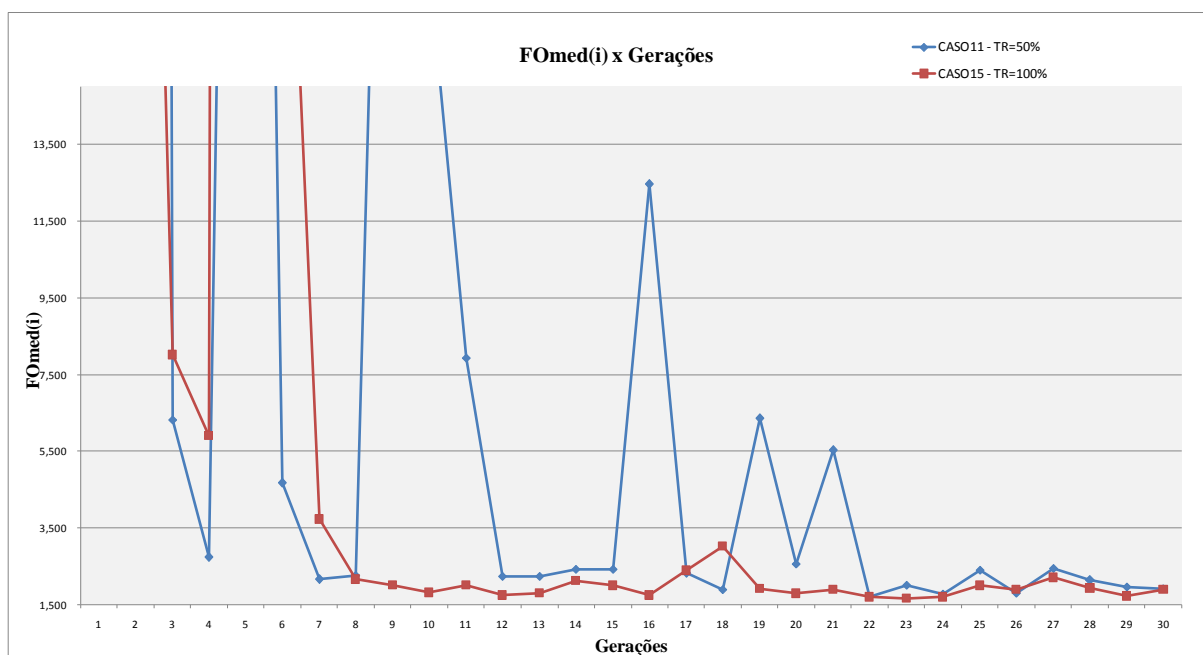


Figura 6.2.59 – Comparação dos valores médios da função objetivo - FOMed(i) a cada geração do processamento para os casos de melhor desempenho do grupo 3.

#### 6.2.4 Grupo 4 – Parâmetro em Análise Taxa de Mutação

A mutação melhora a diversidade dos cromossomos (soluções) na população, no entanto, pode destruir a informação contida nos cromossomos desfazendo os *blocos de construção*.

E por este fato, pressupõe-se a utilização de um valor pequeno para a taxa de mutação, suficiente para assegurar a diversidade, mas não o bastante para destruir as informações nos cromossomos.

Simpson, Dandy & Murphy (1994) estabeleceram limites adequados para a taxa de mutação, definindo como maior que o inverso do número de cromossomos (aqui, cada variável de decisão é um cromossomo) da população e menor que o inverso do comprimento dos cromossomos.

Tomando-se toda a população de soluções (no caso  $N_{pop}=30$ ) onde cada uma destas é composta por um conjunto de variáveis de decisão (no caso  $N_{tub}=32$  condutos/diâmetros) e onde cada variável é representada por determinado número de bits (no caso  $N_{bit}=4$ ), observa-se que o limite estabelecido pelos autores para a taxa de mutação representa no seu limite mínimo a mudança de uma variável de decisão (um conduto/diâmetro) em toda a população, e no seu limite máximo concebe a mudança de uma variável de decisão para cada uma das soluções da população.

Adotando-se estes limites para o caso em análise, tem-se:

$$\frac{1}{N_{pop} \cdot N_{tub}} \leq \text{Taxa de Mutação} \leq \frac{1}{N_{tub} \cdot N_{bit}} \quad (6.1)$$

$$\frac{1}{30 \times 32} \leq \text{Taxa de Mutação} \leq \frac{1}{32 \times 4} \quad (6.2)$$

$$0,00104 \leq \text{Taxa de Mutação} \leq 0,00781 \quad (6.3)$$

$$0,1\% \leq \text{Taxa de Mutação} \leq 0,8\% \quad (6.4)$$

Através de uma análise de sensibilidade variando este parâmetro pretende-se encontrar a taxa de mutação mais adequada, que apresente o melhor desempenho no tocante ao esforço computacional e a convergência ou proximidade à solução mais apta.

Aqui também segue-se o procedimento de adoção do comportamento médio obtido de várias simulações para amenizar o efeito aleatório da geração da população inicial e do processo seletivo das soluções que sofrerão mutação e recombinação (randômico com maior chance às mais aptas).

Inicialmente foram analisados cinco casos para este grupo, porém por questão de refinamento na busca da taxa de mutação de melhor desempenho e para melhor representatividade e entendimento dos resultados foram inseridos mais três casos na análise. Um deles com a taxa de mutação nula, portanto fora do limite estabelecido, para observar o desempenho do AG sem o operador mutação.

A tabela 6.2.55 apresenta os valores atribuídos aos parâmetros para cada um dos oito casos, lembrando-se que foram realizadas cinco simulações para cada um deles adotando-se um comportamento médio destas.

Casos	Prob. Mutação (%)	Tamanho da População de Soluções	Núm. de Gerações	Prob. Crossover (%)	Adoção de Elitismo?	Tipo de Cruz.	Adoção de Coef. de Conv.?	Adoção de Crit. Parada Antecipada?
15X	0,00	30	30	100	Sim	Clássico (1pt de corte)	Não	Não
16	0,10							
16X	0,15							
17	0,20							
17X	0,30							
18	0,40							
19	0,60							
20	0,80							

Tabela 6.2.55 – Parâmetros adotados do AG para o grupo 4.

• *Caso 16 – Resultados*

N° DA GERAÇÃO	CASO16	CASO16A	CASO16B	CASO16C	CASO16D	CASO16E
1	1,756	1,560	2,021	1,986	1,650	1,564
2	1,744	1,560	1,997	1,949	1,650	1,564
3	1,681	1,560	1,862	1,767	1,650	1,564
4	1,681	1,560	1,862	1,767	1,650	1,564
5	1,656	1,560	1,767	1,767	1,620	1,564
6	1,646	1,560	1,767	1,760	1,620	1,524
7	1,627	1,560	1,710	1,760	1,611	1,491
8	1,624	1,560	1,710	1,760	1,599	1,491
9	1,622	1,549	1,710	1,760	1,599	1,491
11	1,620	1,549	1,702	1,760	1,599	1,491
12	1,616	1,549	1,702	1,760	1,577	1,491
13	1,616	1,549	1,702	1,760	1,577	1,491
14	1,616	1,549	1,702	1,760	1,577	1,491
15	1,616	1,549	1,702	1,760	1,577	1,491
16	1,616	1,549	1,702	1,760	1,577	1,491
17	1,606	1,549	1,702	1,760	1,577	1,441
18	1,606	1,549	1,702	1,760	1,577	1,441
19	1,606	1,549	1,702	1,760	1,577	1,441
20	1,606	1,549	1,702	1,760	1,577	1,441
21	1,606	1,549	1,702	1,760	1,577	1,441
22	1,606	1,549	1,702	1,760	1,577	1,441
23	1,606	1,549	1,702	1,760	1,577	1,441
24	1,606	1,549	1,702	1,760	1,577	1,441
25	1,606	1,549	1,702	1,760	1,577	1,441
26	1,606	1,549	1,702	1,760	1,577	1,441
27	1,606	1,549	1,702	1,760	1,577	1,441
28	1,606	1,549	1,702	1,760	1,577	1,441
29	1,606	1,549	1,702	1,760	1,577	1,441
30	1,606	1,549	1,702	1,760	1,577	1,441
Taxa de Mutação - [A%]	0,1%					
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,063	11,094	11,075	11,083	11,041	11,024
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,541	1,534	1,600	1,483	1,544	1,546
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	11	9	10	6	12	17
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,756	1,560	2,021	1,986	1,650	1,564
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,606	1,549	1,702	1,760	1,577	1,441
Melhora no Valor da Função Objetivo [G]=[E]-[F]	0,151	0,011	0,320	0,225	0,073	0,124
Gradiente de Melhora no Valor da Função Obj. [H%]=[G]/[D]	1,68%	0,13%	3,20%	3,76%	0,61%	0,73%

Tabela 6.2.56 – Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do caso 16.

Observe-se que os valores obtidos para a coluna *CASO 16* são uma média aritmética dos valores das simulações *16A*, *16B*, *16C*, *16D* e *16E*.

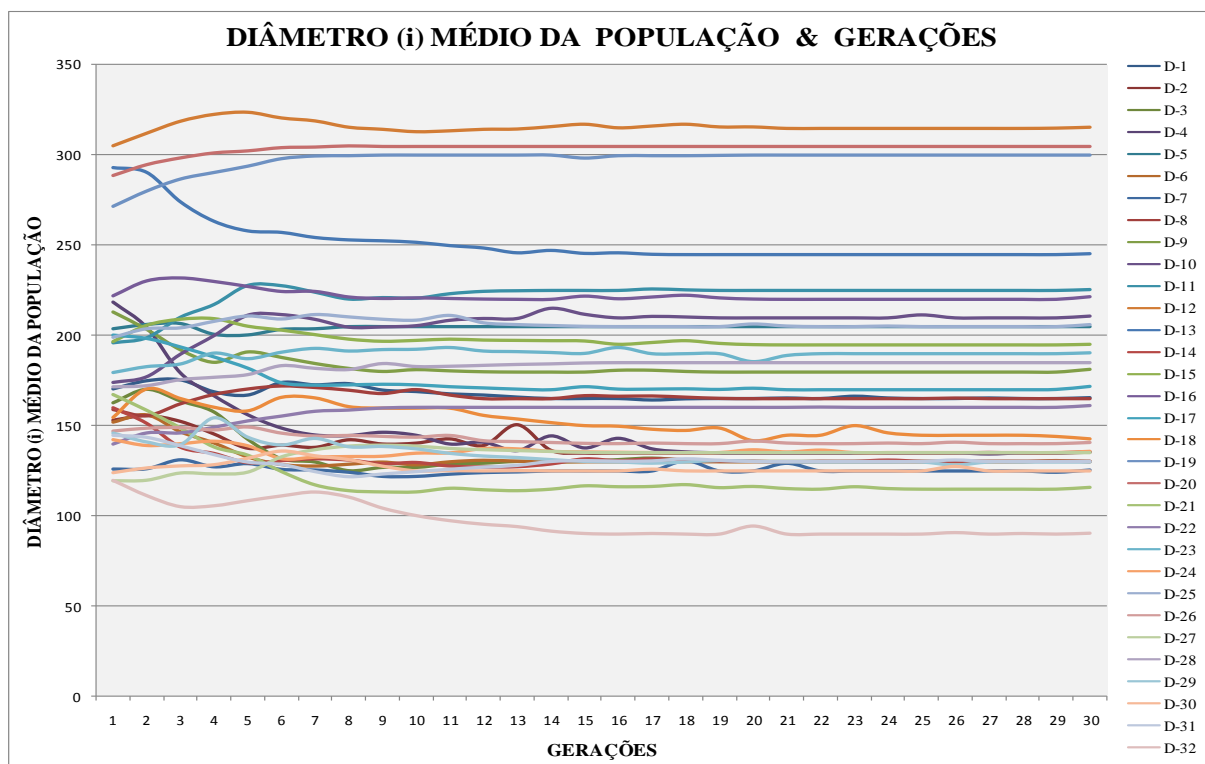


Figura 6.2.60 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 16.

ITER\TUBOS	FOmin(i)	FOmed(i)	FOmax(i)	Coef.Conv.
1	1,756	556,506	16.226,617	92,7%
2	1,744	30,939	569,878	89,0%
3	1,681	212,489	5.910,539	83,2%
4	1,681	40,530	1.061,697	78,2%
5	1,656	3,264	26,100	42,8%
6	1,646	2,592	11,992	31,6%
7	1,627	2,009	4,385	17,8%
8	1,624	1,843	3,653	10,0%
9	1,622	1,784	4,346	8,6%
10	1,620	3,133	17,760	19,0%
11	1,620	1,818	4,512	10,2%
12	1,616	1,671	2,085	3,3%
13	1,616	1,945	3,559	12,1%
14	1,616	1,715	2,783	4,9%
15	1,616	1,657	1,849	2,5%
16	1,616	2,628	6,772	16,5%
17	1,606	1,814	6,761	8,8%
18	1,606	1,803	2,997	8,9%
19	1,606	1,633	1,961	1,6%
20	1,606	1,874	4,133	10,8%
21	1,606	1,827	3,854	8,2%
22	1,606	1,609	1,663	0,2%
23	1,606	1,648	1,895	2,5%
24	1,606	1,619	1,905	0,8%
25	1,606	1,609	1,627	0,2%
26	1,606	1,634	1,781	1,5%
27	1,606	1,607	1,622	0,1%
28	1,606	1,607	1,628	0,1%
29	1,606	1,607	1,623	0,1%
30	1,606	1,661	2,136	3,2%
<b>VALORES TOTAIS=</b>	48,839	890,076	23.894,115	569,5%
<b>VALORES MÉDIOS=</b>	1,628	29,669	796,470	19,0%

Tabela 6.2.57 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 16.

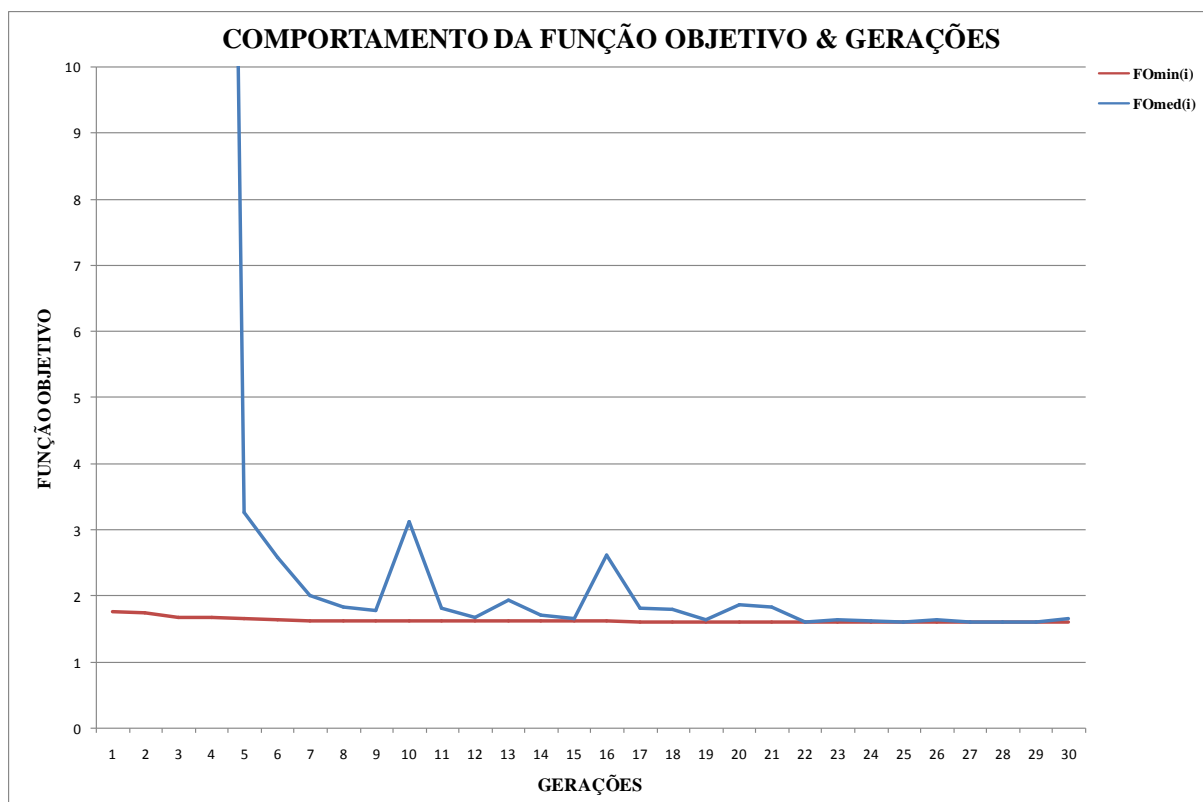


Figura 6.2.61 – Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 16.

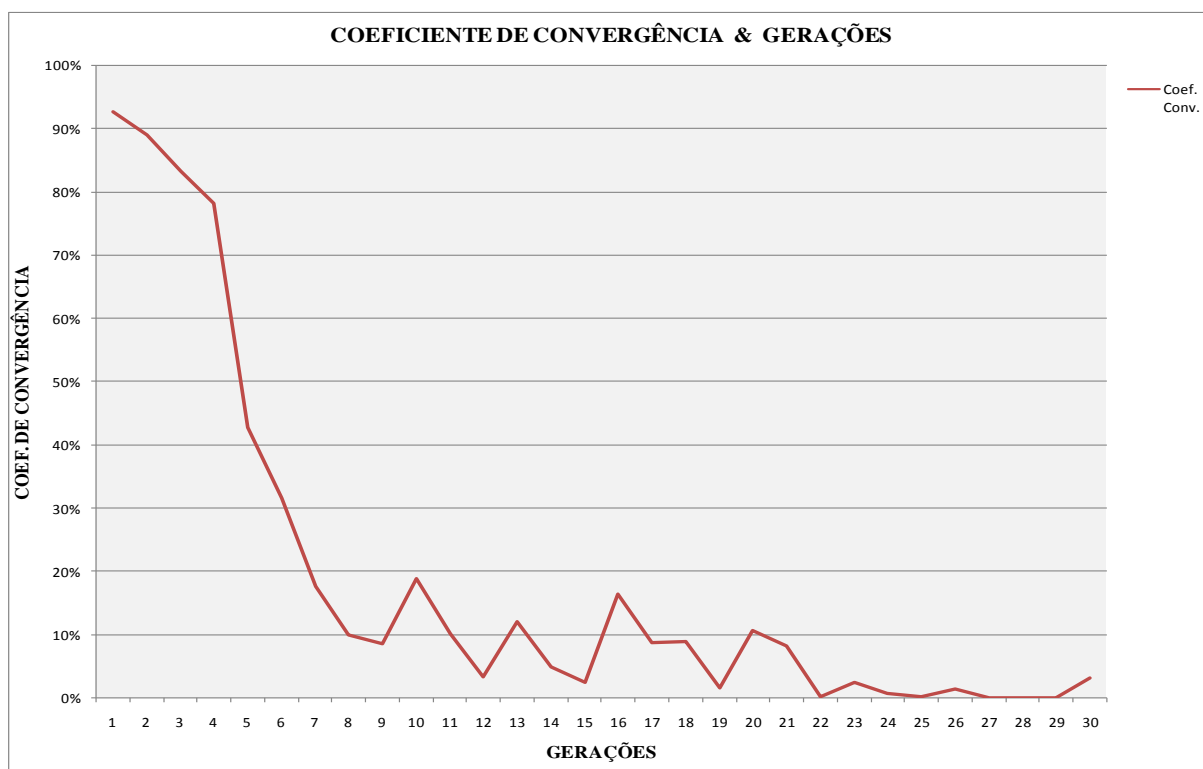


Figura 6.2.62 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 16.

• *Caso 17 – Resultados*

Nº DA GERAÇÃO	CASO17	CASO17A	CASO17B	CASO17C	CASO17D	CASO17E
1	1,861	1,898	1,759	2,024	1,751	1,874
2	1,861	1,898	1,759	2,024	1,751	1,874
3	1,769	1,789	1,759	1,758	1,664	1,874
4	1,707	1,789	1,654	1,758	1,585	1,748
5	1,707	1,789	1,654	1,758	1,585	1,748
6	1,693	1,735	1,654	1,758	1,569	1,748
7	1,691	1,735	1,654	1,758	1,563	1,747
8	1,682	1,735	1,610	1,758	1,563	1,747
9	1,678	1,735	1,610	1,758	1,563	1,727
11	1,678	1,735	1,610	1,758	1,563	1,727
12	1,676	1,735	1,610	1,758	1,552	1,727
13	1,670	1,735	1,610	1,758	1,552	1,695
14	1,670	1,735	1,610	1,758	1,552	1,695
15	1,670	1,735	1,610	1,758	1,552	1,695
16	1,670	1,735	1,610	1,758	1,552	1,695
17	1,667	1,735	1,610	1,758	1,552	1,680
18	1,667	1,735	1,610	1,758	1,552	1,680
19	1,667	1,735	1,610	1,758	1,552	1,680
20	1,667	1,735	1,610	1,758	1,552	1,680
21	1,667	1,735	1,610	1,758	1,552	1,680
22	1,667	1,735	1,610	1,758	1,552	1,680
23	1,636	1,582	1,610	1,758	1,552	1,680
24	1,636	1,582	1,610	1,758	1,552	1,680
25	1,636	1,582	1,610	1,758	1,552	1,680
26	1,636	1,582	1,610	1,758	1,552	1,680
27	1,636	1,582	1,610	1,758	1,552	1,680
28	1,636	1,582	1,610	1,758	1,552	1,680
29	1,636	1,582	1,610	1,758	1,552	1,680
30	1,636	1,582	1,610	1,758	1,552	1,680
Taxa de Mutação - [A%]	0,2%					
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,163	11,312	10,994	11,399	11,182	10,930
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,627	1,611	1,573	1,640	1,629	1,682
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	13	23	8	3	12	17
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,861	1,898	1,759	2,024	1,751	1,874
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,636	1,582	1,610	1,758	1,552	1,680
Melhora no Valor da Função Objetivo [G]=[E]-[F]	0,225	0,316	0,150	0,266	0,199	0,194
Gradiente de Melhora no Valor da Função Obj. [H%]=[G]/[D]	2,98%	1,37%	1,87%	8,87%	1,66%	1,14%

Tabela 6.2.58 – Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do caso 17.

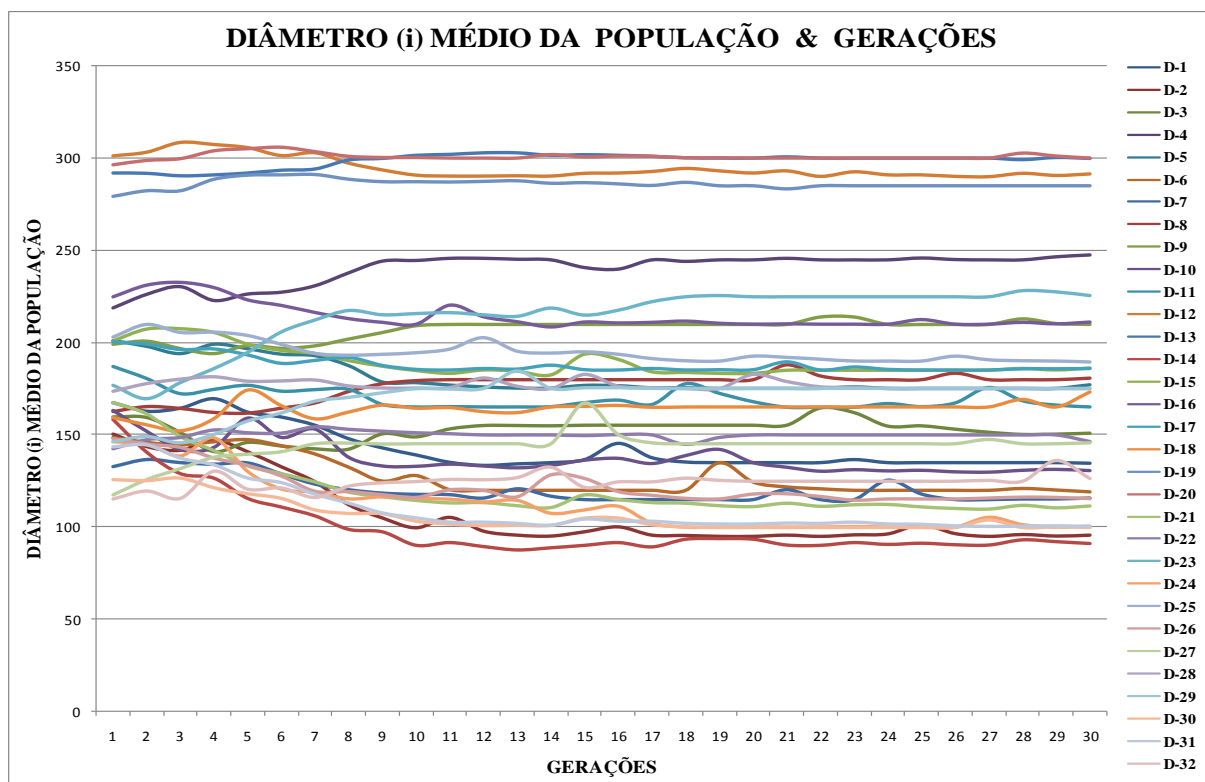


Figura 6.2.63 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 17.

ITER\TUBOS	FOmin(i)	FOmed(i)	FOmax(i)	Coef.Conv.
1	1,861	167,592	4.089,566	96,5%
2	1,861	499,582	14.545,979	93,4%
3	1,769	48,794	887,091	85,5%
4	1,707	18,147	182,224	78,6%
5	1,707	19,628	367,521	86,2%
6	1,693	6,877	128,631	52,1%
7	1,691	2,539	9,953	29,0%
8	1,682	3,841	57,147	39,5%
9	1,678	1,970	4,458	14,3%
10	1,678	218,332	6.496,000	29,7%
11	1,678	1,915	3,416	11,6%
12	1,676	1,820	2,449	7,4%
13	1,670	1,884	2,667	10,6%
14	1,670	2,073	3,206	12,8%
15	1,670	5,758	13,411	35,3%
16	1,670	2,597	13,233	24,4%
17	1,667	1,765	2,730	5,2%
18	1,667	1,798	2,755	6,1%
19	1,667	2,425	4,481	17,5%
20	1,667	1,943	4,307	10,9%
21	1,667	2,015	3,775	14,4%
22	1,667	2,656	9,473	16,4%
23	1,636	2,348	5,571	17,3%
24	1,636	2,060	3,287	13,1%
25	1,636	2,357	7,357	16,9%
26	1,636	1,836	6,402	9,4%
27	1,636	1,852	2,711	10,4%
28	1,636	1,786	3,054	8,2%
29	1,636	1,903	2,992	11,7%
30	1,636	1,896	2,848	12,3%
<b>VALORES TOTAIS=</b>	50,453	1.031,989	26.868,695	876,8%
<b>VALORES MÉDIOS=</b>	1,682	34,400	895,623	29,2%

Tabela 6.2.59 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 17.



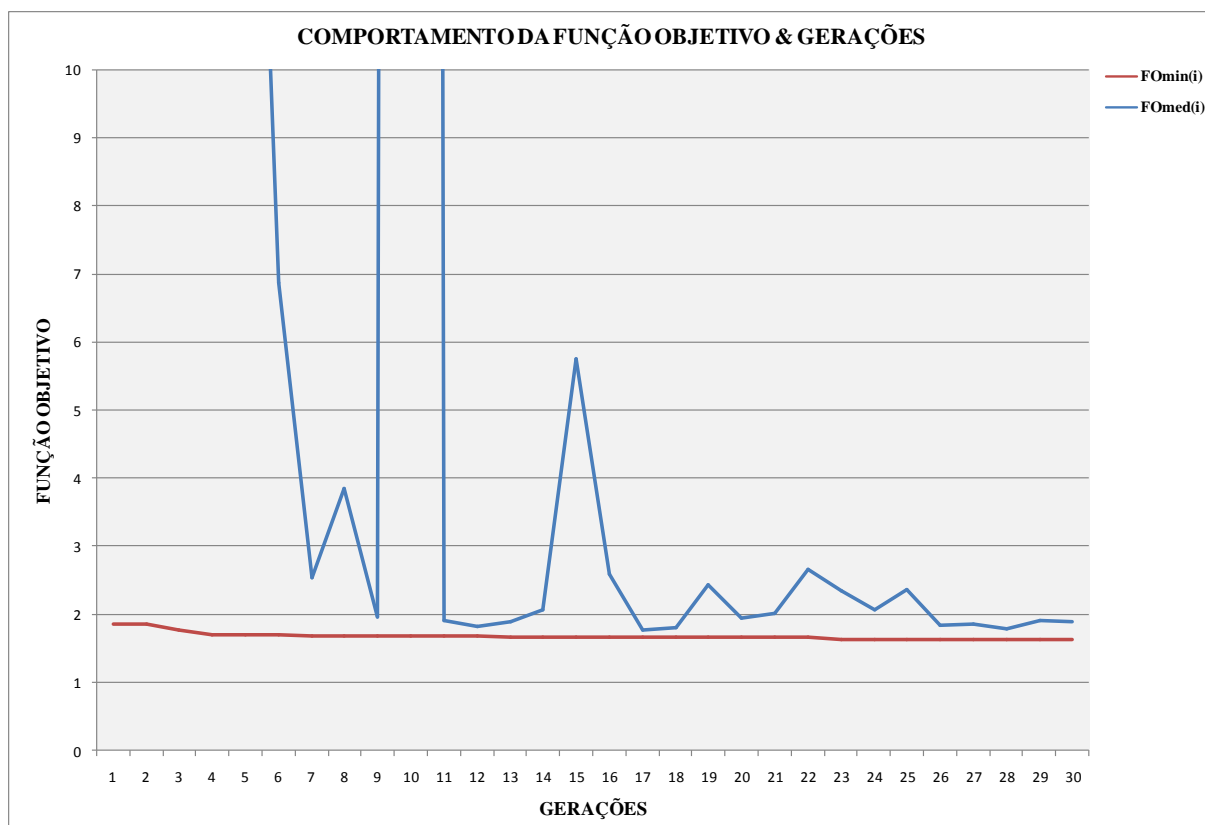


Figura 6.2.64 – Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 17.

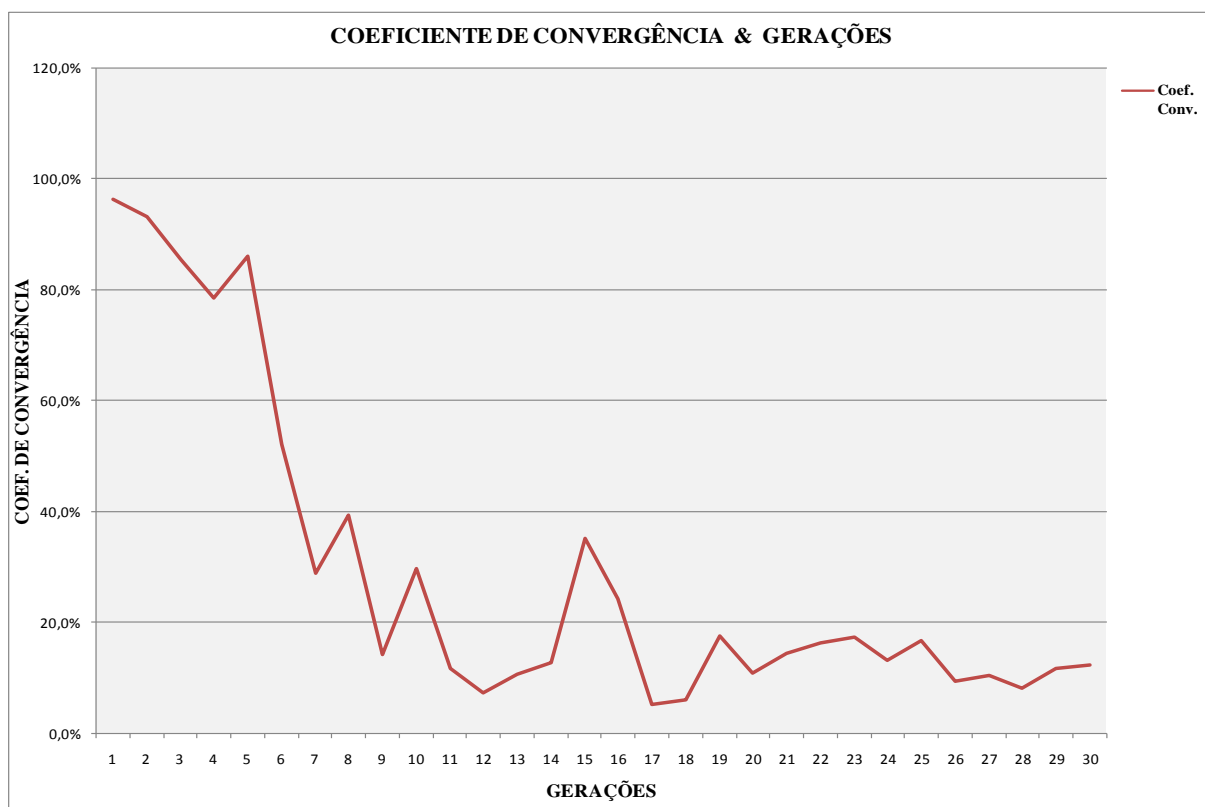


Figura 6.2.65 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 17.

• *Caso 18 – Resultados*

Nº DA GERAÇÃO	CASO18	CASO18A	CASO18B	CASO18C	CASO18D	CASO18E
1	1,877	1,783	1,828	1,899	1,875	2,000
2	1,865	1,783	1,828	1,899	1,875	1,939
3	1,823	1,783	1,621	1,899	1,875	1,939
4	1,823	1,783	1,621	1,899	1,875	1,939
5	1,823	1,783	1,621	1,899	1,875	1,939
6	1,823	1,783	1,621	1,899	1,875	1,939
7	1,817	1,783	1,590	1,899	1,875	1,939
8	1,813	1,782	1,590	1,899	1,856	1,939
9	1,787	1,782	1,590	1,899	1,856	1,806
11	1,779	1,755	1,590	1,889	1,856	1,806
12	1,779	1,755	1,588	1,889	1,856	1,806
13	1,779	1,755	1,588	1,889	1,856	1,806
14	1,772	1,755	1,588	1,889	1,823	1,806
15	1,761	1,723	1,588	1,889	1,823	1,782
16	1,759	1,723	1,588	1,889	1,812	1,782
17	1,759	1,723	1,588	1,889	1,812	1,782
18	1,759	1,723	1,588	1,889	1,812	1,782
19	1,757	1,716	1,588	1,889	1,810	1,782
20	1,757	1,716	1,588	1,889	1,810	1,781
21	1,757	1,716	1,588	1,889	1,810	1,781
22	1,754	1,716	1,588	1,889	1,810	1,768
23	1,748	1,716	1,588	1,889	1,781	1,768
24	1,748	1,716	1,588	1,889	1,781	1,768
25	1,746	1,716	1,575	1,889	1,781	1,768
26	1,738	1,716	1,535	1,889	1,781	1,768
27	1,733	1,716	1,535	1,889	1,757	1,768
28	1,727	1,716	1,535	1,889	1,757	1,738
29	1,726	1,713	1,535	1,889	1,757	1,738
30	1,726	1,713	1,535	1,889	1,757	1,738
Taxa de Mutação - [A%]	0,4%					
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,576	11,652	11,567	11,495	11,549	11,615
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,873	1,935	1,872	1,715	1,958	1,885
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	24	29	26	10	27	28
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,877	1,783	1,828	1,899	1,875	2,000
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,726	1,713	1,535	1,889	1,757	1,738
Melhora no Valor da Função Objetivo [G]=[E]-[F]	0,151	0,070	0,294	0,010	0,118	0,262
Gradiente de Melhora no Valor da Função Obj. [H%]=[G]/[D]	0,57%	0,24%	1,13%	0,10%	0,44%	0,94%

Tabela 6.2.60 – Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do caso 18.

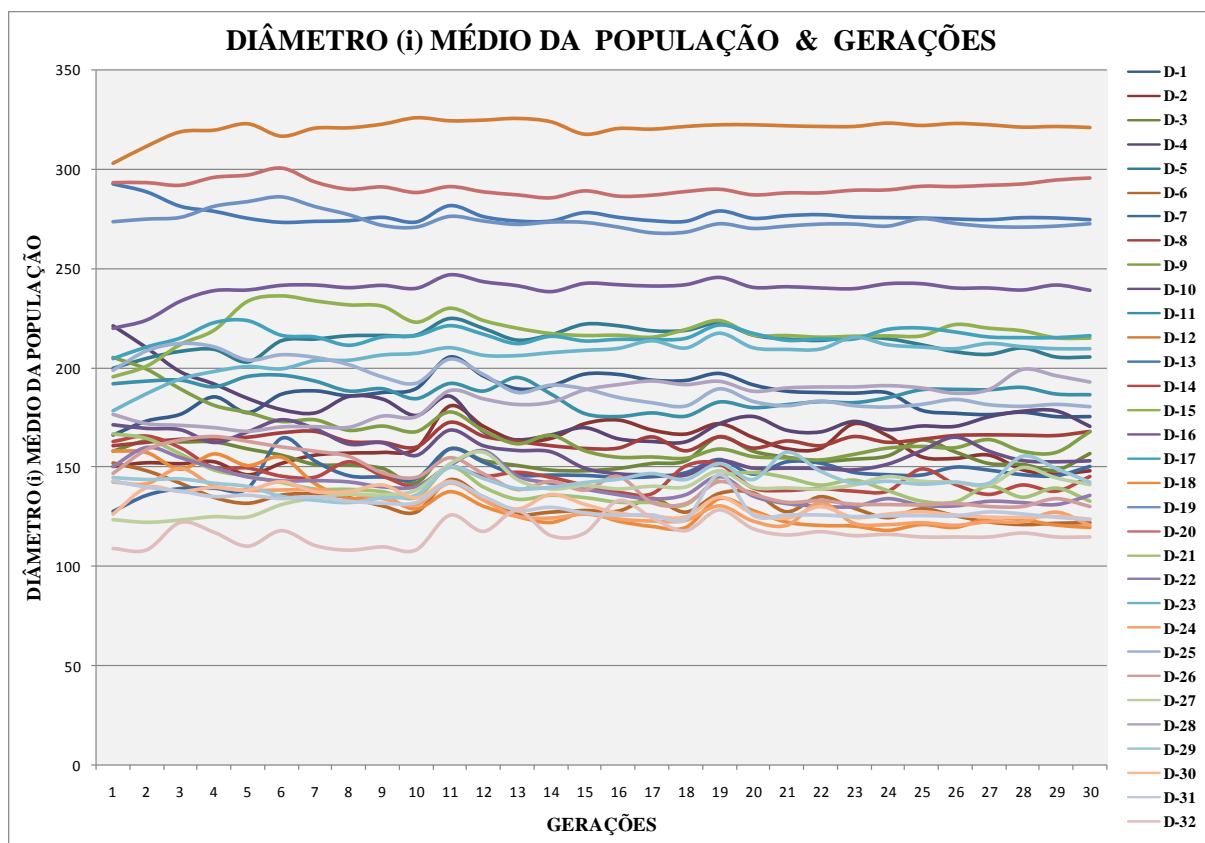


Figura 6.2.66 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 18.

ITER\TUBOS	FOmin(i)	FOmed(i)	FOmax(i)	Coef.Conv.
1	1,877	138,242	2.547,391	97,0%
2	1,865	1.345,986	39.016,002	94,5%
3	1,823	94,549	2.178,907	96,8%
4	1,823	10,428	110,363	77,7%
5	1,823	48,908	1.338,490	61,4%
6	1,823	5,926	36,542	68,6%
7	1,817	36,205	864,005	51,5%
8	1,813	8,251	147,043	59,6%
9	1,787	32,261	795,735	57,8%
10	1,779	12,540	260,557	42,6%
11	1,779	24,200	82,165	46,3%
12	1,779	40,143	705,370	47,5%
13	1,779	2,741	5,286	27,9%
14	1,772	4,062	34,619	49,0%
15	1,761	5,234	91,601	33,2%
16	1,759	2,683	5,781	28,7%
17	1,759	2,605	7,821	28,8%
18	1,759	2,171	4,769	15,7%
19	1,757	16,796	79,680	42,1%
20	1,757	3,554	33,380	46,5%
21	1,757	198,104	5.665,904	49,6%
22	1,754	2,919	9,873	34,8%
23	1,748	3,687	15,201	39,1%
24	1,748	4,202	51,338	48,6%
25	1,746	9,422	184,256	42,2%
26	1,738	3,157	19,553	38,2%
27	1,733	57,634	1.570,263	73,9%
28	1,727	4,065	48,269	37,9%
29	1,726	2,344	6,689	22,9%
30	1,726	2,496	6,508	27,7%
<b>VALORES TOTAIS=</b>	<b>53,295</b>	<b>2.125,515</b>	<b>55.923,361</b>	<b>1488,0%</b>
<b>VALORES MÉDIOS=</b>	<b>1,776</b>	<b>70,850</b>	<b>1.864,112</b>	<b>49,6%</b>

Tabela 6.2.61 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 18.

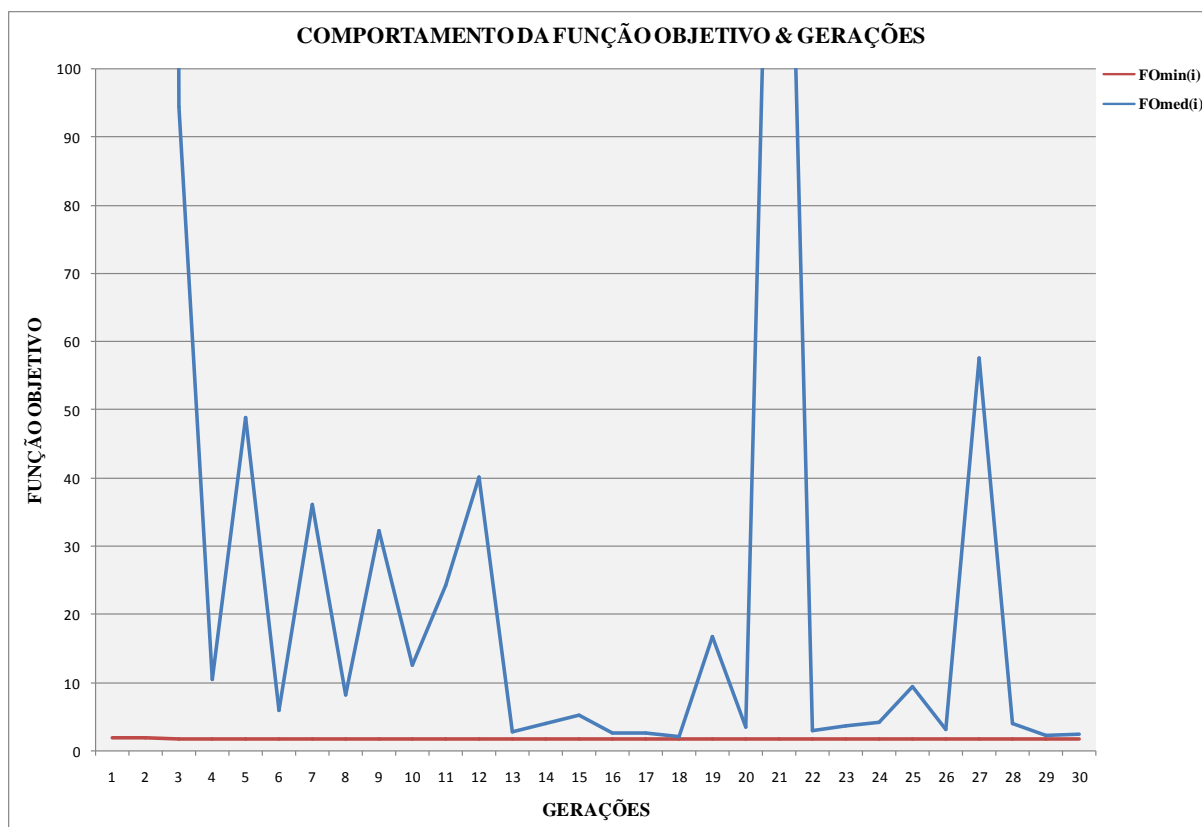


Figura 6.2.67 – Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 18.

Ressalte-se a mudança de comportamento do gráfico da figura 6.2.67, comparativamente aos dos casos anteriores. A grande oscilação da média da função objetivo pressupõe uma perda das informações contidas nos *blocos de construção* dos cromossomos, ou seja, muito “exploration” (busca no espaço amostral) em detrimento do “exploitation” (busca em direção a melhores pontos deste espaço).

Nos casos anteriores a oscilação dos valores médios da função objetivo restringe-se a iterações iniciais, efeito da geração da 1ª população aleatória, ou por eventual ruído randômico que logo é restabelecido a valores que vão se aproximando aos valores mínimos da função objetivo a cada geração.

Esta mudança de comportamento conseqüentemente é percebida no gráfico da figura 6.2.68 que demonstra uma oscilação do coeficiente de convergência na casa dos 40%, enquanto nos casos anteriores esta se encontra na casa dos 20% ou abaixo disto.

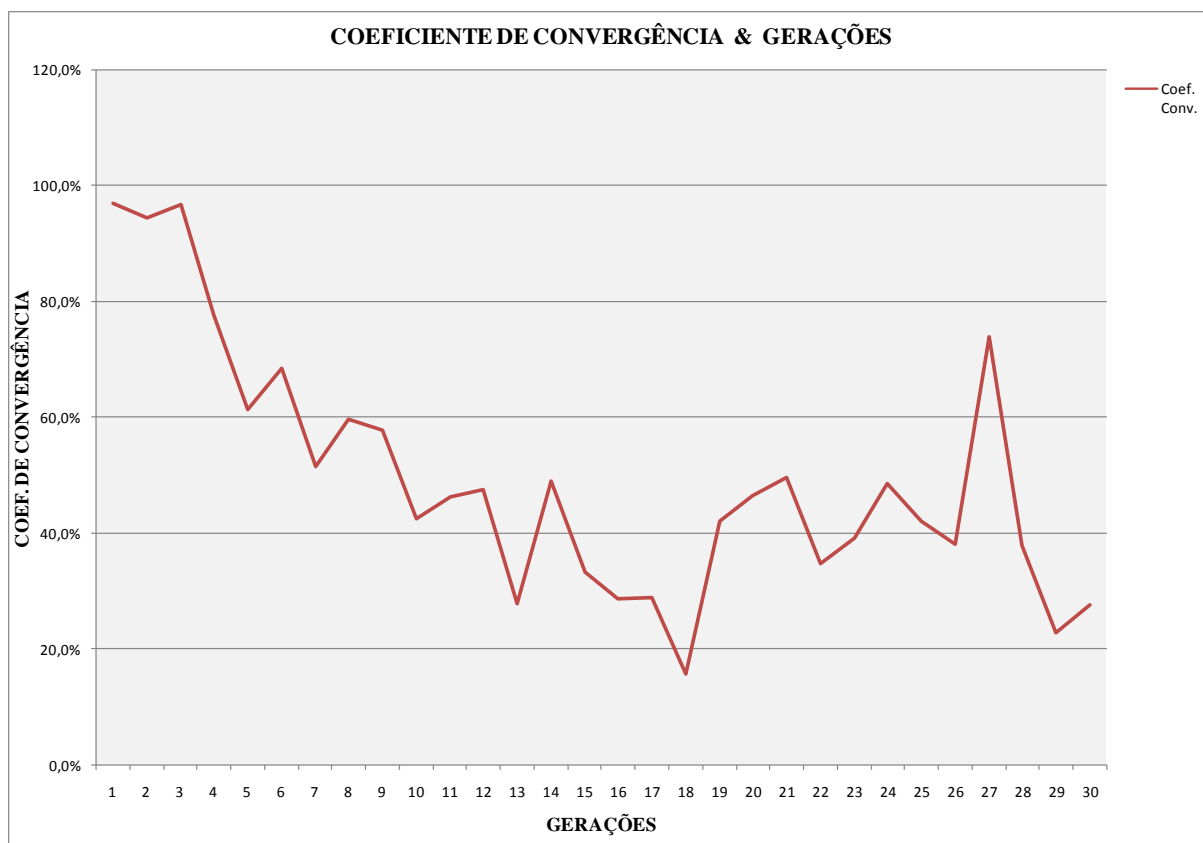


Figura 6.2.68 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 18.

• *Caso 19 – Resultados*

Nº DA GERAÇÃO	CASO19	CASO19A	CASO19B	CASO19C	CASO19D	CASO19E
1	1,803	2,102	1,586	1,913	1,763	1,649
2	1,788	2,031	1,586	1,913	1,763	1,649
3	1,766	2,000	1,586	1,899	1,713	1,633
4	1,721	2,000	1,586	1,696	1,713	1,611
5	1,721	2,000	1,586	1,696	1,713	1,611
6	1,721	2,000	1,586	1,696	1,713	1,611
7	1,716	1,975	1,586	1,696	1,713	1,611
8	1,702	1,975	1,586	1,696	1,642	1,611
9	1,652	1,975	1,586	1,555	1,533	1,611
11	1,652	1,975	1,586	1,555	1,533	1,611
12	1,643	1,975	1,543	1,555	1,533	1,611
13	1,643	1,975	1,543	1,555	1,533	1,611
14	1,643	1,975	1,543	1,555	1,533	1,611
15	1,636	1,975	1,543	1,516	1,533	1,611
16	1,618	1,911	1,543	1,516	1,508	1,611
17	1,608	1,911	1,543	1,466	1,508	1,609
18	1,608	1,911	1,543	1,466	1,508	1,609
19	1,608	1,911	1,543	1,466	1,508	1,609
20	1,597	1,911	1,543	1,433	1,508	1,591
21	1,585	1,868	1,526	1,433	1,508	1,591
22	1,585	1,868	1,525	1,433	1,508	1,591
23	1,585	1,868	1,525	1,433	1,508	1,591
24	1,585	1,868	1,525	1,433	1,508	1,591
25	1,585	1,868	1,525	1,433	1,508	1,591
26	1,582	1,868	1,525	1,433	1,508	1,574
27	1,582	1,868	1,525	1,433	1,508	1,574
28	1,582	1,868	1,525	1,433	1,508	1,574
29	1,580	1,868	1,515	1,433	1,508	1,574
30	1,580	1,868	1,515	1,433	1,508	1,574
Taxa de Mutação - [A%]	0,6%					
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,699	11,719	11,592	11,617	11,927	11,640
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,966	1,948	1,877	2,006	2,007	1,994
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	22	21	29	20	16	26
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,803	2,102	1,586	1,913	1,763	1,649
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,580	1,868	1,515	1,433	1,508	1,574
Melhora no Valor da Função Objetivo [G]=[E]-[F]	0,223	0,234	0,071	0,481	0,255	0,075
Gradiente de Melhora no Valor da Função Obj. [H%]=[G]/[D]	1,13%	1,11%	0,24%	2,40%	1,59%	0,29%

Tabela 6.2.62 – Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do caso

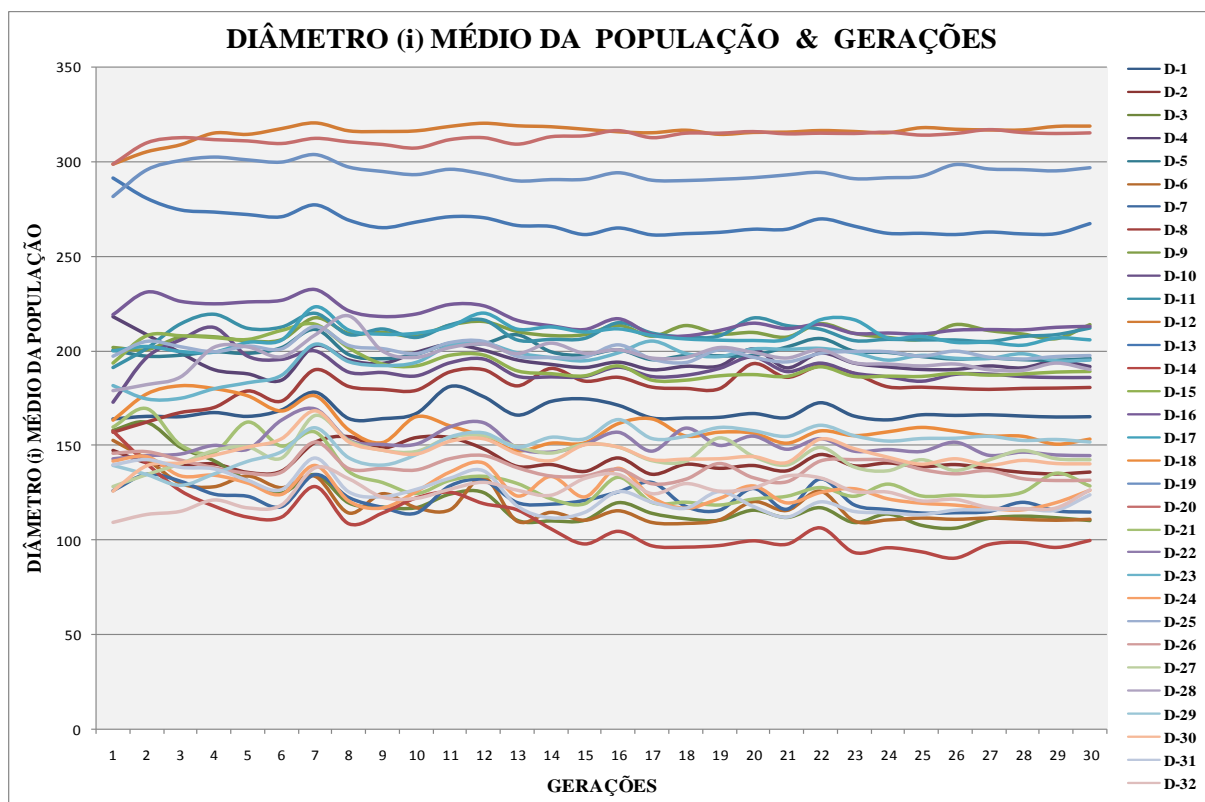


Figura 6.2.69 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 19.

ITER\TUBOS	F0min(i)	F0med(i)	F0max(i)	Coef.Conv.
1	1,803	45,145	815,046	94,3%
2	1,788	117,622	2.878,433	92,7%
3	1,766	1.984,295	58.273,206	96,2%
4	1,721	17,596	232,375	86,6%
5	1,721	16,599	294,743	78,5%
6	1,721	6,001	55,472	68,1%
7	1,716	37,216	261,631	82,7%
8	1,702	330,082	9.732,888	69,1%
9	1,652	3,714	11,438	46,9%
10	1,652	3,896	13,443	52,8%
11	1,652	17,143	81,725	50,9%
12	1,643	23,121	163,115	62,7%
13	1,643	3,888	34,773	46,1%
14	1,643	10,944	220,930	39,9%
15	1,636	10,468	230,674	52,3%
16	1,618	14,073	75,679	39,5%
17	1,608	3,091	9,957	38,7%
18	1,608	33,618	941,044	44,2%
19	1,608	3,504	13,114	50,7%
20	1,597	7,530	80,201	53,1%
21	1,585	2,200	4,603	27,3%
22	1,585	14,944	87,276	50,3%
23	1,585	2,864	12,157	43,0%
24	1,585	23,136	634,252	43,7%
25	1,585	2,151	9,881	24,1%
26	1,582	2,575	19,451	32,4%
27	1,582	397,703	11.789,710	44,3%
28	1,582	5.196,076	155.818,046	43,7%
29	1,580	2,194	10,120	25,9%
30	1,580	3,280	29,785	42,8%
<b>VALORES TOTAIS=</b>	49,328	8.336,669	242.835,172	1624,0%
<b>VALORES MÉDIOS=</b>	1,644	277,889	8.094,506	54,1%

Tabela 6.2.63 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 19.

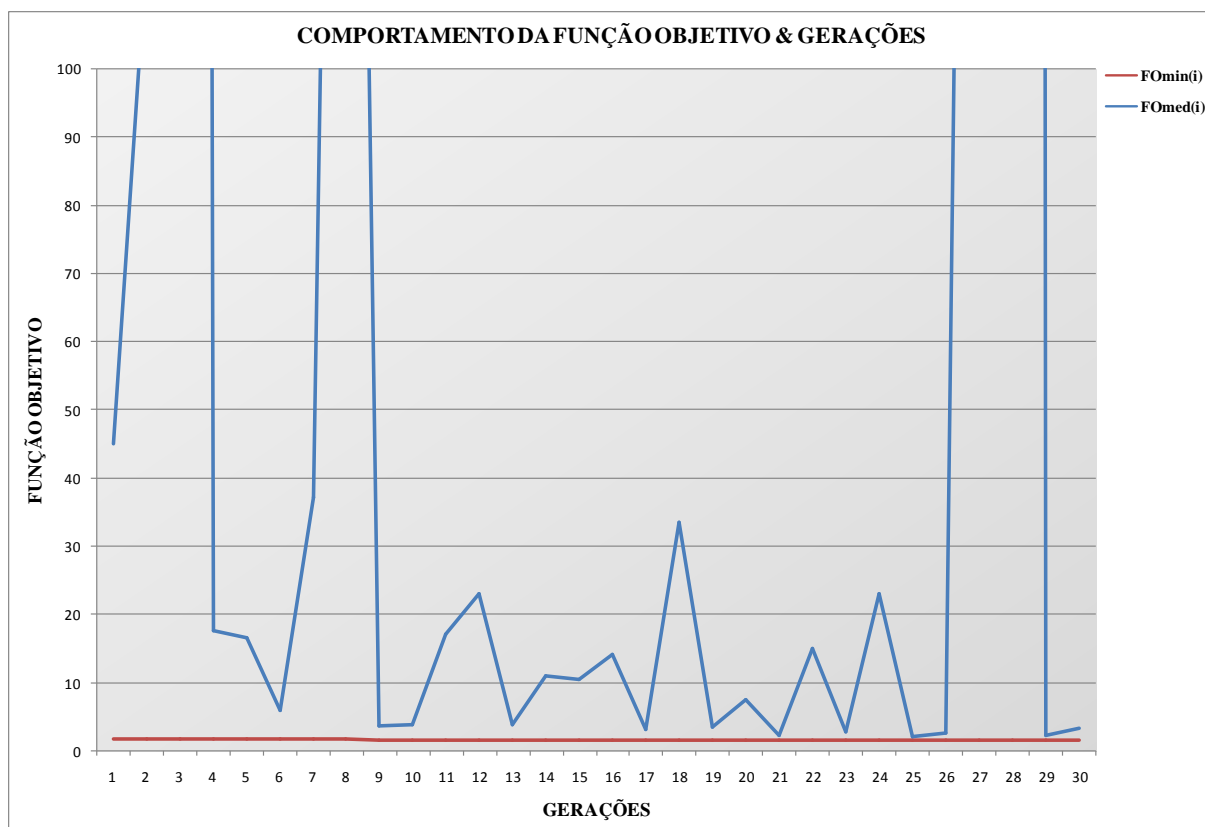


Figura 6.2.70 – Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 19.

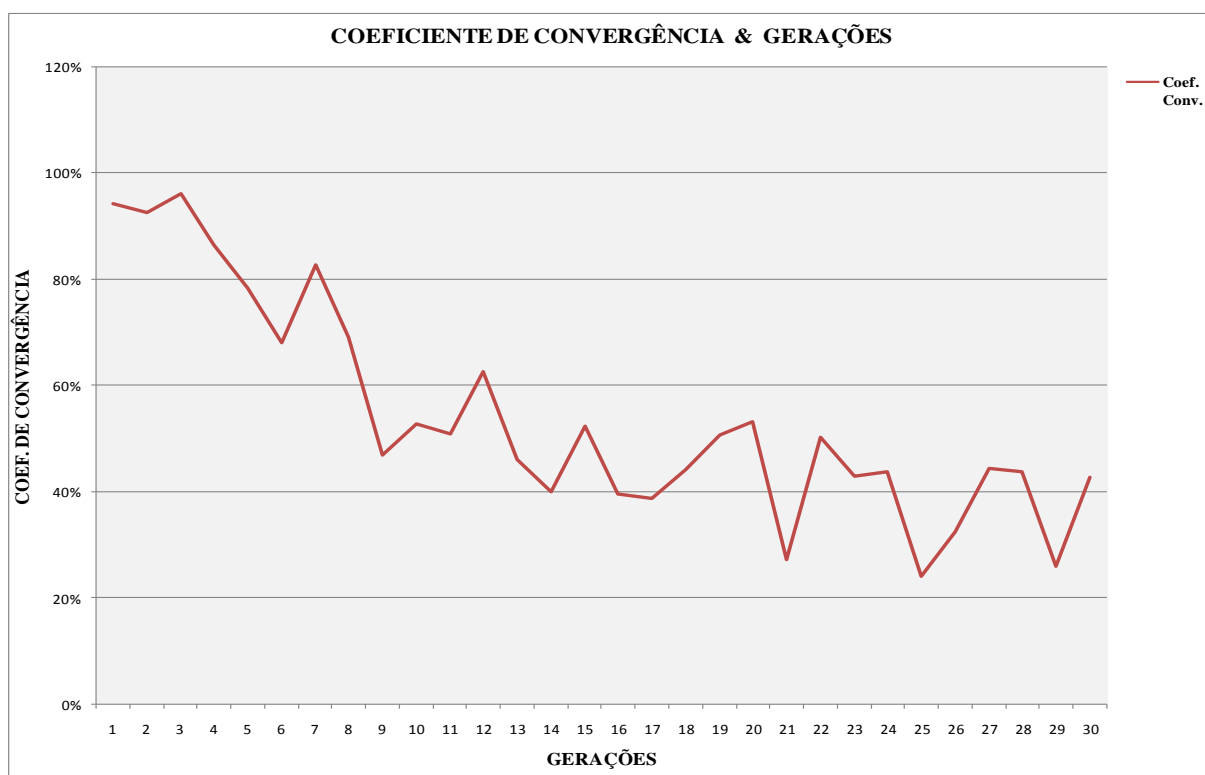


Figura 6.2.71 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 19.



• *Caso 20 – Resultados*

N° DA GERAÇÃO	CASO20	CASO20A	CASO20B	CASO20C	CASO20D	CASO20E
1	1,832	1,767	2,000	1,860	1,875	1,657
2	1,832	1,767	2,000	1,860	1,875	1,657
3	1,757	1,767	1,877	1,654	1,875	1,610
4	1,745	1,767	1,877	1,654	1,875	1,553
5	1,745	1,767	1,877	1,654	1,875	1,553
6	1,745	1,767	1,877	1,654	1,875	1,553
7	1,741	1,749	1,877	1,654	1,875	1,553
8	1,741	1,749	1,877	1,654	1,875	1,553
9	1,726	1,749	1,877	1,654	1,795	1,553
11	1,719	1,749	1,862	1,636	1,795	1,553
12	1,718	1,746	1,862	1,636	1,795	1,553
13	1,676	1,746	1,747	1,636	1,704	1,547
14	1,670	1,746	1,747	1,636	1,704	1,516
15	1,670	1,746	1,747	1,636	1,704	1,516
16	1,667	1,735	1,747	1,636	1,704	1,516
17	1,663	1,711	1,747	1,636	1,704	1,516
18	1,653	1,711	1,747	1,636	1,656	1,516
19	1,646	1,711	1,747	1,636	1,621	1,516
20	1,636	1,711	1,747	1,617	1,621	1,483
21	1,629	1,711	1,714	1,617	1,621	1,483
22	1,629	1,711	1,714	1,617	1,621	1,483
23	1,621	1,711	1,673	1,617	1,621	1,483
24	1,621	1,711	1,673	1,617	1,621	1,483
25	1,621	1,711	1,673	1,617	1,621	1,483
26	1,603	1,711	1,655	1,543	1,621	1,483
27	1,599	1,711	1,640	1,543	1,621	1,483
28	1,599	1,711	1,640	1,543	1,621	1,483
29	1,597	1,711	1,629	1,543	1,621	1,483
30	1,595	1,711	1,629	1,543	1,610	1,483
Taxa de Mutação - [A%]	0,8%					
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,949	12,037	11,938	11,724	11,957	12,087
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	2,045	2,028	2,053	2,053	2,041	2,049
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	24	17	29	26	30	20
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,832	1,767	2,000	1,860	1,875	1,657
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,595	1,711	1,629	1,543	1,610	1,483
Melhora no Valor da Função Objetivo [G]=[E]-[F]	0,237	0,056	0,371	0,317	0,265	0,174
Gradiente de Melhora no Valor da Função Obj. [H%]=[G]/[D]	0,92%	0,33%	1,28%	1,22%	0,88%	0,87%

Tabela 6.2.64 – Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do caso

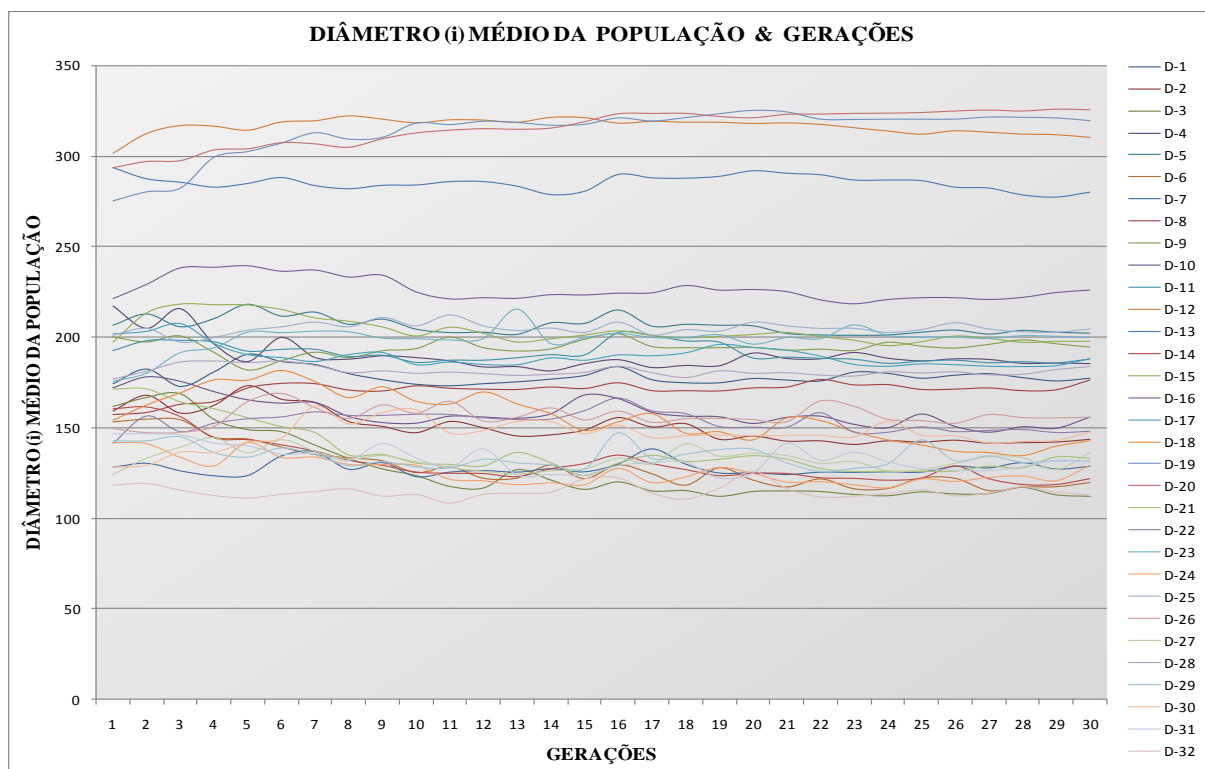


Figura 6.2.72 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 20.

ITER\TUBOS	FOmin(i)	FOmed(i)	FOmax(i)	Coef.Conv.
1	1,832	5.905,130	167.813,818	95,2%
2	1,832	2.088,711	61.699,982	96,0%
3	1,757	33,199	638,401	92,8%
4	1,745	450,542	13.245,732	85,6%
5	1,745	396,880	11.728,631	90,3%
6	1,745	14,056	126,364	72,6%
7	1,741	164,643	3.690,151	68,1%
8	1,741	30,735	641,558	62,7%
9	1,726	9,460	102,144	70,3%
10	1,722	3,758	21,899	49,5%
11	1,719	55,743	1.436,046	57,5%
12	1,718	2,906	9,012	37,1%
13	1,676	4,074	39,557	48,1%
14	1,670	15,882	397,301	48,2%
15	1,670	9,450	185,426	55,2%
16	1,667	13,483	112,841	56,3%
17	1,663	4,768	38,766	52,9%
18	1,653	4,751	24,344	57,3%
19	1,646	4,348	35,200	51,1%
20	1,636	4,177	20,451	47,7%
21	1,629	3,401	13,535	43,4%
22	1,629	2,944	9,280	42,0%
23	1,621	22,869	602,490	56,9%
24	1,621	2,363	8,726	30,3%
25	1,621	226,875	6.723,981	50,7%
26	1,603	2,584	10,301	37,0%
27	1,599	2,744	11,429	40,4%
28	1,599	2,989	12,752	43,9%
29	1,597	2,129	4,739	24,2%
30	1,595	4,314	25,347	58,6%
<b>VALORES TOTAIS=</b>	50,418	9.489,906	269.430,203	1721,5%
<b>VALORES MÉDIOS=</b>	1,681	316,330	8.981,007	57,4%

Tabela 6.2.65 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 20.

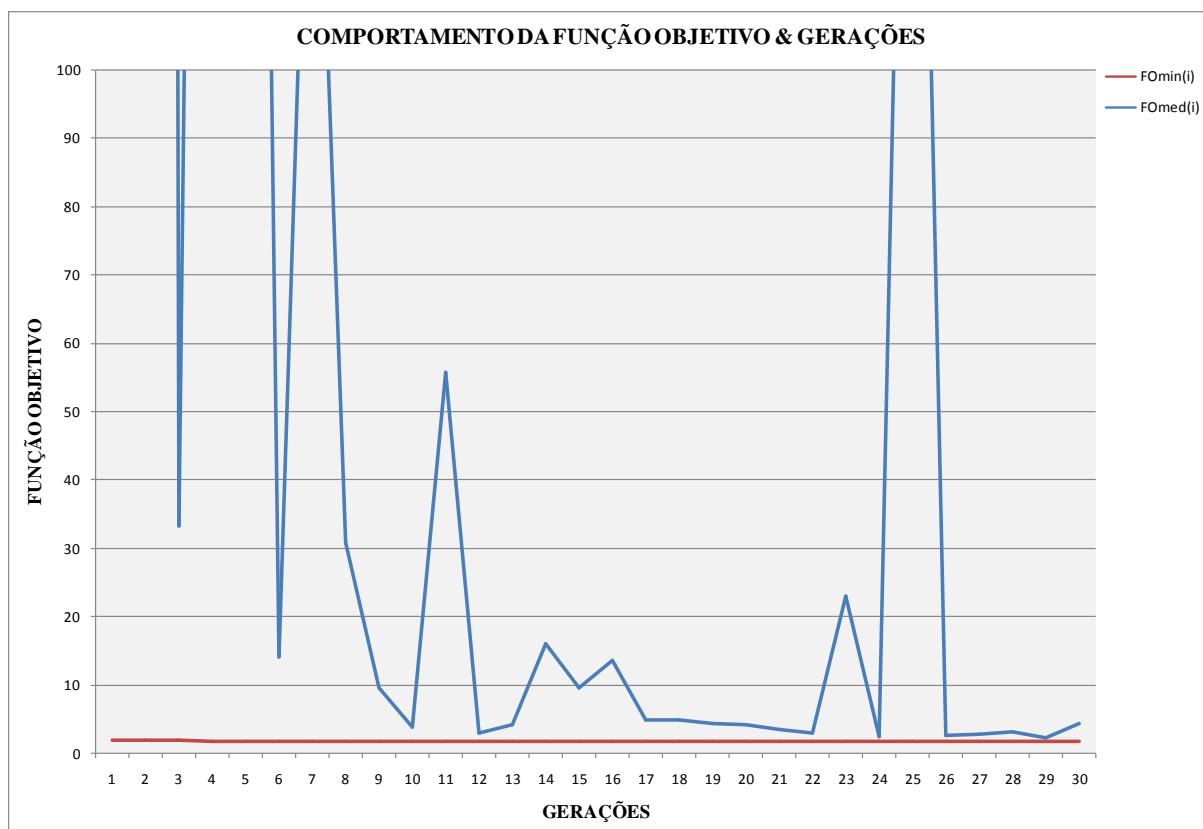


Figura 6.2.73 – Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do caso 20.

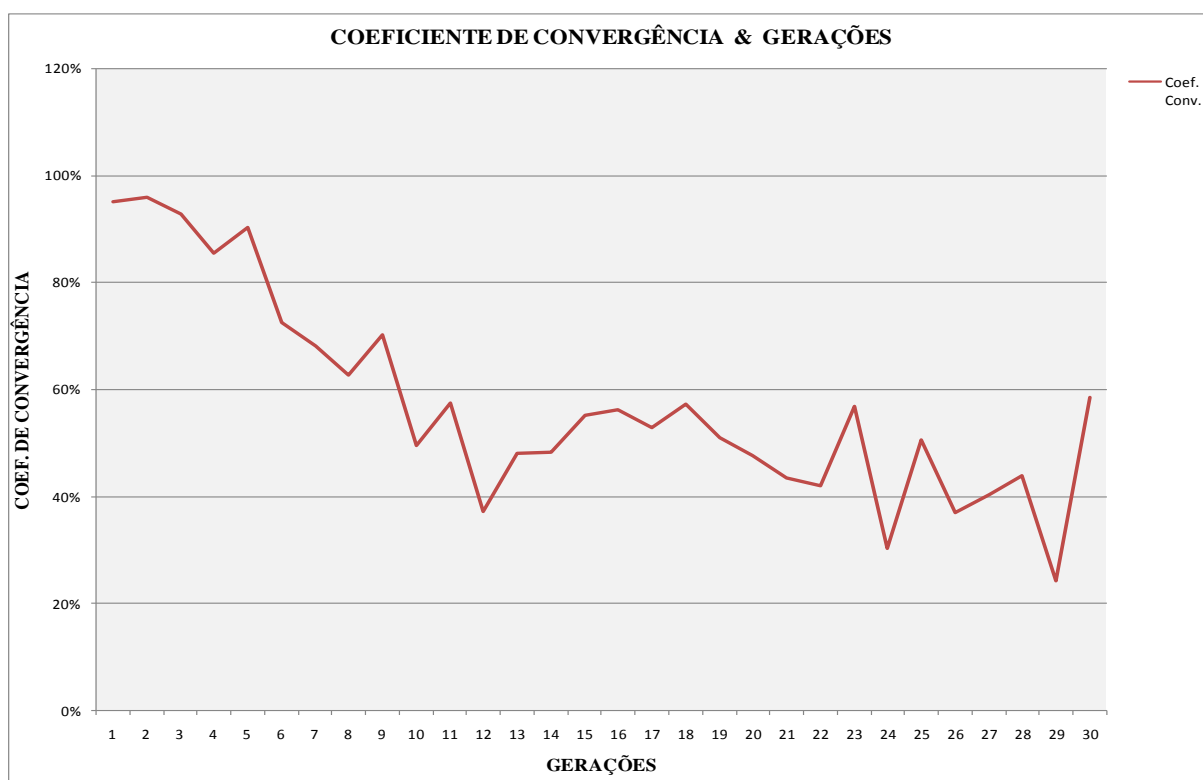


Figura 6.2.74 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 20.

• *Caso 15X – Resultados*

Este é o caso onde a taxa de mutação é nula, possibilitando a observação do desempenho do AG sem o operador mutação.

Nº DA GERAÇÃO	CASO15X	CASO15XA	CASO15XB	CASO15XC	CASO15XD	CASO15XE
1	1,819	1,719	1,753	2,040	1,708	1,877
2	1,739	1,719	1,680	1,836	1,708	1,753
3	1,714	1,633	1,639	1,836	1,708	1,753
4	1,702	1,633	1,639	1,828	1,666	1,743
5	1,693	1,633	1,639	1,786	1,666	1,743
6	1,676	1,546	1,639	1,786	1,666	1,743
7	1,673	1,546	1,639	1,786	1,654	1,743
8	1,672	1,546	1,639	1,786	1,649	1,743
9	1,672	1,546	1,639	1,786	1,649	1,743
11	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
12	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
13	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
14	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
15	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
16	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
17	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
18	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
19	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
20	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
21	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
22	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
23	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
24	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
25	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
26	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
27	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
28	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
29	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
30	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
Taxa de Mutação - [A%]	0,0%					
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,017	11,047	11,028	11,036	10,994	10,977
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,499	1,518	1,465	1,454	1,595	1,463
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	7	10	3	5	11	4
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,819	1,719	1,753	2,040	1,708	1,877
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,672	1,545	1,639	1,786	1,648	1,743
Melhora no Valor da Função Objetivo [G]=[E]-[F]	0,147	0,174	0,115	0,254	0,060	0,133
Gradiente de Melhora no Valor da Função Obj. [H%]=[G]/[D]	2,90%	1,74%	3,82%	5,08%	0,55%	3,33%

Tabela 6.2.66 – Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do caso 15X

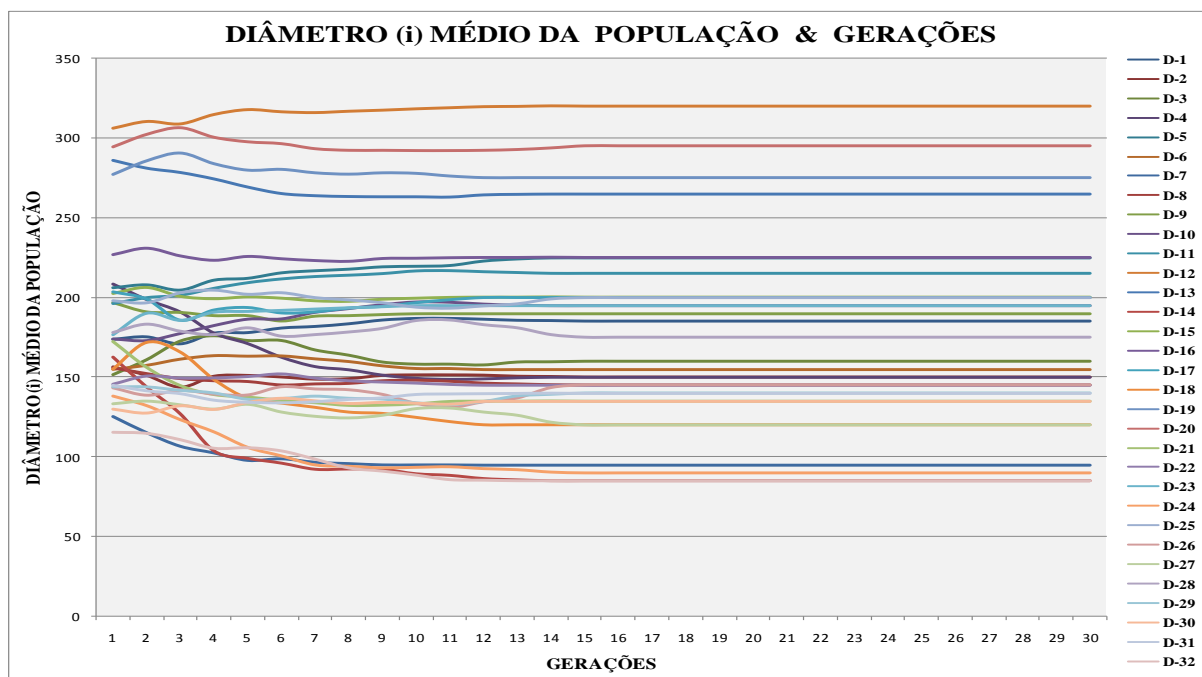


Figura 6.2.75 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 15X.

Observe-se no gráfico da figura 6.2.75, a ausência de comportamentos senóides das linhas que representam o diâmetro médio dos condutos das gerações, devido à inexistência de mutação, diferenciando-se dos outros casos onde o operador mutação realiza pequenas perturbações no cromossomo.

ITER\TUBOS	FOmin(i)	FOmed(i)	FOmax(i)	Coef.Conv.
1	1,819	122,840	2.648,688	93,7%
2	1,739	60,352	1.283,417	92,1%
3	1,714	108,283	2.851,308	86,4%
4	1,702	11,424	227,315	65,8%
5	1,693	3,323	31,432	41,7%
6	1,676	4,363	72,377	33,9%
7	1,673	1,859	3,495	9,9%
8	1,672	1,761	2,234	5,0%
9	1,672	1,768	2,796	5,2%
10	1,672	1,709	1,830	2,2%
11	1,672	1,694	1,880	1,3%
12	1,672	1,677	1,716	0,3%
13	1,672	1,712	2,775	2,3%
14	1,672	1,677	1,757	0,3%
15	1,672	1,672	1,672	0,0%
16	1,672	1,672	1,672	0,0%
17	1,672	1,672	1,672	0,0%
18	1,672	1,672	1,672	0,0%
19	1,672	1,672	1,672	0,0%
20	1,672	1,672	1,672	0,0%
21	1,672	1,672	1,672	0,0%
22	1,672	1,672	1,672	0,0%
23	1,672	1,672	1,672	0,0%
24	1,672	1,672	1,672	0,0%
25	1,672	1,672	1,672	0,0%
26	1,672	1,672	1,672	0,0%
27	1,672	1,672	1,672	0,0%
28	1,672	1,672	1,672	0,0%
29	1,672	1,672	1,672	0,0%
30	1,672	1,672	1,672	0,0%
<b>VALORES TOTAIS=</b>	50,476	351,198	7.159,774	440,2%
<b>VALORES MÉDIOS=</b>	1,683	11,707	238,659	14,7%

Tabela 6.2.67 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 15X.

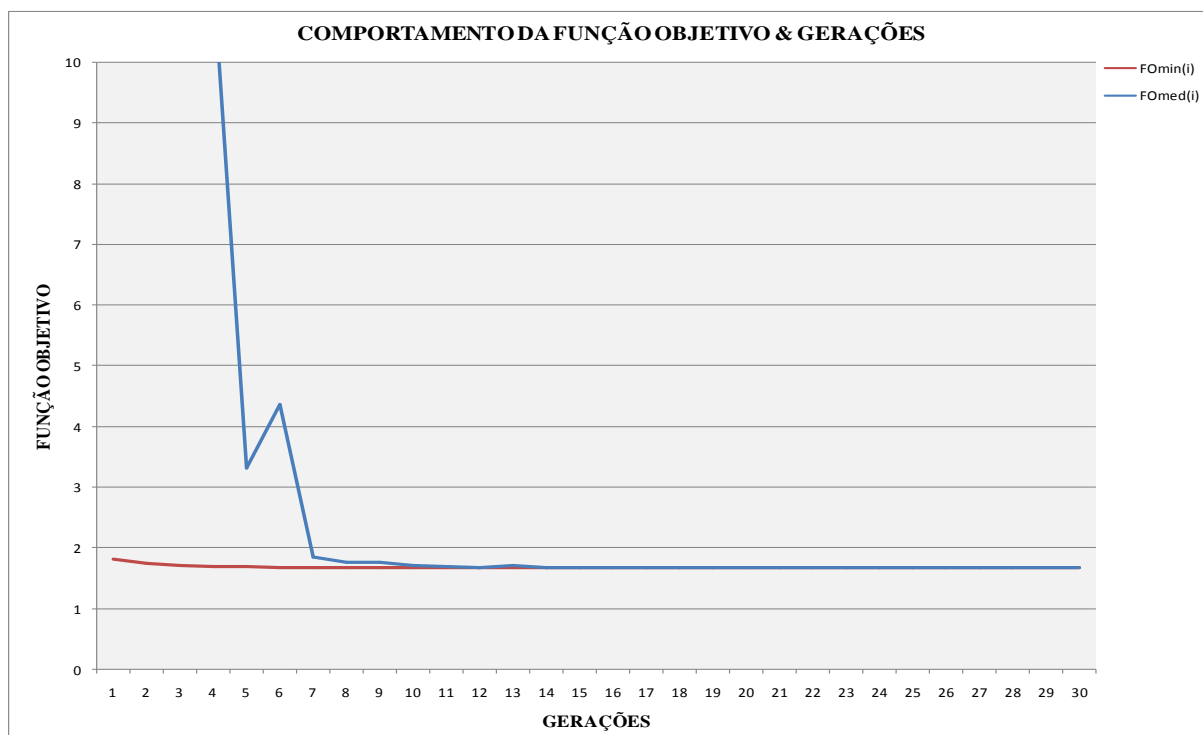


Figura 6.2.76 – Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 15X.

A figura 6.2.76, apresenta no comportamento dos valores médios da função objetivo a ausência de perturbações ao longo das gerações que a partir da décima quinta iteração converge para o valor mínimo da mesma não mais se modificando e anulando o coeficiente de convergência, conforme gráfico da figura 6.2.77.

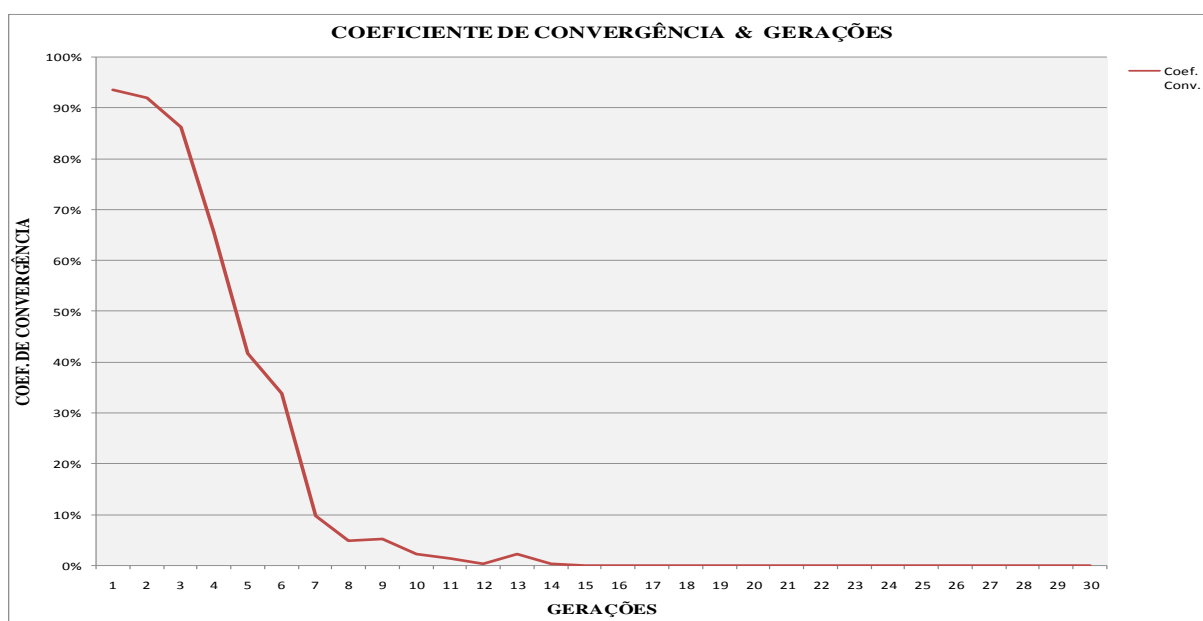


Figura 6.2.77 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 15X.

• *Caso 16X – Resultados*

Este é um caso que foi incluído para refinamento na busca da taxa de mutação de melhor desempenho, e foi assim designado por ter uma taxa de mutação 0,15% imediatamente superior ao caso 16 cuja taxa é de 0,10%.

N° DA GERAÇÃO	CASO16X	CASO16XA	CASO16XB	CASO16XC	CASO16XD	CASO16XE
1	1,642	1,791	1,718	1,491	1,511	1,698
2	1,633	1,780	1,686	1,491	1,511	1,698
3	1,633	1,780	1,686	1,491	1,511	1,698
4	1,631	1,780	1,675	1,491	1,511	1,698
5	1,627	1,760	1,675	1,491	1,511	1,698
6	1,622	1,760	1,648	1,491	1,511	1,698
7	1,619	1,760	1,648	1,491	1,511	1,685
8	1,571	1,602	1,648	1,491	1,476	1,638
9	1,571	1,602	1,648	1,491	1,476	1,638
11	1,566	1,576	1,648	1,491	1,476	1,638
12	1,566	1,576	1,648	1,491	1,476	1,638
13	1,566	1,576	1,648	1,491	1,476	1,638
14	1,566	1,576	1,648	1,491	1,476	1,638
15	1,566	1,576	1,648	1,491	1,476	1,638
16	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
17	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
18	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
19	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
20	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
21	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
22	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
23	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
24	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
25	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
26	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
27	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
28	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
29	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
30	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
Taxa de Mutação - [A %]	0,15%					
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,110	11,110	11,110	11,110	11,114	11,106
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,530	1,600	1,457	1,530	1,571	1,492
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	10	10	6	16	8	8
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,642	1,791	1,718	1,491	1,511	1,698
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
Melhora no Valor da Função Objetivo [G]=[E]-[F]	0,081	0,215	0,071	0,023	0,036	0,059
Gradiente de Melhora no Valor da Função Obj. [H%]=[G]/[D]	0,93%	2,15%	1,18%	0,14%	0,45%	0,74%

Tabela 6.2.68 – Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do caso 16X.

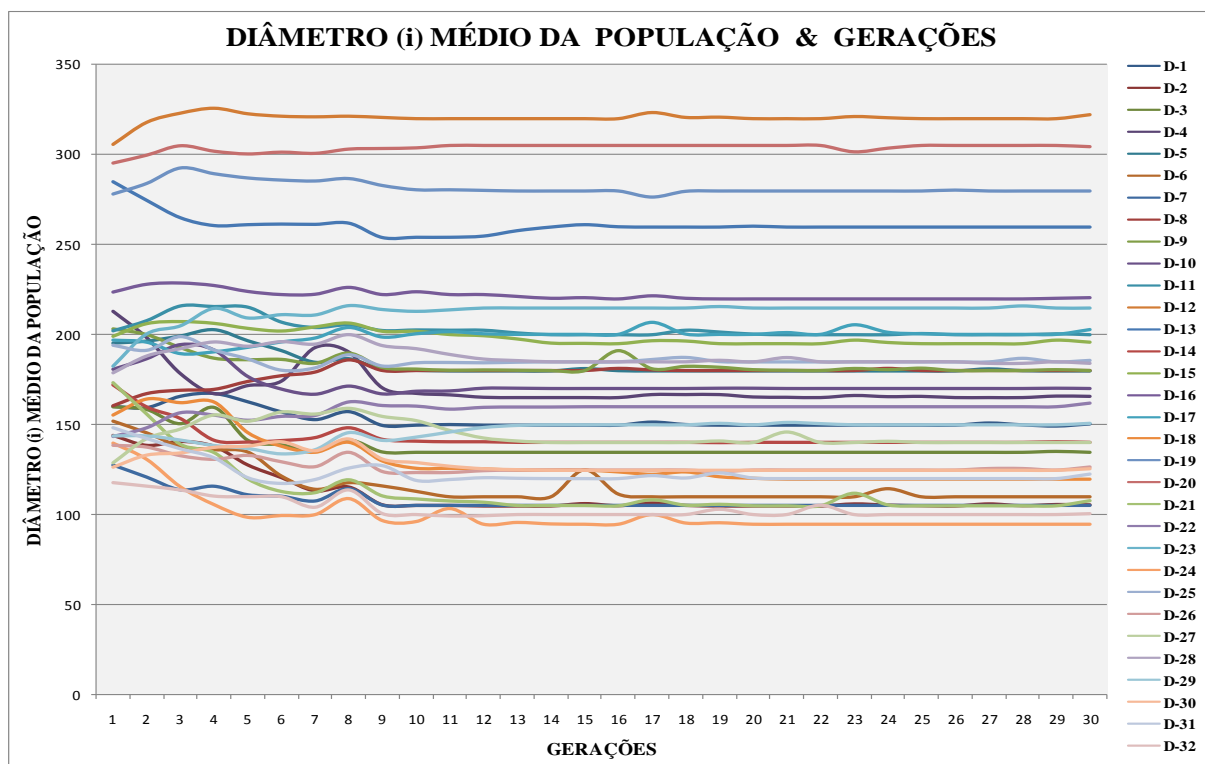


Figura 6.2.78 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 16X.

ITER\TUBOS	FOmin(i)	FOmed(i)	FOmax(i)	Coef.Conv.
1	1,642	95,903	2.344,985	95,2%
2	1,633	70,071	1.631,669	89,0%
3	1,633	474,237	13.805,888	84,3%
4	1,631	7,675	127,794	61,6%
5	1,627	3,216	20,804	46,6%
6	1,622	2,373	10,456	25,3%
7	1,619	2,035	3,246	18,0%
8	1,571	14,388	92,641	39,8%
9	1,571	4,647	32,686	28,4%
10	1,566	3,029	25,175	20,3%
11	1,566	1,661	2,187	5,3%
12	1,566	1,596	1,957	1,9%
13	1,566	1,573	1,629	0,5%
14	1,566	1,566	1,580	0,0%
15	1,566	6,597	21,375	22,9%
16	1,561	2,245	20,283	16,8%
17	1,561	1,670	1,884	5,4%
18	1,561	1,601	1,917	2,4%
19	1,561	1,747	4,743	9,2%
20	1,561	1,569	1,726	0,5%
21	1,561	1,658	2,262	5,0%
22	1,561	1,689	2,520	6,1%
23	1,561	1,661	1,948	5,0%
24	1,561	1,720	3,478	7,6%
25	1,561	1,566	1,608	0,3%
26	1,561	1,562	1,567	0,0%
27	1,561	1,574	1,605	0,8%
28	1,561	1,581	1,864	1,3%
29	1,561	1,606	2,014	2,5%
30	1,561	1,617	1,816	2,9%
<b>VALORES TOTAIS=</b>	<b>47,359</b>	<b>715,633</b>	<b>18.175,307</b>	<b>605,0%</b>
<b>VALORES MÉDIOS=</b>	<b>1,579</b>	<b>23,854</b>	<b>605,844</b>	<b>20,2%</b>

Tabela 6.2.69 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 16X.



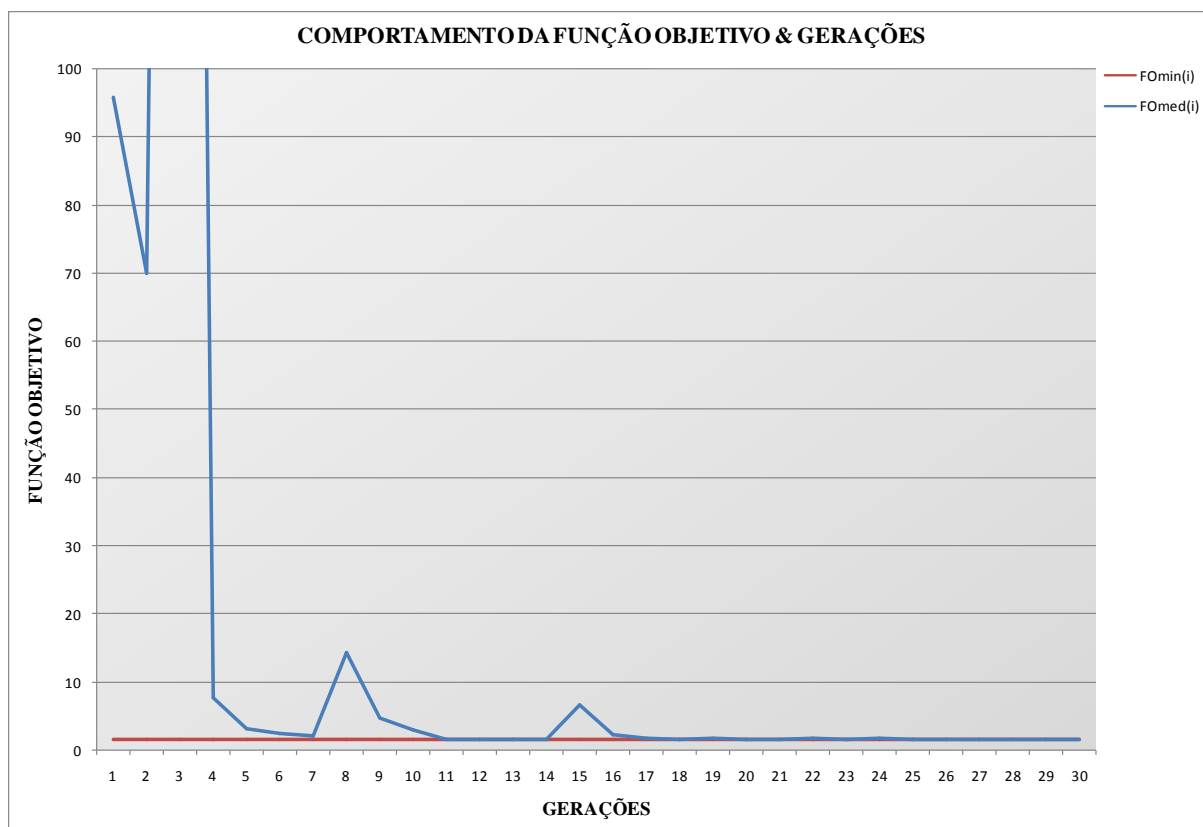


Figura 6.2.79 – Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 16X.



Figura 6.2.80 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 16X.

• *Caso 17X – Resultados*

Este é o terceiro e último caso incluído para refinamento na busca da taxa de mutação de melhor desempenho, sendo assim designado por ter uma taxa de mutação 0,30% imediatamente superior ao caso 17 cuja taxa é de 0,20%.

Nº DA GERAÇÃO	CASO17X	CASO17XA	CASO17XB	CASO17XC	CASO17XD	CASO17XE
1	2,030	2,187	1,977	1,884	2,426	1,675
2	1,856	2,032	1,605	1,884	2,083	1,675
3	1,832	2,032	1,605	1,884	1,963	1,675
4	1,798	1,907	1,605	1,880	1,963	1,636
5	1,774	1,788	1,605	1,880	1,963	1,636
6	1,763	1,731	1,605	1,880	1,963	1,636
7	1,763	1,731	1,605	1,880	1,963	1,636
8	1,759	1,710	1,605	1,880	1,963	1,636
9	1,749	1,660	1,605	1,880	1,963	1,636
11	1,746	1,660	1,605	1,868	1,963	1,636
12	1,746	1,660	1,605	1,868	1,963	1,636
13	1,746	1,660	1,605	1,868	1,963	1,636
14	1,746	1,660	1,605	1,868	1,963	1,636
15	1,746	1,660	1,605	1,868	1,963	1,636
16	1,746	1,660	1,605	1,868	1,963	1,636
17	1,746	1,660	1,605	1,868	1,963	1,636
18	1,740	1,660	1,605	1,837	1,963	1,636
19	1,740	1,660	1,605	1,837	1,963	1,636
20	1,740	1,660	1,605	1,837	1,963	1,636
21	1,723	1,660	1,605	1,751	1,963	1,636
22	1,723	1,660	1,605	1,751	1,963	1,636
23	1,723	1,660	1,605	1,751	1,963	1,636
24	1,719	1,660	1,605	1,730	1,963	1,636
25	1,719	1,660	1,605	1,730	1,963	1,636
26	1,719	1,660	1,605	1,730	1,963	1,636
27	1,715	1,660	1,605	1,709	1,963	1,636
28	1,703	1,604	1,605	1,709	1,963	1,636
29	1,703	1,604	1,605	1,709	1,963	1,636
30	1,703	1,604	1,605	1,709	1,963	1,636
Taxa de Mutação - [A%]	0,3%					
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,378	11,479	11,214	11,436	11,380	11,383
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,636	1,694	1,615	1,711	1,654	1,508
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	13	28	2	27	3	4
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	2,030	2,187	1,977	1,884	2,426	1,675
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,703	1,604	1,605	1,709	1,963	1,636
Melhora no Valor da Função Objetivo [G]=[E]-[F]	0,326	0,583	0,371	0,175	0,463	0,039
Gradiente de Melhora no Valor da Função Obj. [H%]=[G]/[D]	7,54%	2,08%	18,57%	0,65%	15,44%	0,97%

Tabela 6.2.70 – Evolução dos valores mínimos da função objetivo para as simulações do caso 17X.

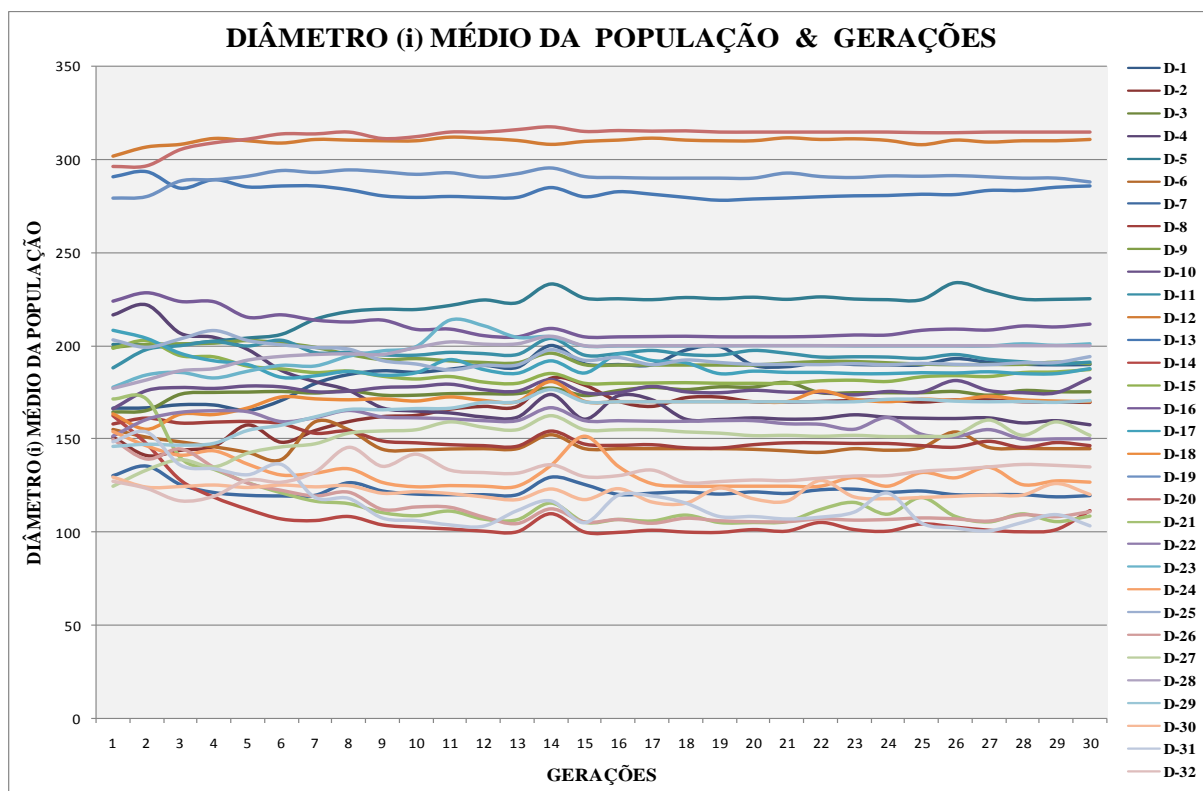


Figura 6.2.81 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 17X.

ITER\TUBOS	FOmin(i)	FOmed(i)	FOmax(i)	Coef.Conv.
1	2,030	1.010,786	29.672,935	94,8%
2	1,856	88,221	2.174,176	90,4%
3	1,832	8,077	80,757	69,6%
4	1,798	69,485	1.894,147	63,4%
5	1,774	182,212	5.323,429	68,1%
6	1,763	4,563	54,728	51,7%
7	1,763	7,666	151,596	49,1%
8	1,759	9,276	121,701	54,4%
9	1,749	2,109	5,220	15,3%
10	1,746	2,436	15,978	25,5%
11	1,746	2,139	4,284	17,4%
12	1,746	2,014	6,230	11,7%
13	1,746	1,935	3,560	9,0%
14	1,746	14,248	75,837	36,4%
15	1,746	3,115	9,166	28,1%
16	1,746	3,186	8,030	25,3%
17	1,746	2,469	5,622	23,8%
18	1,740	2,120	4,028	16,3%
19	1,740	2,672	19,305	22,5%
20	1,740	1,835	2,642	5,1%
21	1,723	1,956	4,402	10,5%
22	1,723	2,321	5,159	23,3%
23	1,723	2,099	4,502	15,4%
24	1,719	2,077	3,865	15,5%
25	1,719	2,135	5,145	15,2%
26	1,719	2,084	3,731	15,6%
27	1,715	2,147	3,917	18,8%
28	1,703	1,859	2,731	8,3%
29	1,703	2,308	8,067	24,3%
30	1,703	2,164	4,254	17,2%
<b>VALORES TOTAIS=</b>	<b>52,666</b>	<b>1.441,715</b>	<b>39.679,147</b>	<b>942,0%</b>
<b>VALORES MÉDIOS=</b>	<b>1,756</b>	<b>48,057</b>	<b>1.322,638</b>	<b>31,4%</b>

Tabela 6.2.71 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 17X.

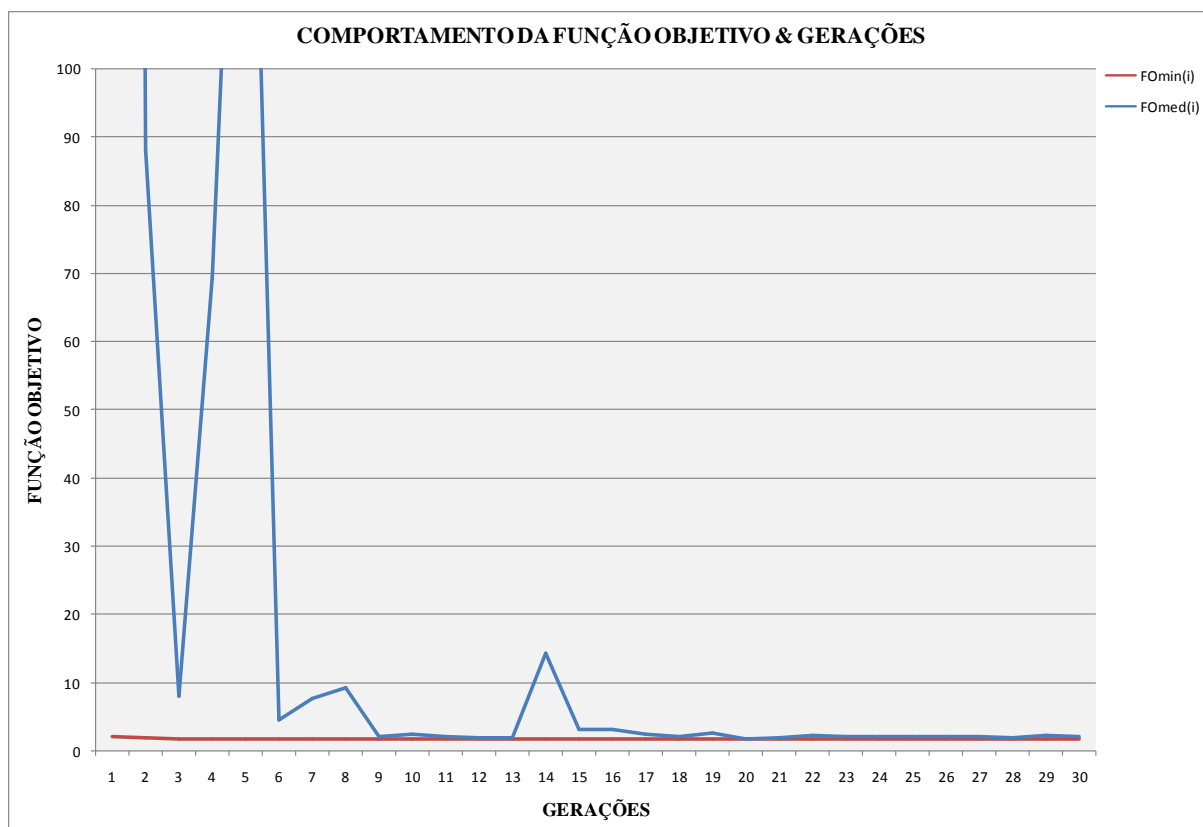


Figura 6.2.82 – Comportamento dos valores mínimo, e médio da função objetivo ao longo das gerações do Caso 17X.

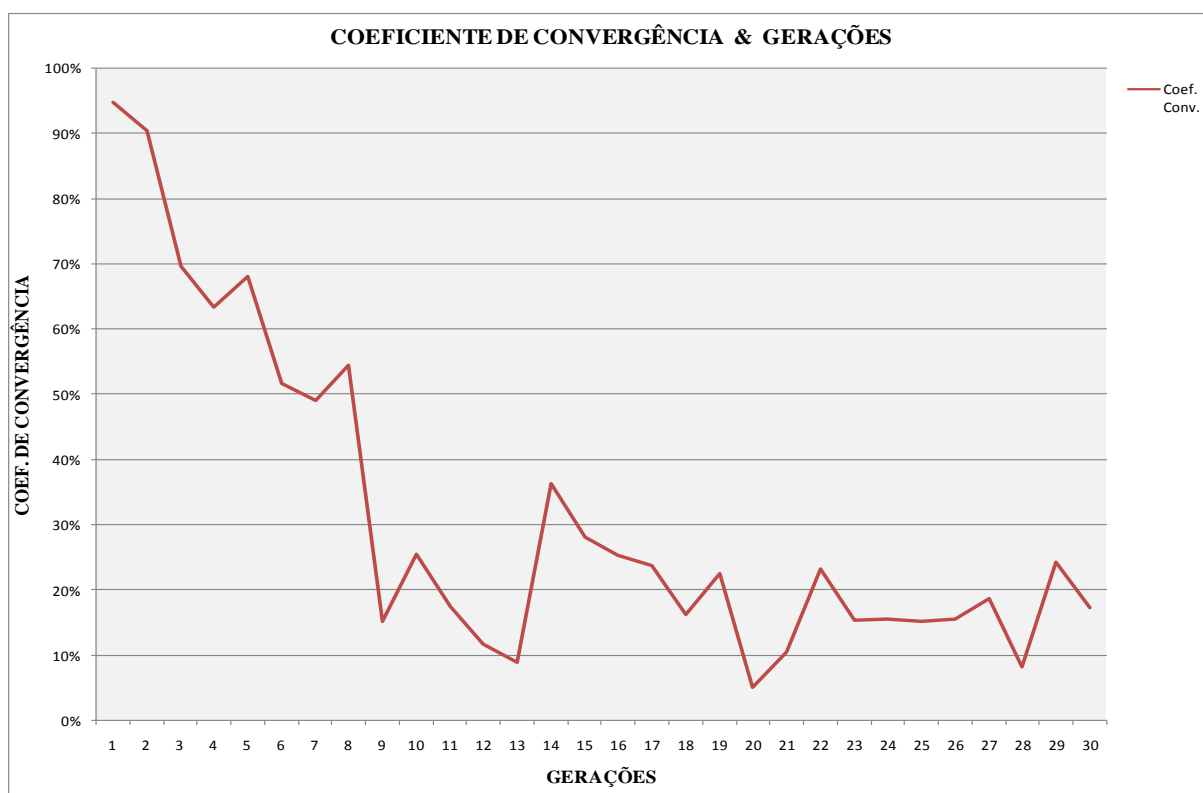


Figura 6.2.83 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 17X.

• *Síntese Analítica do Grupo 4*

Nº DA GERAÇÃO	CASO15X	CASO16	CASO16X	CASO17	CASO17X	CASO18	CASO19	CASO20
1	1,819	1,756	1,642	1,861	2,030	1,877	1,803	1,832
2	1,739	1,744	1,633	1,861	1,856	1,865	1,788	1,832
3	1,714	1,681	1,633	1,769	1,832	1,823	1,766	1,757
4	1,702	1,681	1,631	1,707	1,798	1,823	1,721	1,745
5	1,693	1,656	1,627	1,707	1,774	1,823	1,721	1,745
6	1,676	1,646	1,622	1,693	1,763	1,823	1,721	1,745
7	1,673	1,627	1,619	1,691	1,763	1,817	1,716	1,741
8	1,672	1,624	1,571	1,682	1,759	1,813	1,702	1,741
9	1,672	1,622	1,571	1,678	1,749	1,787	1,652	1,726
11	1,672	1,620	1,566	1,678	1,746	1,779	1,652	1,719
12	1,672	1,616	1,566	1,676	1,746	1,779	1,643	1,718
13	1,672	1,616	1,566	1,670	1,746	1,779	1,643	1,676
14	1,672	1,616	1,566	1,670	1,746	1,772	1,643	1,670
15	1,672	1,616	1,566	1,670	1,746	1,761	1,636	1,670
16	1,672	1,616	1,561	1,670	1,746	1,759	1,618	1,667
17	1,672	1,606	1,561	1,667	1,746	1,759	1,608	1,663
18	1,672	1,606	1,561	1,667	1,740	1,759	1,608	1,653
19	1,672	1,606	1,561	1,667	1,740	1,757	1,608	1,646
20	1,672	1,606	1,561	1,667	1,740	1,757	1,597	1,636
21	1,672	1,606	1,561	1,667	1,723	1,757	1,585	1,629
22	1,672	1,606	1,561	1,667	1,723	1,754	1,585	1,629
23	1,672	1,606	1,561	1,636	1,723	1,748	1,585	1,621
24	1,672	1,606	1,561	1,636	1,719	1,748	1,585	1,621
25	1,672	1,606	1,561	1,636	1,719	1,746	1,585	1,621
26	1,672	1,606	1,561	1,636	1,719	1,738	1,582	1,603
27	1,672	1,606	1,561	1,636	1,715	1,733	1,582	1,599
28	1,672	1,606	1,561	1,636	1,703	1,727	1,582	1,599
29	1,672	1,606	1,561	1,636	1,703	1,726	1,580	1,597
30	1,672	1,606	1,561	1,636	1,703	1,726	1,580	1,595
Taxa de Mutação - [A %]	0,0%	0,1%	0,15%	0,2%	0,3%	0,4%	0,6%	0,8%
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,017	11,063	11,110	11,163	11,378	11,576	11,699	11,949
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,499	1,541	1,530	1,627	1,636	1,873	1,966	2,045
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	7	11	10	13	13	24	22	24
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,819	1,756	1,642	1,861	2,030	1,877	1,803	1,832
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,672	1,606	1,561	1,636	1,703	1,726	1,580	1,595
Melhora no Valor da Função Objetivo [G]=[E]-[F]	0,147	0,151	0,081	0,225	0,326	0,151	0,223	0,237
Gradiente de Melhora no Valor da Função Obj. [H%]=[G]/[D]	2,90%	1,68%	0,93%	2,98%	7,54%	0,57%	1,13%	0,92%

Tabela 6.2.72 – Valores da função objetivo da melhor solução a cada geração nos casos do grupo 4.

A análise dos resultados apresentados na tabela 6.2.72, que para cada caso sintetiza a média aritmética de cinco simulações, demonstra uma relativa proximidade de valores mínimos da função objetivo, o menos apto (caso18 - FOmin=1,726) é 10,57% maior que o melhor resultado (caso16X - FOmin=1,561).

A figura 6.2.84 demonstra a falta de correlação entre a taxa de mutação e os valores mínimos da função objetivo encontrados, devido ao efeito da aleatoriedade inerente ao processo já anteriormente mencionado.

Porém analisando esta figura percebe-se que o primeiro tramo no intervalo de  $0,00\% < \text{Taxa de mutação } (T_m) < 0,15\%$  é descendente, significando que o crescimento da mesma melhora as soluções encontradas, ou seja, neste intervalo a diversidade aumenta com a  $T_m$  o suficiente para encontrar dentro do espaço amostral soluções mais aptas, sem destruir as melhores informações dos *blocos de construção* (parte do cromossomo).

Já o tramo no intervalo de  $0,15\% < \text{Taxa de mutação } (T_m) < 0,40\%$  é ascendente, significando que o crescimento da mesma piora as soluções encontradas, ou seja, neste intervalo a diversidade aumenta com a  $T_m$  o suficiente para desfazer as melhores informações dos *blocos de construção* (parte do cromossomo).

Na parte do gráfico onde a taxa de mutação é maior que 0,40%, embora o gradiente de pressão exercido pela recombinação seja neutralizada com a destruição das melhores informações cromossômicas, o aumento da diversidade “exploration” encontra, ao acaso, soluções superiores em aptidão que as taxas de 0,20%, 0,30% e 0,40%.

Esta pré-análise, que considera somente os valores mínimos da função objetivo encontrados, aponta a taxa de 0,15% como à de melhor resultado. Espera-se a comprovação desta escolha quando considerar-se o esforço computacional e quando analisada o comportamento dos valores médios da função objetivo a cada geração, mais adiante.

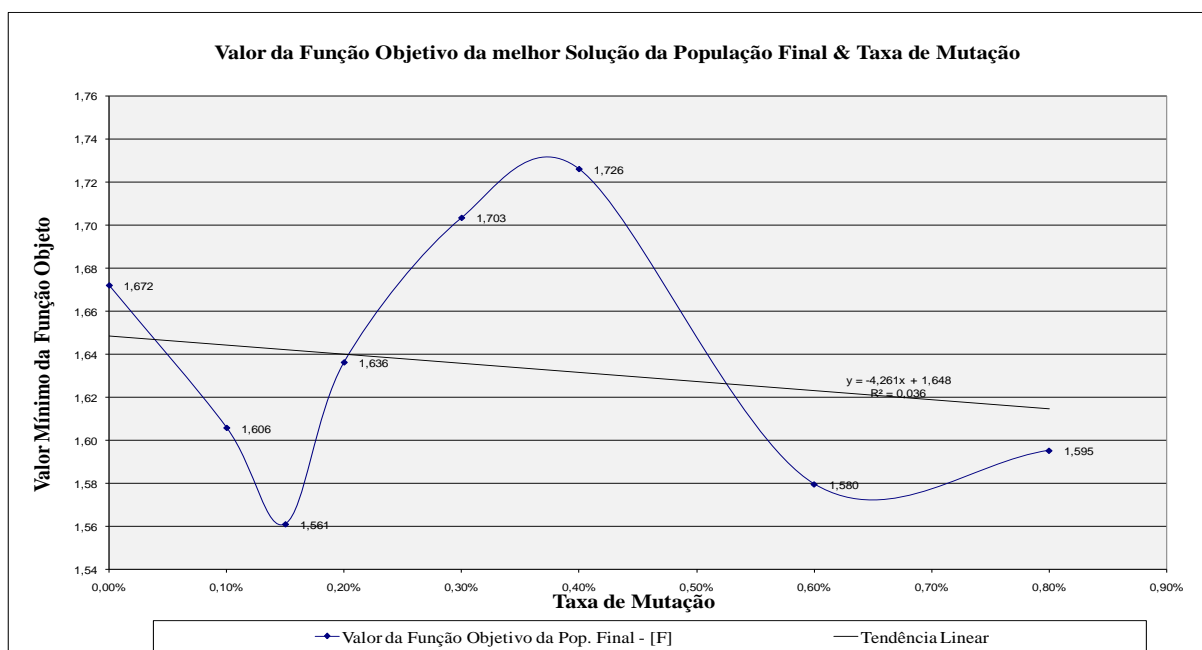


Figura 6.2.84 – Comportamento dos valores mínimos da função objetiva encontrados para os casos do grupo 4

PARÂMETROS ANALISADOS	CASO15X	CASO16	CASO16X	CASO17	CASO17X	CASO18	CASO19	CASO20
Taxa de Recombinação - [A%]	0,00%	0,10%	0,15%	0,20%	0,30%	0,40%	0,60%	0,80%
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,017	11,063	11,110	11,163	11,378	11,576	11,699	11,949
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,499	1,541	1,530	1,627	1,636	1,873	1,966	2,045
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	7	11	10	13	13	24	22	24
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,819	1,756	1,642	1,861	2,030	1,877	1,803	1,832
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,672	1,606	1,561	1,636	1,703	1,726	1,580	1,595
Melhora no Valor da Função Objetivo [G]=[E]-[F]	0,147	0,151	0,081	0,225	0,326	0,151	0,223	0,237
Gradiente de Melhora no Valor da Função Objetivo [H]=[G]/[D]	2,90%	1,68%	0,93%	2,98%	7,54%	0,57%	1,13%	0,92%
ANÁLISE RELATIVA À MELHOR SOLUÇÃO ENCONTRADA	CASO15X	CASO16	CASO16X	CASO17	CASO17X	CASO18	CASO19	CASO20
Percentual do Tempo de Proc. Relativo a Maior Tempo (TPMT=11,950min) - [I%]=[B]/(TPMT)	92,2%	92,6%	93,0%	93,4%	95,2%	96,9%	97,9%	100,0%
Percentual do Tamanho do Arquivo Relativo a Maior Arquivo (TAMA=2,045Mb) - [J%]=[C]/(TAMA)	73,3%	75,4%	74,8%	79,6%	80,0%	91,6%	96,2%	100,0%
Percentual Médio de Desempenho Relativo ao Esforço Computacional - [K%]=([I%]+[J%])/2	82,8%	84,0%	83,9%	86,5%	87,6%	94,2%	97,0%	100,0%
Percentual de Desempenho de Convergência ou Proximidade do Valor da Função Objetivo Relativa a Melhor	7,1%	2,9%	0,0%	4,8%	9,1%	10,6%	1,2%	2,2%
Percentual de Desempenho Efetivo - [M%]=[K%]+[L%]	89,9%	86,9%	83,9%	91,3%	96,8%	104,8%	98,2%	102,2%

Tabela 6.2.73 – Análise dos parâmetros relativos à melhor solução encontrada dos casos do grupo 4.

Quanto aos desempenhos associados ao esforço computacional referente ao tempo de processamento, apresentado na tabela 6.2.73 e na figura 6.2.85, configura-se uma correlação ( $R^2=0,973$ ) com a taxa de mutação. Sendo o caso 20 o que requer mais tempo de processamento (11,949 minutos) cerca de 8,46% a mais que o caso 15X (11,017 minutos), o mais rápido.

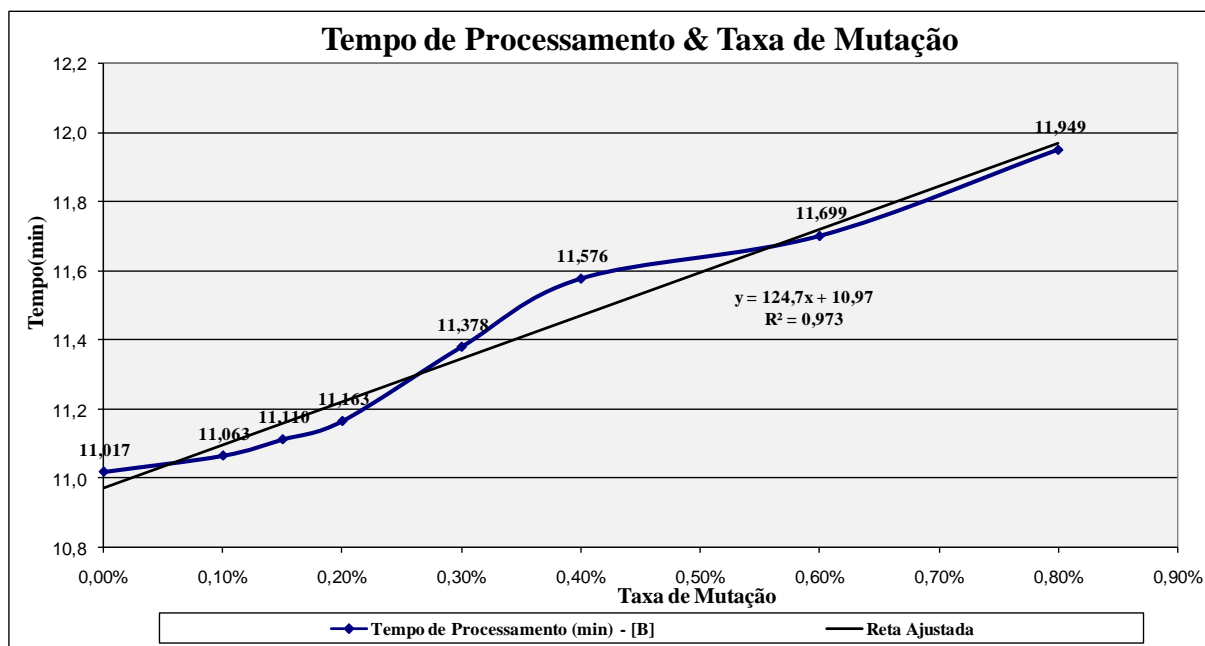


Figura 6.2.85 – Desempenho da componente do esforço computacional tempo de processamento para os casos do grupo 4

No tocante à outra componente do esforço computacional, a capacidade requerida do arquivo, demonstrou também ter correlação ( $R^2=0,937$ ) com a taxa de mutação, embora a relação de diferença nos desempenhos do pior caso  $Tm=0,80\%$  com 2,045Mb para o melhor  $Tm=0,00\%$  com 1,499Mb seja maior que a outra componente do esforço, cerca de 36,42%.

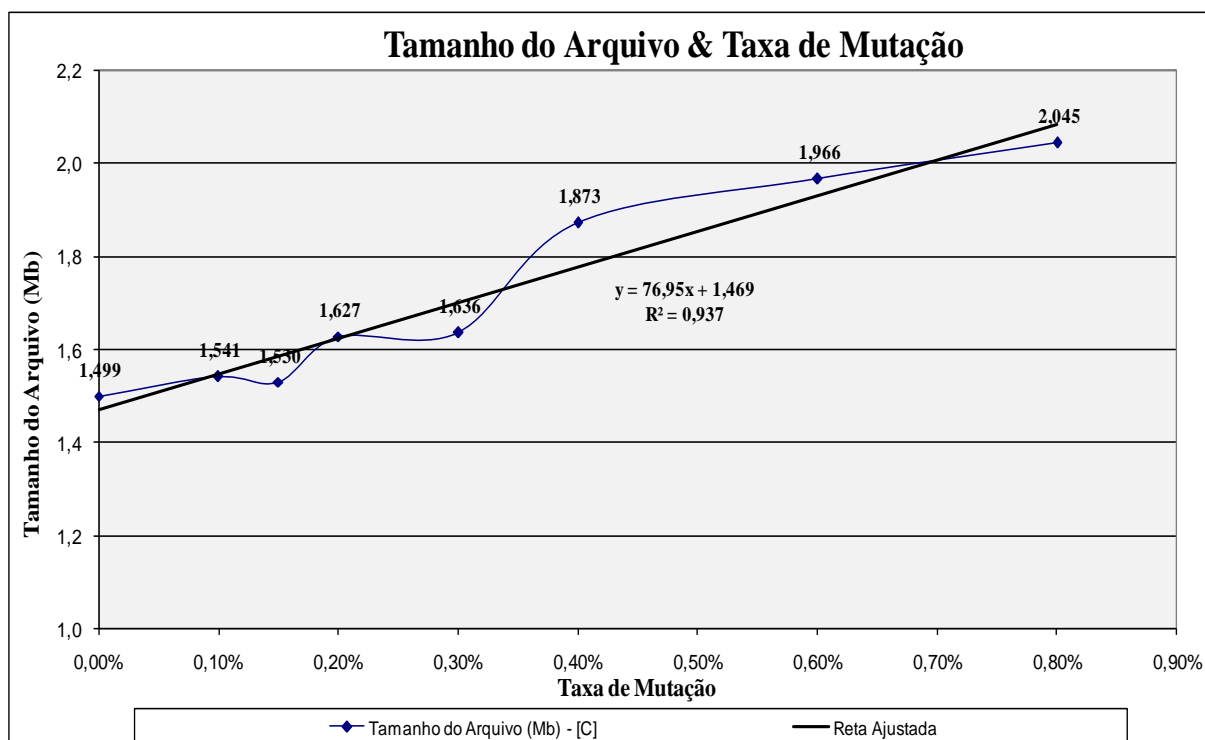


Figura 6.2.86 – Desempenho da componente do esforço computacional tamanho do arquivo (memória requerida) para os casos do grupo 4

Novamente objetivo desta análise de sensibilidade é encontrar para este parâmetro (taxa de mutação) um ponto de equilíbrio do AG entre alentos antagônicos que são a convergência e qualidade final das soluções e o esforço computacional. Este ponto de equilíbrio resulta no melhor desempenho associado ao tempo de processamento, esforço computacional e proximidade ou convergência da solução ao resultado ótimo do problema.

A figura 6.2.87, apresenta o comportamento destes alentos para cada caso analisado deste grupo.



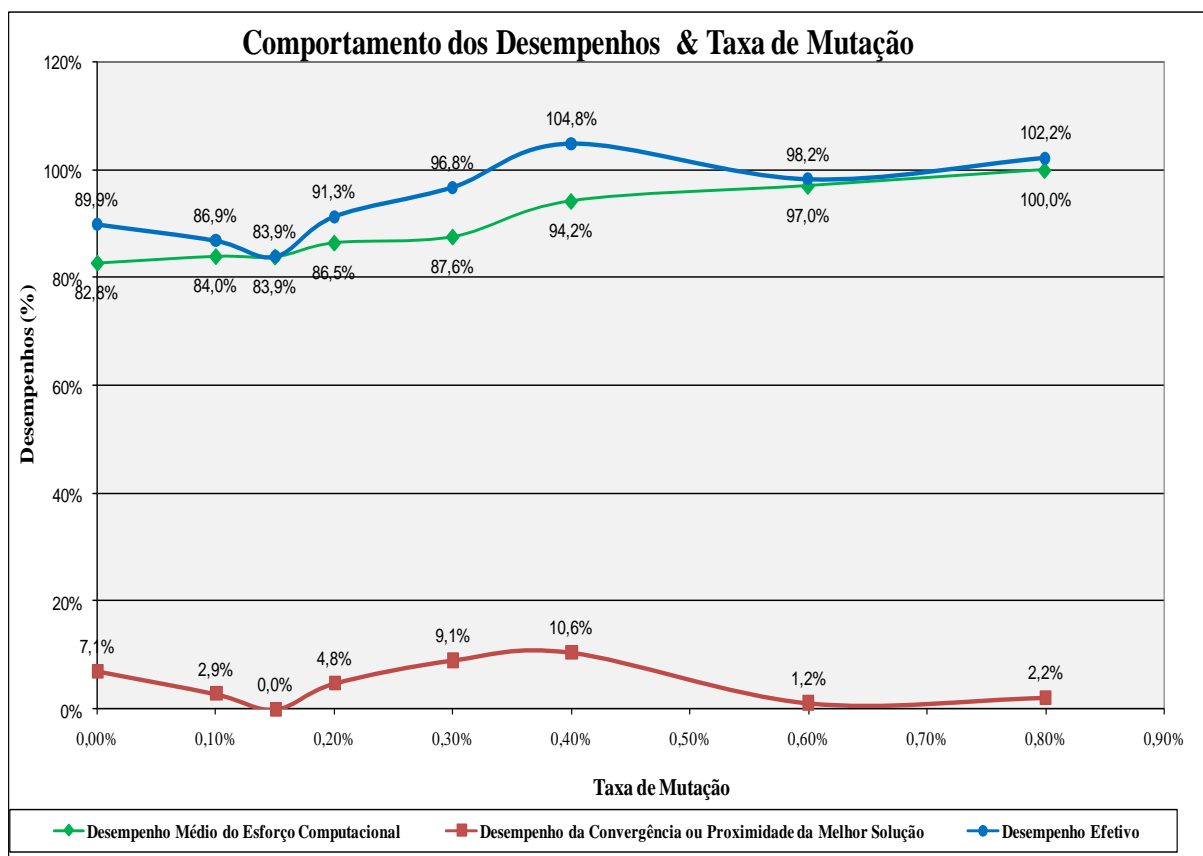


Figura 6.2.87 – Comportamento dos Desempenhos Relativos à melhor solução das simulações dos casos do grupo 4.

Concluindo-se também por esta análise, que a taxa de mutação de 0,15% resulta no melhor desempenho associado ao esforço computacional e proximidade ou convergência da solução ao resultado ótimo do problema.

A tabela 6.2.74 as figuras 6.2.88 e 6.2.89, fornecem subsídios para a última análise quanto ao comportamento dos valores médios da função objetivo a cada geração para os casos deste grupo.

Nº DA GERAÇÃO	CASO15X-0,0%	CASO16-0,1%	CASO16X-0,15%	CASO17-0,2%	CASO17X-0,3%	CASO18-0,4%	CASO19-0,6%	CASO20-0,8%
1	122,840	556,506	95,903	167,592	1.010,786	138,242	45,145	5.905,130
2	60,352	30,939	70,071	499,582	88,221	1.345,986	117,622	2.088,711
3	108,283	212,489	474,237	48,794	8,077	94,549	1.984,295	33,199
4	11,424	40,530	7,675	18,147	69,485	10,428	17,596	450,542
5	3,323	3,264	3,216	19,628	182,212	48,908	16,599	396,880
6	4,363	2,592	2,373	6,877	4,563	5,926	6,001	14,056
7	1,859	2,009	2,035	2,539	7,666	36,205	37,216	164,643
8	1,761	1,843	14,388	3,841	9,276	8,251	330,082	30,735
9	1,768	1,784	4,647	1,970	2,109	32,261	3,714	9,460
10	1,709	3,133	3,029	218,332	2,436	12,540	3,896	3,758
11	1,694	1,818	1,661	1,915	2,139	24,200	17,143	55,743
12	1,677	1,671	1,596	1,820	2,014	40,143	23,121	2,906
13	1,712	1,945	1,573	1,884	1,935	2,741	3,888	4,074
14	1,677	1,715	1,566	2,073	14,248	4,062	10,944	15,882
15	1,672	1,657	6,597	5,758	3,115	5,234	10,468	9,450
16	1,672	2,628	2,245	2,597	3,186	2,683	14,073	13,483
17	1,672	1,814	1,670	1,765	2,469	2,605	3,091	4,768
18	1,672	1,803	1,601	1,798	2,120	2,171	33,618	4,751
19	1,672	1,633	1,747	2,425	2,672	16,796	3,504	4,348
20	1,672	1,874	1,569	1,943	1,835	3,554	7,530	4,177
21	1,672	1,827	1,658	2,015	1,956	198,104	2,200	3,401
22	1,672	1,609	1,689	2,656	2,321	2,919	14,944	2,944
23	1,672	1,648	1,661	2,348	2,099	3,687	2,864	22,869
24	1,672	1,619	1,720	2,060	2,077	4,202	23,136	2,363
25	1,672	1,609	1,566	2,357	2,135	9,422	2,151	226,875
26	1,672	1,634	1,562	1,836	2,084	3,157	2,575	2,584
27	1,672	1,607	1,574	1,852	2,147	57,634	397,703	2,744
28	1,672	1,607	1,581	1,786	1,859	4,065	5.196,076	2,989
29	1,672	1,607	1,606	1,903	2,308	2,344	2,194	2,129
30	1,672	1,661	1,617	1,896	2,164	2,496	3,280	4,314
VALORES TOTAIS=	351,198	890,076	715,633	1.031,989	1.441,715	2.125,515	8.336,669	9.489,906
VALORES MÉDIOS=	11,707	29,669	23,854	34,400	48,057	70,850	277,889	316,330

HACHURA AZUL INDICA O MENOR DOS VALORES ENCONTRADO A CADA GERAÇÃO ENTRE OS DOIS CASOS DE MELHORES DESMPENHOS.

Tabela 6.2.74 – Comportamento dos valores médios da função objetivo a cada geração dos casos do grupo 4.

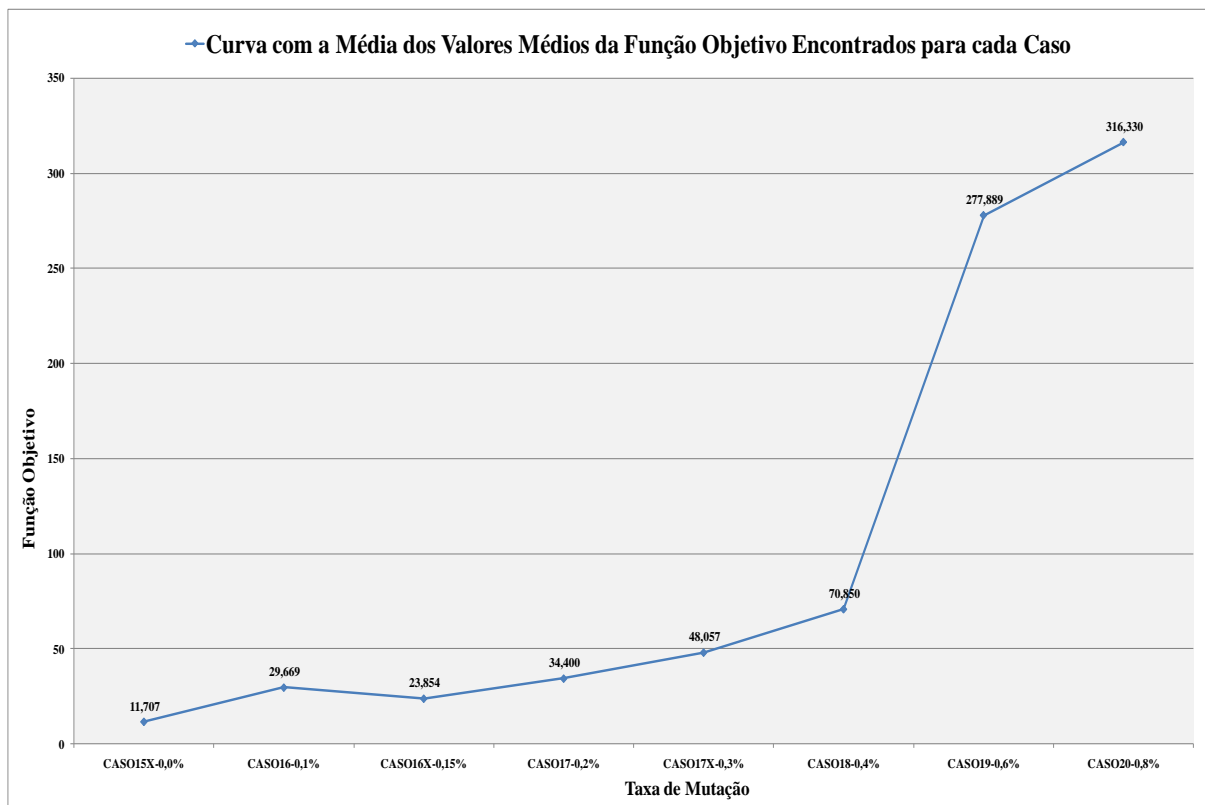


Figura 6.2.88 – Comportamento da média dos valores médios da função objetivo dos casos do grupo 4

Analisando os resultados finais da figura 6.2.88 e da tabela 6.2.74 vê-se que, o caso 16X com a taxa de mutação de 0,15% apresenta o segundo melhor desempenho, perdendo apenas para o caso 15X onde não ocorre mutação.

Porém verificando o comportamento ao longo do processamento contabiliza-se que do total de 30 gerações, o caso com a taxa de 0,15% obtém melhor desempenho em 17, em cerca de 57% delas, enquanto o caso com taxa zero de mutação é melhor em 5, aproximadamente 17% das mesmas, e o caso com taxa 0,1% é melhor em 6, correspondendo a 20% das gerações. O pequeno percentual restante, 6% das gerações, está distribuído nos demais casos.

Observando a figura 6.2.89, que compara o desempenho dos dois casos que apresentam os menores valores médios da função objetivo, vê-se que também na análise do comportamento dos valores médios da função objetivo durante as gerações, a taxa de mutação de 0,15% apresenta um melhor desempenho na maioria das gerações.

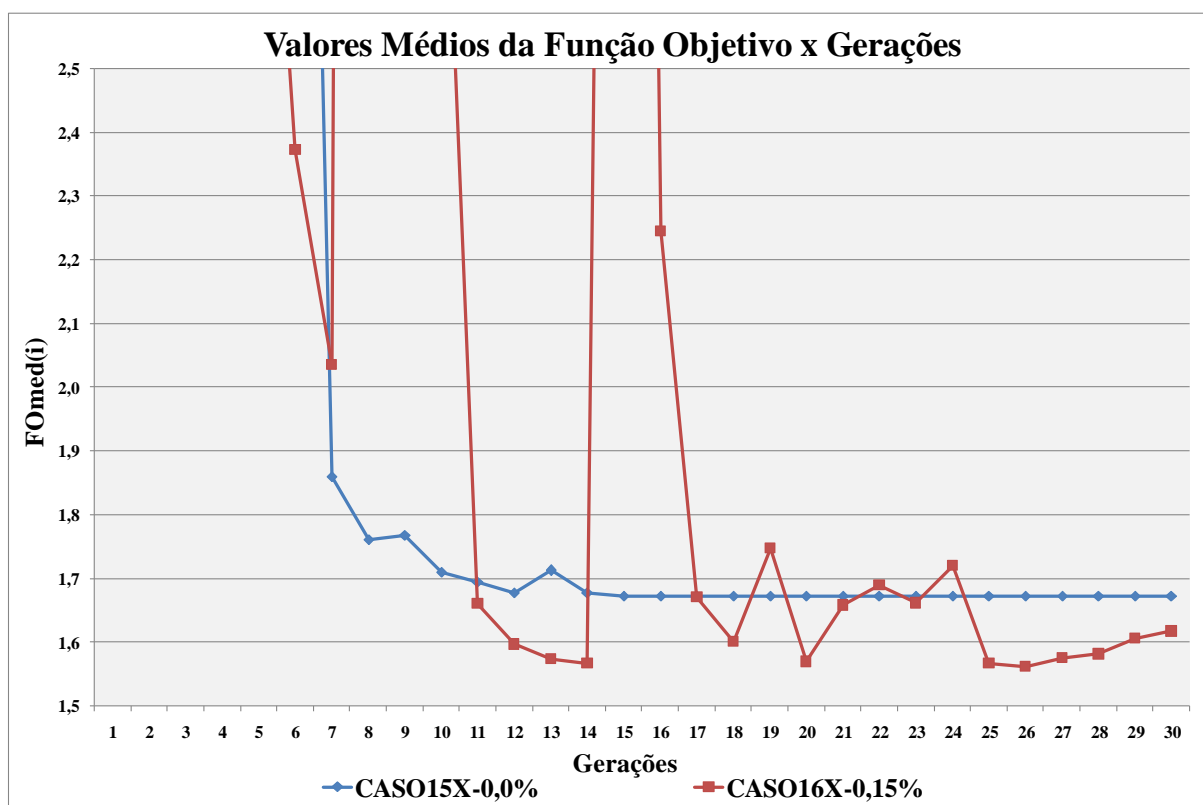


Figura 6.2.89 – Comportamento dos valores médios da função objetivo ao longo das gerações para os dois casos de melhor desempenho do grupo 4

### **6.3 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DOS RESULTADOS AOS PARÂMETROS OPCIONAIS DO AG**

Além dos quatro parâmetros básicos do AG já calibrados para o melhor desempenho, são disponibilizados no Modelo Otimizador mais três parâmetros opcionais que são:

- Adoção de Elitismo, proposto por Dejong (1975) e até agora utilizado em todos os casos dos grupos analisados.
- Coeficiente de Convergência, sugerido neste trabalho, mas não implementado até agora em nenhum dos casos.
- Tipo de Cruzamento, disponibilizado além do Clássico (com 1 ponto de corte) o tipo Uniforme para o caso do problema se comportar como AG deceptivo.

#### **6.3.1 Grupo 5 – Parâmetro Opcional em Análise Adoção de Elitismo**

Embora redundante, neste grupo são apresentados os desempenhos do AG com os parâmetros básicos calibrados (Caso 16X) sem a adoção da estratégia do elitismo e comparadas aos resultados obtidos deste caso 21, com adoção desta tática.

Novamente aqui são realizadas cinco simulações e adotada a média aritmética como resultado com o objetivo de reduzir o efeito da aleatoriedade.

• *Caso21 & Caso 16X – Resultados Comparativos*

Nº DA GERAÇÃO	CASO21	CASO21A	CASO21B	CASO21C	CASO21D	CASO21E	CASO16X	CASO16XA	CASO16XB	CASO16XC	CASO16XD	CASO16XE
1	1,756	1,625	1,757	1,911	1,787	1,699	1,642	1,791	1,718	1,491	1,511	1,698
2	1,770	1,625	1,757	1,911	1,791	1,766	1,633	1,780	1,686	1,491	1,511	1,698
3	1,782	1,625	1,819	1,911	1,791	1,766	1,633	1,780	1,686	1,491	1,511	1,698
4	1,771	1,594	1,875	1,911	1,843	1,634	1,631	1,780	1,675	1,491	1,511	1,698
5	1,766	1,625	1,870	1,911	1,843	1,580	1,627	1,760	1,675	1,491	1,511	1,698
6	1,732	1,594	1,814	1,911	1,762	1,580	1,622	1,760	1,648	1,491	1,511	1,698
7	1,759	1,594	1,814	1,911	1,843	1,634	1,619	1,760	1,648	1,491	1,511	1,685
8	1,719	1,594	1,764	1,911	1,689	1,634	1,571	1,602	1,648	1,491	1,476	1,638
9	1,718	1,594	1,764	1,911	1,689	1,634	1,571	1,602	1,648	1,491	1,476	1,638
10	1,719	1,594	1,764	1,911	1,689	1,634	1,566	1,576	1,648	1,491	1,476	1,638
11	1,695	1,594	1,646	1,911	1,689	1,634	1,566	1,576	1,648	1,491	1,476	1,638
12	1,668	1,594	1,520	1,911	1,680	1,634	1,566	1,576	1,648	1,491	1,476	1,638
13	1,668	1,594	1,520	1,911	1,680	1,634	1,566	1,576	1,648	1,491	1,476	1,638
14	1,664	1,594	1,520	1,892	1,680	1,634	1,566	1,576	1,648	1,491	1,476	1,638
15	1,664	1,594	1,520	1,892	1,680	1,634	1,566	1,576	1,648	1,491	1,476	1,638
16	1,664	1,594	1,520	1,892	1,680	1,634	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
17	1,664	1,594	1,520	1,892	1,680	1,634	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
18	1,657	1,594	1,520	1,892	1,642	1,634	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
19	1,657	1,594	1,520	1,892	1,642	1,634	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
20	1,654	1,594	1,520	1,892	1,630	1,634	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
21	1,654	1,594	1,520	1,892	1,630	1,634	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
22	1,654	1,594	1,520	1,892	1,630	1,634	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
23	1,654	1,594	1,520	1,892	1,630	1,634	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
24	1,654	1,594	1,520	1,892	1,630	1,634	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
25	1,654	1,594	1,520	1,892	1,630	1,634	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
26	1,654	1,594	1,520	1,892	1,630	1,634	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
27	1,647	1,570	1,520	1,892	1,620	1,634	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
28	1,647	1,570	1,520	1,892	1,620	1,634	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
29	1,647	1,570	1,520	1,892	1,620	1,634	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
30	1,647	1,570	1,520	1,892	1,620	1,634	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
Adoção de Elitismo - [A%]	Não						Sim					
Tempo de Processamento (min) - [B]	12,134	12,408	12,000	11,841	12,596	11,822	11,110	11,110	11,110	11,110	11,114	11,106
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,569	1,638	1,633	1,537	1,577	1,461	1,530	1,600	1,457	1,530	1,571	1,492
Geração de Localização do Melhor Elemento - [D]	15	27	12	14	17	7	10	11	6	16	8	8
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,756	1,625	1,757	1,911	1,787	1,699	1,642	1,791	1,718	1,491	1,511	1,698
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,647	1,570	1,520	1,892	1,620	1,634	1,561	1,576	1,648	1,468	1,476	1,638
Melhora no Valor da Função Objetivo [G]=[E]-[F]	0,108	0,055	0,237	0,018	0,167	0,065	0,081	0,215	0,071	0,023	0,036	0,059
Gradiente de Melhora no Valor da Função Obj. [H%]=[G]/[D]	0,84%	0,20%	1,98%	0,13%	0,98%	0,92%	0,89%	1,96%	1,18%	0,14%	0,45%	0,74%

Tabela 6.3.1 – Comparação das evoluções dos valores mínimos da função objetivo para as simulações sem e com elitismo.

A análise dos resultados apresentados na tabela 6.3.1, demonstra uma relativa proximidade de valores mínimos da função objetivo, sem elitismo (caso21 - F<sub>Omin</sub>=1,647) é 5,51% maior que com elitismo (caso16X - F<sub>Omin</sub>=1,561).

Observe-se ainda que com adoção do elitismo em média a melhor solução é localizada na décima geração enquanto sem esta opção, a melhor solução é encontrada mais tardiamente, na décima quinta iteração.

O gráfico a seguir representativo da tabela anterior demonstra claramente o porquê da necessidade de processamento de mais iterações para se encontrar a melhor solução.

Observe que nas duas gerações seguintes a primeira população gerada aleatoriamente o valor da função objetivo piora, repetindo-se também na sétima geração, pior que a sexta.

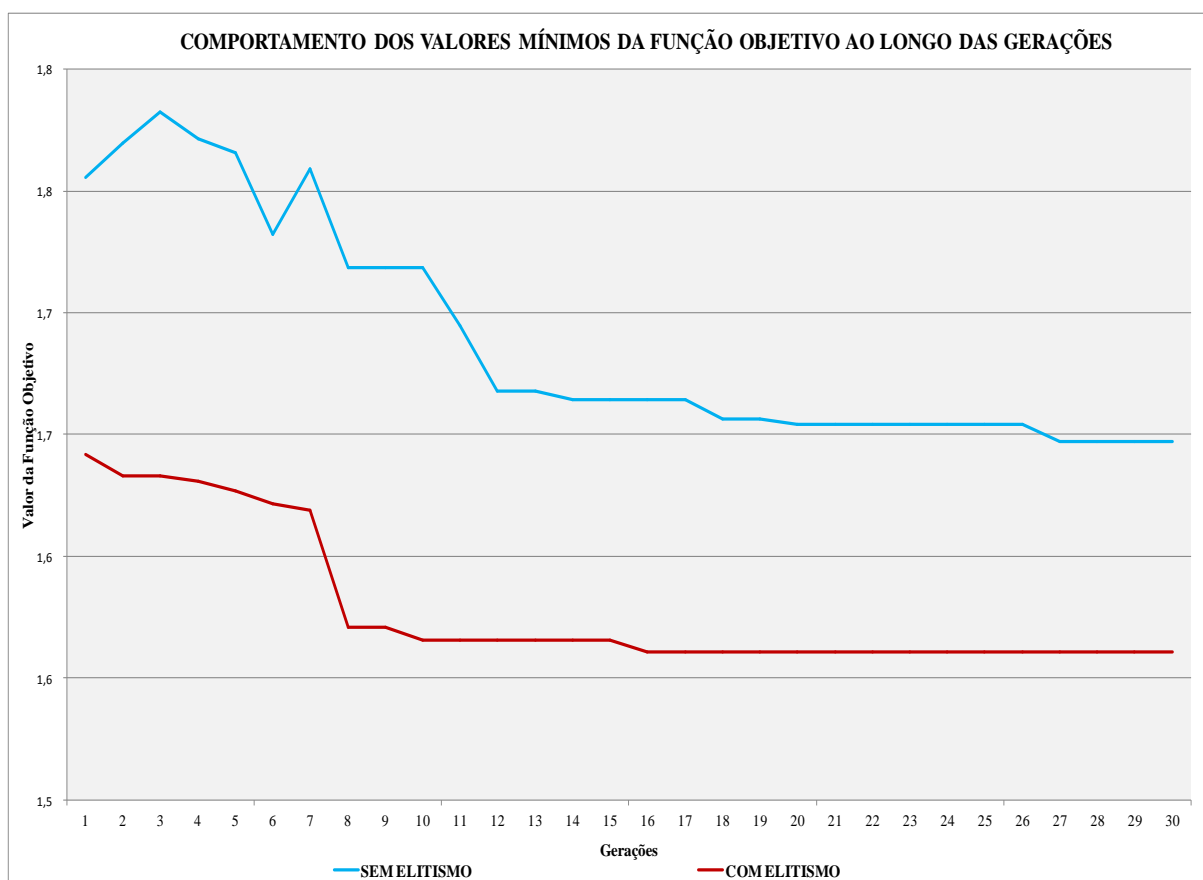


Figura 6.3.1 – Comparação dos valores mínimos da função objetivo ao longo das gerações sem, e com Elitismo.

E quanto ao que ocorre com os valores médios da função objetivo com e sem elitismo a tabela 6.3.2 e a figura 6.3.2 também demonstram a superioridade da primeira.

Nº DA GERAÇÃO	SEM ELITISMO	COM ELITISMO
1	1.550,054	95,903
2	221,349	70,071
3	81,858	474,237
4	411,761	7,675
5	5,773	3,216
6	7,314	2,373
7	4,221	2,035
8	7,094	14,388
9	23,638	4,647
10	2,614	3,029
11	1,908	1,661
12	1,803	1,596
13	3,040	1,573
14	2,173	1,566
15	1,722	6,597
16	1,714	2,245
17	1,709	1,670
18	1,806	1,601
19	1,697	1,747
20	1,899	1,569
21	1,784	1,658
22	1,912	1,689
23	2,078	1,661
24	2,358	1,720
25	1,711	1,566
26	1,674	1,562
27	1,676	1,574
28	1,656	1,581
29	1,652	1,606
30	1,652	1,617
<b>VALORES TOTAIS=</b>	2.353,300	715,633
<b>VALORES MÉDIOS=</b>	78,443	23,854

**HACHURA AZUL INDICA O MENOR DOS VALORES ENCONTRADO A CADA GERAÇÃO ENTRE OS DOIS CASOS DE MELHORES DESMPENHOS.**

Tabela 6.3.2 – Comportamento dos valores médios da função objetivo a cada geração dos casos com e sem elitismo.

Na maioria das gerações, (vinte e quatro das trinta – 80%), a opção com a adoção do elitismo foi superior, demonstrando que também analisando os valores médios da função

objetivo, ou seja, o que acontece com toda a população e não só com a solução mais apta, é bem mais vantajosa a adoção desta estratégia.

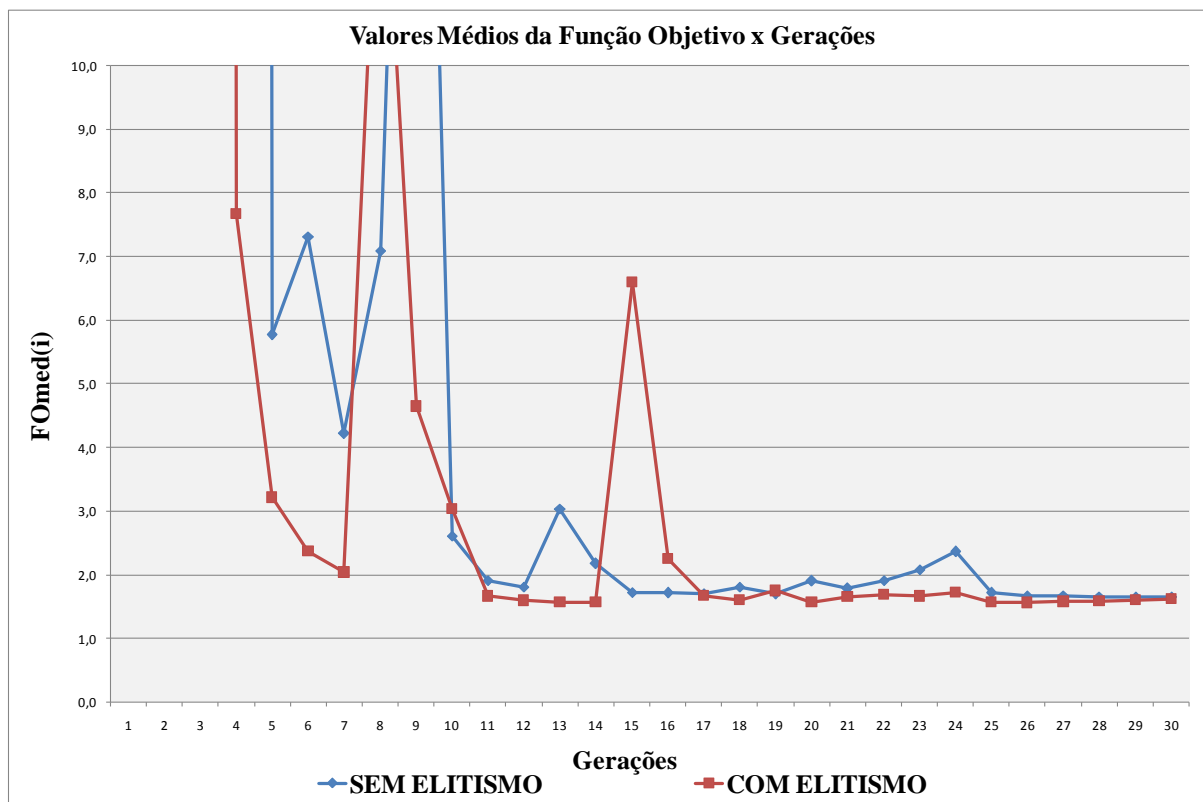


Figura 6.3.2 – Comparação dos valores mínimos da função objetivo ao longo das gerações sem, e com Elitismo.



### 6.3.2 Grupo 6 – Parâmetro Opcional em Análise Coeficiente de Convergência

Em todos os casos analisados fica bem evidenciado que durante as primeiras gerações ocorre uma rápida melhora das soluções em virtude da recombinação dos elementos que diferem entre si (boa diversidade). E que com o passar das gerações esta diversidade vai diminuindo chegando algumas vezes a apresentar uma convergência extrema em que todos os elementos da população são semelhantes cromossomicamente.

A partir deste ponto, qualquer que seja o cruzamento de pais semelhantes gera filhos iguais aos pais, passando o AG a contar somente com o operador mutação para através de pequenas perturbações melhorar o valor da solução.

Pensando neste problema, este trabalho sugere um parâmetro opcional definido como *coeficiente de convergência* na equação (5.1), com a finalidade de recuperar a diversidade dos cromossomos na população, sempre que o valor mínimo admissível para o mesmo for atingido.

O procedimento é simples consistindo em originar aleatoriamente a população da geração consecutiva à que teve este valor mínimo admissível atingido, mantendo a solução mais apta até então dentro desta população gerada (*Elitismo*).

Ou seja, quando parte das soluções de uma população convergirem para um mesmo valor (ótimo local), este dispositivo para recuperação da diversidade dos cromossomos pode ser acionado. Para tanto o valor mínimo admissível para o coeficiente de convergência configurado no formulário de entrada deve ser diferente de zero por cento ( $Coef_{Conv} \neq 0\%$ ).

Para esta análise configuramos o AG com os parâmetros básicos de melhor desempenho conforme tabela 6.3.3 variando o parâmetro opcional mínimo coeficiente de convergência admissível.

Os limites de variação do parâmetro analisado vão desde o valor percentual de zero, significando a não utilização desta estratégia, até 20%, valor este observado nos casos já

analisados que demarca o início da perda da eficiência na melhora das soluções pela recombinação e conseqüente dependência maior da mutação.

Casos	Coef. Conv. Adm. (%)	Tamanho da População de Soluções	Núm. de Gerações	Prob. Crossover (%)	Prob. Mutação (%)	Adoção de Elitismo?	Tipo de Cruz.	Adoção de Crit. Parada Antecipada?
22	0,00	30	50	100	0,15	Sim	Clássico (1pt de corte)	Não
23	2,50							
24	5,00							
25	10,00							
26	20,00							

Tabela 6.3.3 – Parâmetros adotados do AG para o grupo 6.

Observe na tabela 6.3.3, que o número de gerações de 50 é superior ao valor encontrado deste parâmetro para o melhor desempenho, de 30. O objetivo deste incremento foi possibilitar a observação do comportamento do AG para os vários coeficientes de convergência admitidos por um número maior de gerações.

• *Caso 22 – Resultados*

ITER\TUBOS	FOmin(i)	FOmed(i)	FOmax(i)	Coef.Conv.
1	1,922	29,406	247,397	93,5%
2	1,828	27,263	579,010	93,3%
3	1,828	152,979	2.704,289	98,8%
4	1,828	3,953	8,792	53,7%
5	1,828	111,465	3.212,377	98,4%
6	1,824	11,039	120,573	83,5%
7	1,824	7,032	86,573	74,1%
8	1,719	2,672	5,977	35,7%
9	1,719	2,056	2,819	16,4%
10	1,644	1,888	2,572	12,9%
11	1,644	1,962	2,603	16,2%
12	1,632	1,779	2,178	8,3%
13	1,632	1,817	2,716	10,2%
14	1,571	1,642	1,724	4,4%
15	1,571	1,730	1,965	9,2%
16	1,571	1,636	1,965	4,0%
17	1,571	1,589	1,632	1,1%
18	1,571	2,369	8,914	33,7%
19	1,571	1,626	1,871	3,4%
20	1,571	1,580	1,791	0,6%
21	1,571	73,211	359,554	97,9%
22	1,571	1,583	1,692	0,8%
23	1,571	1,571	1,571	0,0%
24	1,571	1,622	2,008	3,2%
25	1,571	1,573	1,605	0,1%
26	1,571	1,571	1,571	0,0%
27	1,571	1,578	1,790	0,5%
28	1,571	1,571	1,571	0,0%
29	1,571	1,907	2,964	17,7%
30	1,571	1,622	2,964	3,2%
31	1,571	1,571	1,571	0,0%
32	1,571	1,800	2,949	12,8%
33	1,571	1,571	1,571	0,0%
34	1,571	1,765	3,027	11,0%
35	1,571	1,692	3,027	7,2%
36	1,571	1,604	1,770	2,1%
37	1,571	1,571	1,571	0,0%
38	1,571	1,702	2,331	7,7%
39	1,571	1,601	2,331	1,9%
40	1,530	1,785	2,949	14,3%
41	1,530	1,573	1,667	2,7%
42	1,530	1,561	1,585	2,0%
43	1,530	1,556	1,571	1,7%
44	1,530	1,544	1,571	0,9%
45	1,530	1,535	1,571	0,4%
46	1,530	1,627	2,254	5,9%
47	1,530	1,530	1,532	0,0%
48	1,530	1,530	1,530	0,0%
49	1,530	1,530	1,530	0,0%
50	1,530	2,127	8,841	28,1%
<b>VALORES TOTAIS=</b>	46,671	120,580	424,035	221,7%
<b>VALORES MÉDIOS=</b>	1,556	4,019	14,135	7,4%

Tabela 6.3.4 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 22.

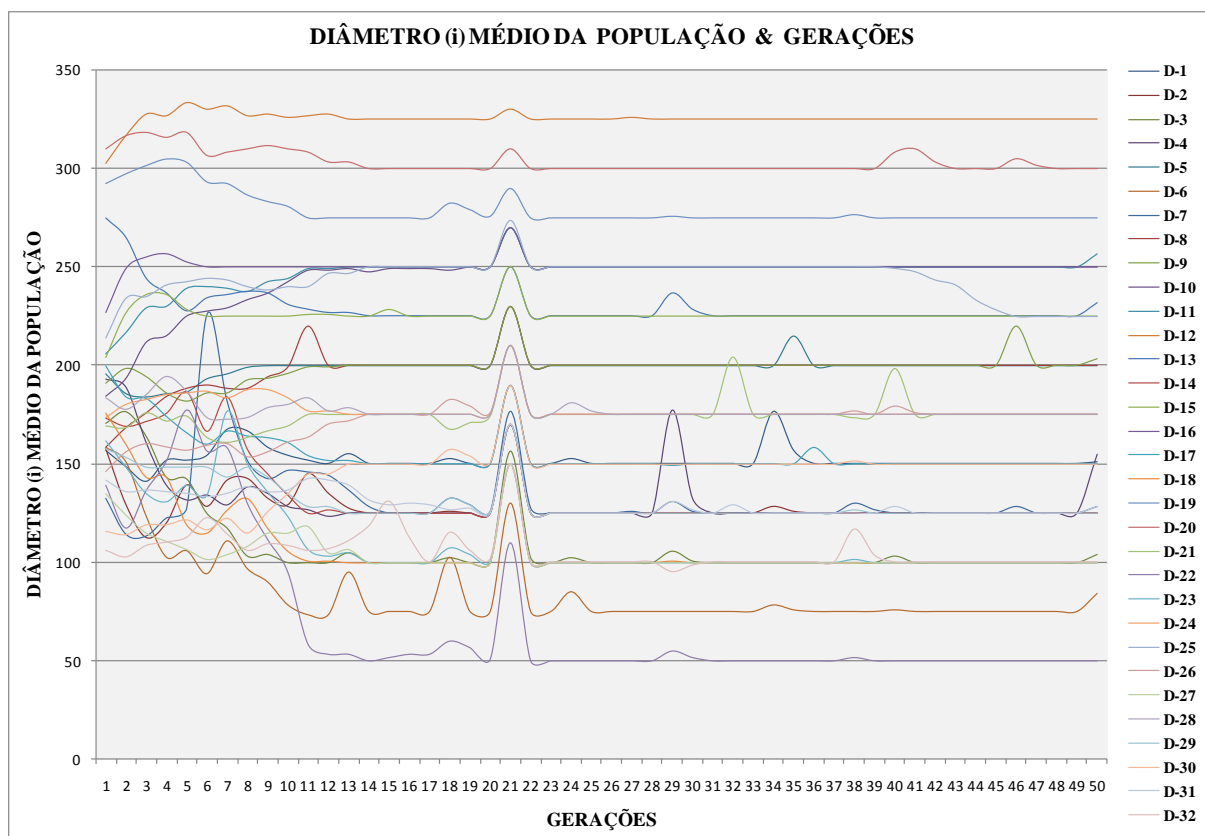


Figura 6.3.3 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 22.

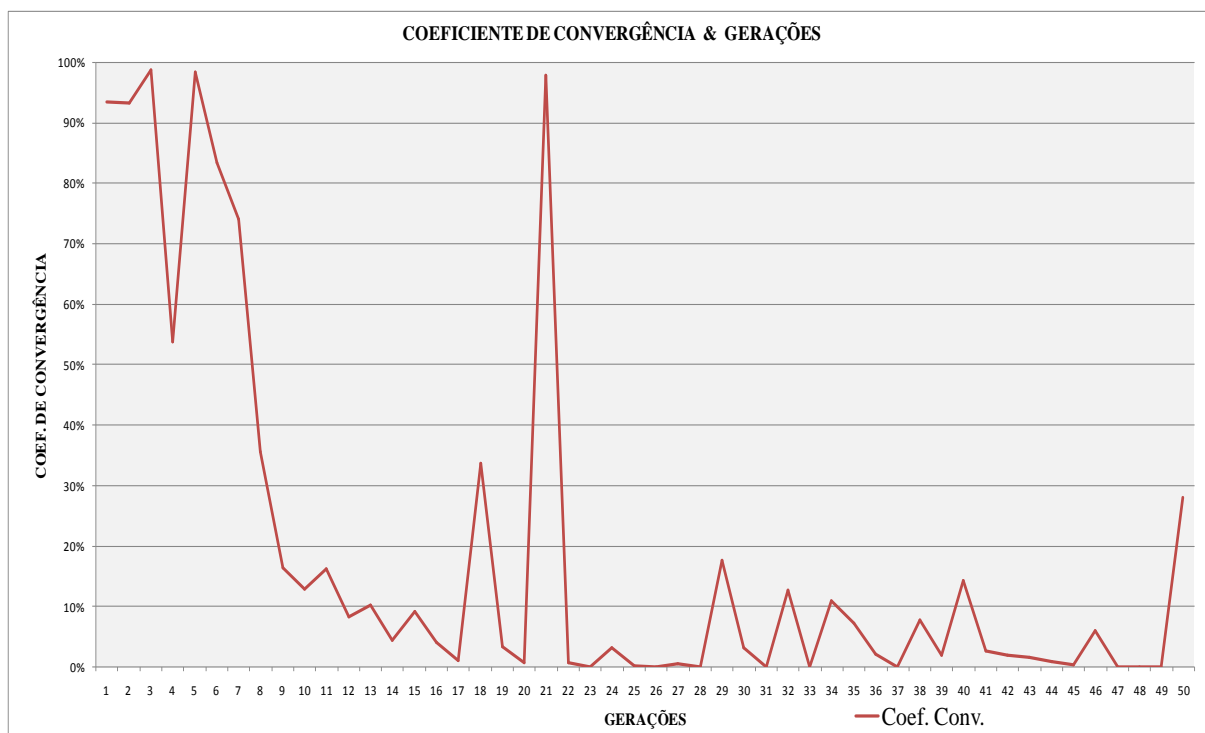


Figura 6.3.4 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 22.

• *Caso 23 – Resultados*

ITER/TUBOS	F0min(i)	F0med(i)	F0max(i)	Coef.Conv.
1	1,712	148,395	3.035,541	98,8%
2	1,712	9,059	108,276	81,1%
3	1,712	13,412	202,000	87,2%
4	1,712	7,781	123,470	78,0%
5	1,712	23,040	278,919	92,6%
6	1,696	7,764	160,452	78,2%
7	1,678	2,137	3,572	21,5%
8	1,652	1,923	3,382	14,1%
9	1,644	1,932	7,026	14,9%
10	1,632	1,711	2,063	4,6%
11	1,632	1,661	1,712	1,8%
12	1,632	91,984	2.088,236	98,2%
13	1,632	13,952	119,557	88,3%
14	1,632	529,726	15.515,895	99,7%
15	1,629	47.565,981	1.425.013,302	100,0%
16	1,602	2,063	3,865	22,4%
17	1,567	1,768	2,864	11,4%
18	1,567	1,677	2,014	6,6%
19	1,567	1,660	2,150	5,6%
20	1,567	1,626	1,947	3,6%
21	1,567	1,592	1,732	1,6%
22	1,523	47,990	802,947	96,8%
23	1,523	552,255	16.423,036	99,7%
24	1,523	3,806	26,481	60,0%
25	1,523	2,864	11,460	46,8%
26	1,523	2,411	10,197	36,8%
27	1,523	1,881	3,103	19,0%
28	1,523	1,641	2,427	7,2%
29	1,523	1,529	1,598	0,4%
30	1,523	28,984	297,039	94,7%
31	1,523	4,642	19,091	67,2%
32	1,523	8,578	62,167	82,2%
33	1,503	17,448	452,943	91,4%
34	1,503	2,127	4,022	29,3%
35	1,503	2,898	27,213	48,1%
36	1,503	2,323	19,701	35,3%
37	1,503	1,727	3,172	13,0%
38	1,503	3,174	23,833	52,6%
39	1,503	1,711	3,525	12,2%
40	1,503	1,563	2,425	3,9%
41	1,503	1,504	1,523	0,0%
42	1,503	63,945	696,905	97,6%
43	1,503	36,436	609,870	95,9%
44	1,503	4,144	52,957	63,7%
45	1,503	2,267	7,192	33,7%
46	1,503	1,797	2,975	16,4%
47	1,503	5,576	119,724	73,0%
48	1,503	1,689	4,545	11,0%
49	1,503	3,931	37,329	61,8%
50	1,503	1,509	1,560	0,4%
<b>VALORES TOTAIS=</b>	45,375	813,940	19.732,688	1351,9%
<b>VALORES MÉDIOS=</b>	1,513	27,131	657,756	45,1%

Tabela 6.3.5 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 23.

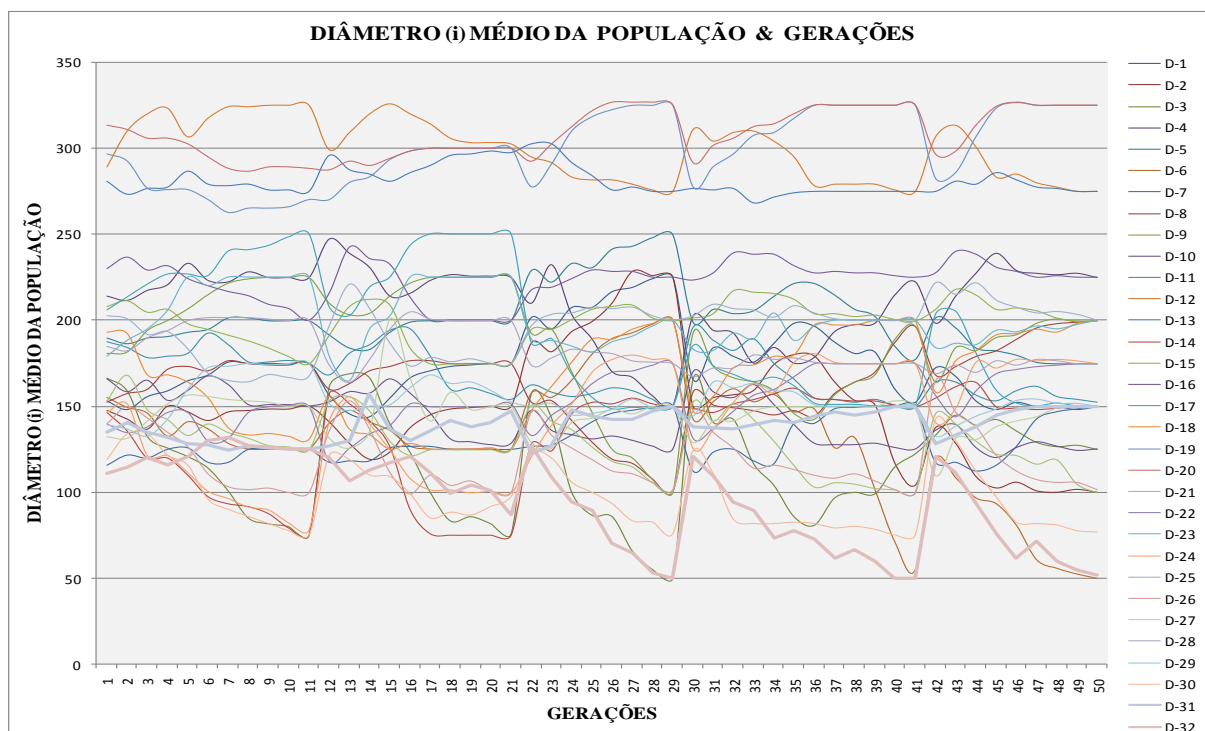


Figura 6.3.5 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 23.

A figura 6.3.5 demonstra as quatro iterações (12, 22, 30, 42) cujas populações são geradas aleatórias, percebidas através de “nódulos” onde as linhas estão mais próximas, para em seguida se afastarem e estabilizarem até a próxima geração que também tem a sua população randomicamente obtida.

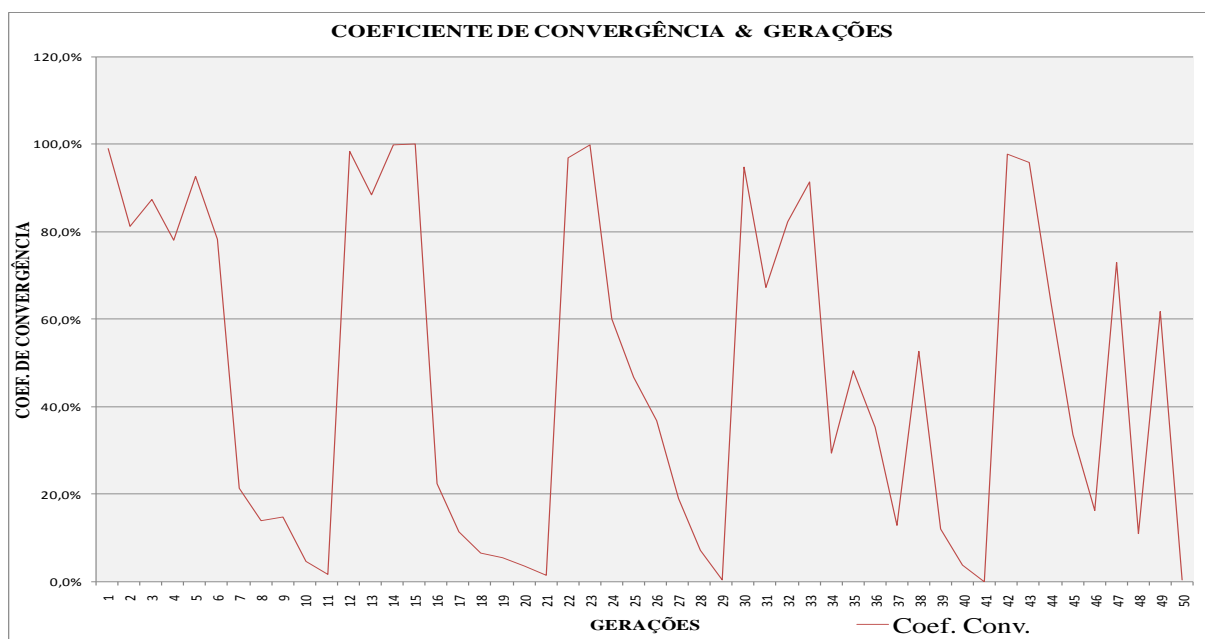


Figura 6.3.6 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do caso 23.

• *Caso 24 – Resultados*

ITER\TUBOS	FOmin(i)	FOmed(i)	FOmax(i)	Coef.Conv.
1	1,652	30,016	223,486	94,5%
2	1,608	9,523	56,057	83,1%
3	1,575	4,425	21,884	64,4%
4	1,535	2,445	6,634	37,2%
5	1,535	2,050	4,027	25,1%
6	1,517	1,721	2,169	11,8%
7	1,517	1,610	2,028	5,8%
8	1,517	1,672	2,307	9,3%
9	1,517	1,552	1,946	2,3%
10	1,517	240,375	5.656,573	99,4%
11	1,482	42,859	1.028,982	96,5%
12	1,482	5,705	34,634	74,0%
13	1,482	5,170	27,208	71,3%
14	1,482	3,628	19,373	59,2%
15	1,482	1,928	4,338	23,1%
16	1,482	1,564	1,904	5,2%
17	1,482	1,498	1,730	1,1%
18	1,482	32,039	396,043	95,4%
19	1,482	4.844,785	135.436,283	100,0%
20	1,482	6,746	60,594	78,0%
21	1,471	1,815	3,919	19,0%
22	1,471	1,883	6,710	21,9%
23	1,471	2,042	5,201	28,0%
24	1,471	3,559	61,617	58,7%
25	1,471	1,806	3,983	18,6%
26	1,471	1,552	2,374	5,2%
27	1,471	1,476	1,534	0,3%
28	1,471	92,326	1.780,999	98,4%
29	1,471	8,217	67,437	82,1%
30	1,471	7,810	86,026	81,2%
31	1,471	2,811	8,647	47,7%
32	1,471	2,332	6,151	36,9%
33	1,471	1,673	2,137	12,1%
34	1,471	1,651	2,054	10,9%
35	1,468	1,664	3,395	11,7%
36	1,468	3,820	69,050	61,6%
37	1,468	1,521	1,864	3,5%
38	1,468	464,574	10.995,868	99,7%
39	1,468	2.649,975	79.282,045	99,9%
40	1,468	6,157	39,220	76,1%
41	1,468	3,172	15,143	53,7%
42	1,468	3,218	24,937	54,4%
43	1,468	1,739	3,539	15,6%
44	1,468	1,528	1,673	3,9%
45	1,468	21,034	136,525	93,0%
46	1,468	33,578	320,963	95,6%
47	1,468	74,619	2.128,746	98,0%
48	1,468	9,318	114,484	84,2%
49	1,468	1,610	2,255	8,8%
50	1,468	1,555	2,076	5,5%
<b>VALORES TOTAIS=</b>	44,091	3.410,037	95.180,572	1386,1%
<b>VALORES MÉDIOS=</b>	1,470	113,668	3.172,686	46,2%

Tabela 6.3.6 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 24.

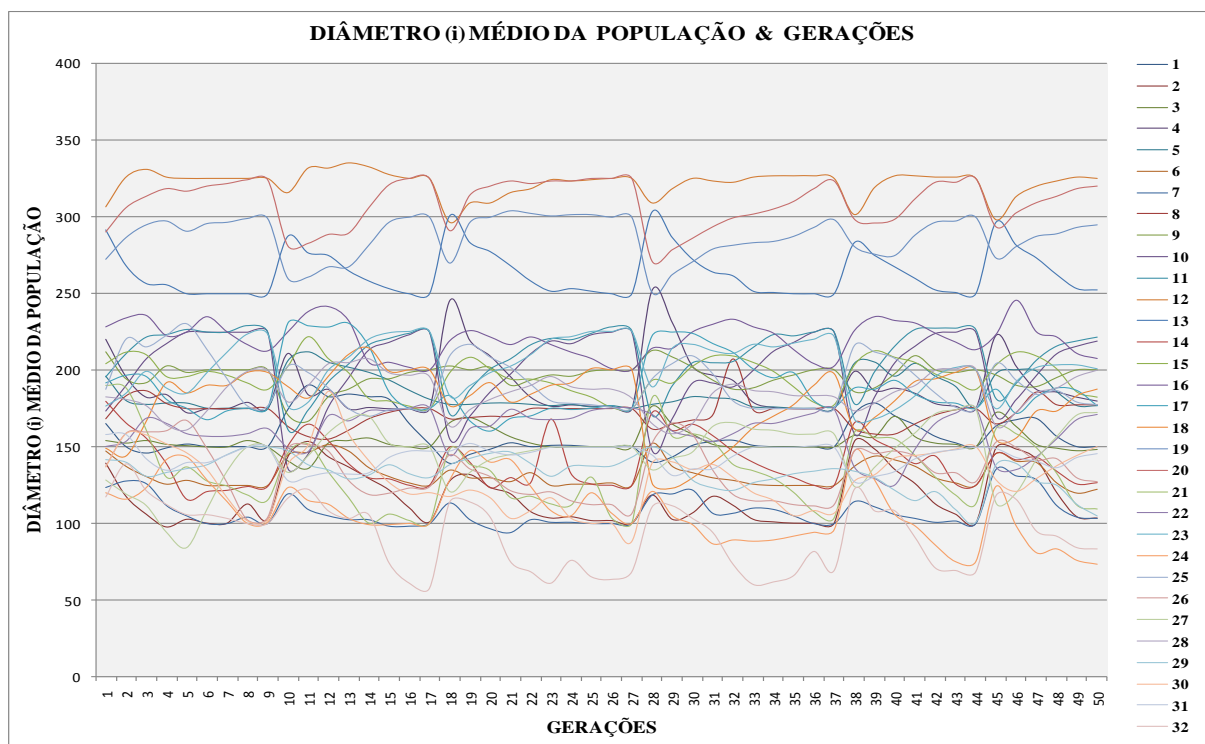


Figura 6.3.7 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 24.

A figura 6.3.7 representa este caso proporciona cinco iterações (10, 18, 28, 38 e 45) cujas populações são geradas aleatórias.

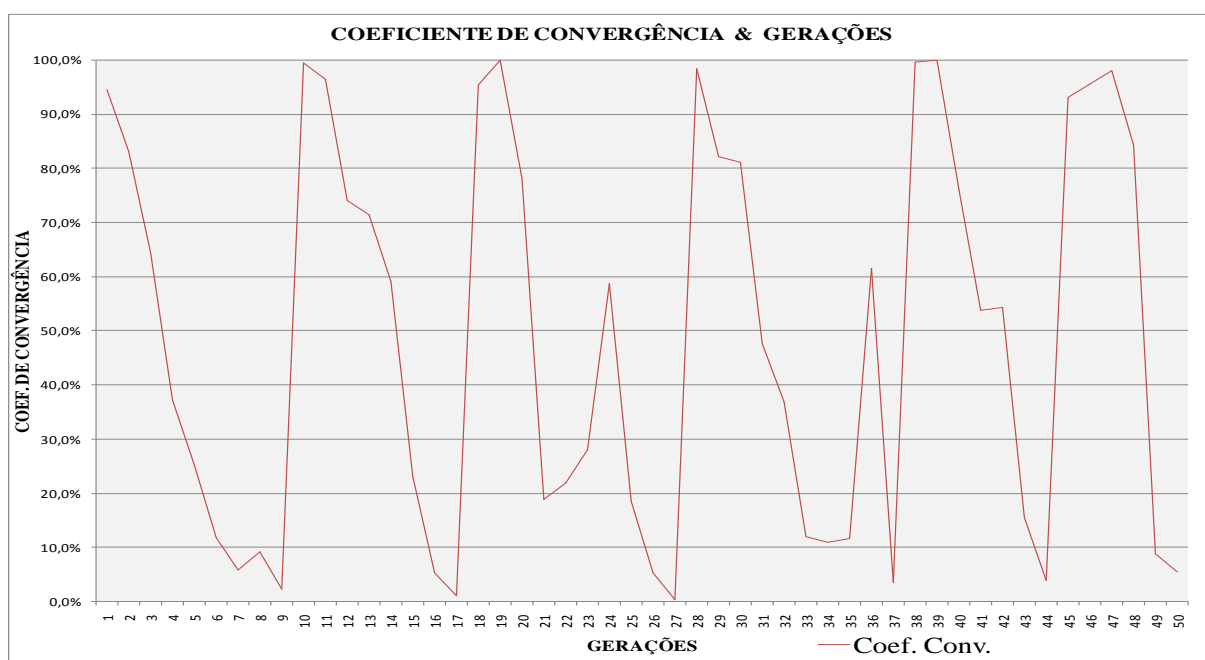


Figura 6.3.8 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 24.



• *Caso 25 – Resultados*

ITER\TUBOS	F0min(i)	F0med(i)	F0max(i)	Coef.Conv.
1	1,936	189,402	4.128,685	99,0%
2	1,936	126,781	2.142,275	98,5%
3	1,908	8,362	79,036	77,2%
4	1,908	14,597	245,240	86,9%
5	1,894	17,268	413,921	89,0%
6	1,842	2,521	5,113	26,9%
7	1,803	2,373	5,175	24,0%
8	1,779	72,091	2.079,729	97,5%
9	1,779	2,324	4,527	23,5%
10	1,779	3,518	50,185	49,4%
11	1,779	1,887	2,657	5,8%
12	1,779	166,676	4.347,224	98,9%
13	1,550	576,327	16.937,851	99,7%
14	1,550	3,036	17,365	48,9%
15	1,550	51,387	1.289,452	97,0%
16	1,550	3,243	18,162	52,2%
17	1,550	2,704	11,000	42,7%
18	1,550	1,740	2,619	10,9%
19	1,550	1,576	1,871	1,6%
20	1,550	1.329,932	39.260,528	99,9%
21	1,550	132,972	2.425,118	98,8%
22	1,550	3,694	18,147	58,0%
23	1,531	9,845	167,669	84,4%
24	1,531	2,175	5,512	29,6%
25	1,531	2,534	4,826	39,6%
26	1,531	2,073	5,843	26,1%
27	1,524	1,683	2,277	9,4%
28	1,524	15,945	116,404	90,4%
29	1,494	5,096	25,965	70,7%
30	1,494	10,251	74,404	85,4%
31	1,494	2.514,103	74.842,417	99,9%
32	1,494	17,964	439,516	91,7%
33	1,494	2,662	13,136	43,9%
34	1,494	2,546	9,601	41,3%
35	1,494	1,703	3,302	12,3%
36	1,494	1,612	1,857	7,3%
37	1,494	39,719	749,831	96,2%
38	1,494	8,266	56,755	81,9%
39	1,427	3,761	25,247	62,1%
40	1,427	422.218,138	12.666.482,206	100,0%
41	1,427	1,696	3,205	15,9%
42	1,427	1,514	1,682	5,8%
43	1,427	26,994	204,848	94,7%
44	1,427	21,055	202,118	93,2%
45	1,427	12,614	128,483	88,7%
46	1,427	3,253	19,205	56,2%
47	1,427	3,331	44,012	57,2%
48	1,427	2,144	18,099	33,5%
49	1,427	1,491	1,754	4,3%
50	1,427	1.080,895	31.361,502	99,9%
<b>VALORES TOTAIS=</b>	44,335	426.151,730	12.777.454,940	1778,5%
<b>VALORES MÉDIOS=</b>	1,478	14.205,058	425.915,165	59,3%

Tabela 6.3.7 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 25.

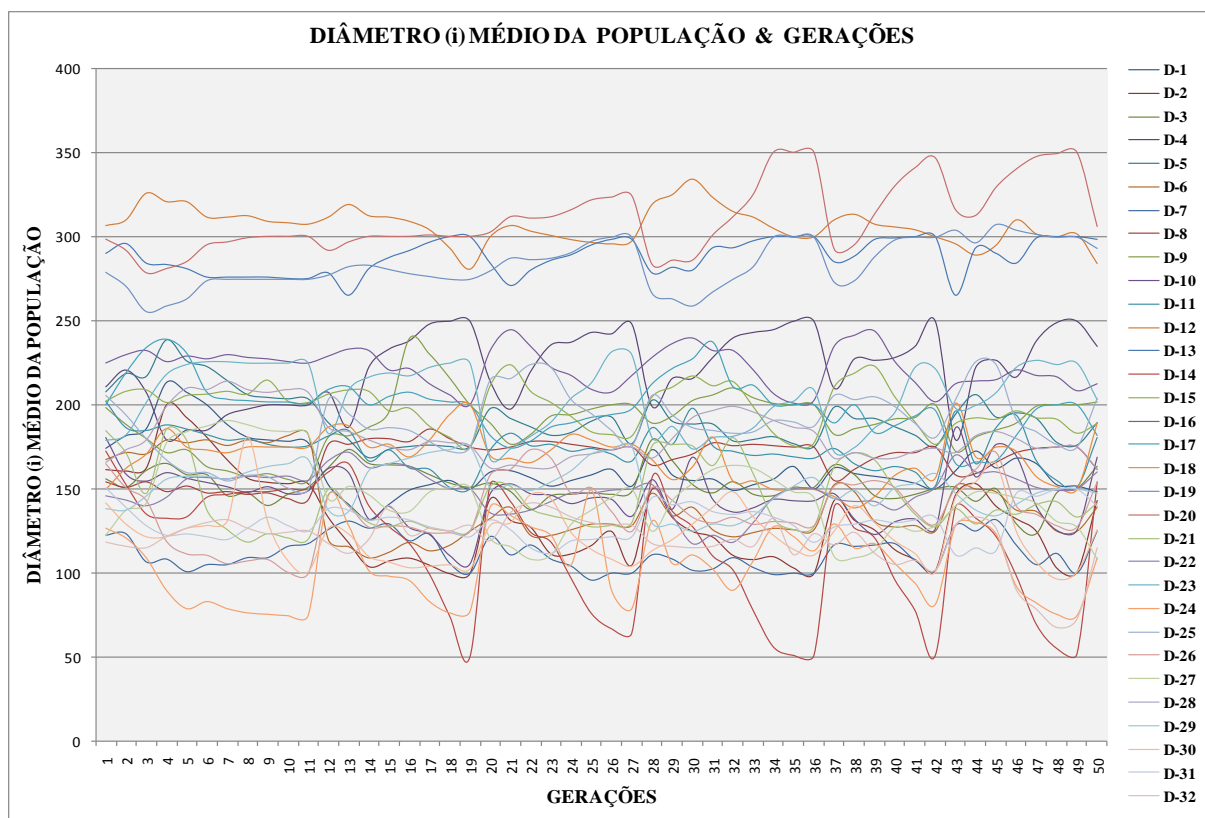


Figura 6.3.9 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 25.

Este caso apresenta gráfico, mostrado na figura 6.3.9, com seis iterações (12, 20, 28, 37, 43 e 50) cujas populações são geradas aleatórias.

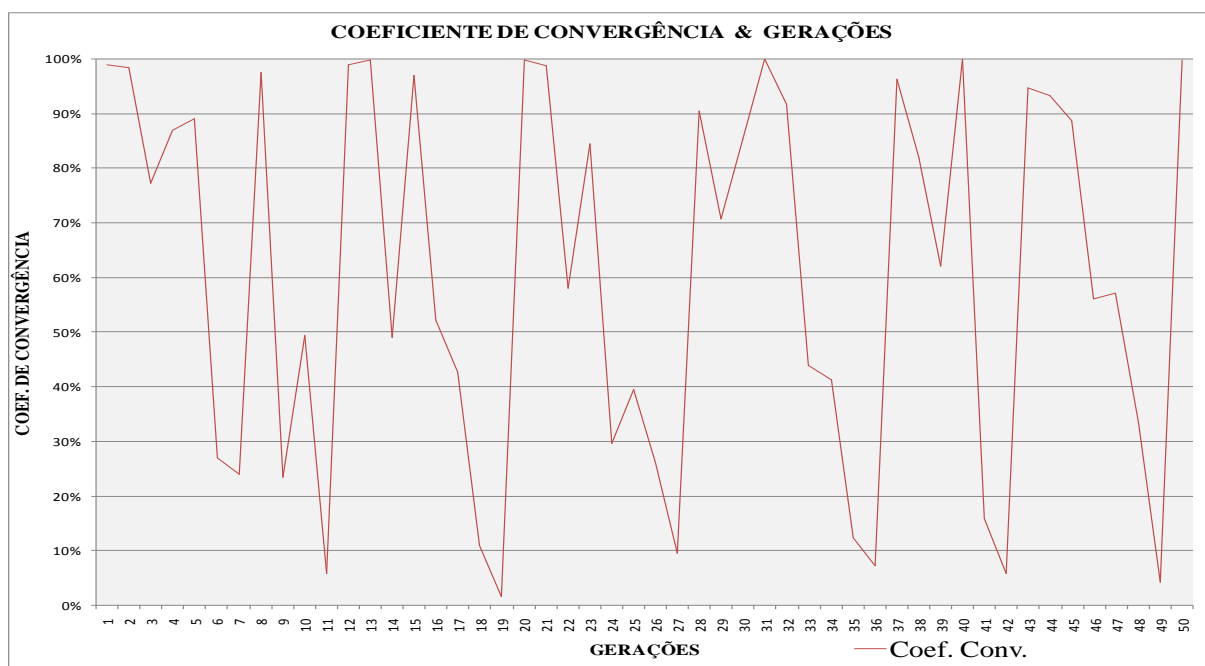


Figura 6.3.10 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 25.

• *Caso 26 – Resultados*

ITER\TUBOS	F0min(i)	F0med(i)	F0max(i)	Coef.Conv.
1	1,962	501,840	14.592,439	99,6%
2	1,900	35,492	601,100	94,6%
3	1,900	45,266	772,700	95,8%
4	1,900	3,794	14,938	49,9%
5	1,900	15,456	292,891	87,7%
6	1,867	2,219	4,915	15,9%
7	1,595	388,969	11.370,605	99,6%
8	1,595	132,339	3.759,857	98,8%
9	1,556	195,010	4.897,631	99,2%
10	1,556	2,765	16,545	43,7%
11	1,504	1.613,233	48.156,883	99,9%
12	1,504	2,380	7,689	36,8%
13	1,504	1,837	4,535	18,1%
14	1,504	127.412,068	3.820.951,531	100,0%
15	1,504	70,308	1.813,680	97,9%
16	1,504	47,316	948,470	96,8%
17	1,504	6,250	85,330	75,9%
18	1,504	2,726	20,218	44,8%
19	1,504	1,914	2,963	21,4%
20	1,504	1,694	3,891	11,2%
21	1,504	2.037,771	58.793,407	99,9%
22	1,504	26,795	359,554	94,4%
23	1,504	8,814	123,030	82,9%
24	1,504	2,185	4,675	31,2%
25	1,504	3,462	40,588	56,6%
26	1,504	7,875	184,659	80,9%
27	1,475	2,214	14,623	33,4%
28	1,458	1,923	8,577	24,2%
29	1,458	2,010	10,975	27,5%
30	1,397	1,514	1,757	7,7%
31	1,397	227,781	4.479,863	99,4%
32	1,397	1.258,516	37.088,050	99,9%
33	1,397	67,676	1.261,781	97,9%
34	1,397	12,801	298,361	89,1%
35	1,397	1,895	3,089	26,3%
36	1,397	1,869	2,892	25,3%
37	1,397	1,612	3,023	13,3%
38	1,397	2.822,705	83.794,043	100,0%
39	1,397	4,441	21,719	68,6%
40	1,397	3,220	10,871	56,6%
41	1,397	2,482	7,373	43,7%
42	1,397	2,061	4,490	32,2%
43	1,397	1,710	2,969	18,3%
44	1,397	8.366,626	250.698,864	100,0%
45	1,397	4,523	37,966	69,1%
46	1,397	4,843	85,407	71,2%
47	1,397	1,746	2,251	20,0%
48	1,397	1,663	2,263	16,0%
49	1,397	548,579	10.691,845	99,7%
50	1,397	523,092	15.446,122	99,7%
<b>VALORES TOTAIS=</b>	42,742	15.954,404	463.485,091	1785,1%
<b>VALORES MÉDIOS=</b>	1,425	531,813	15.449,503	59,5%

Tabela 6.3.8 – Valores (mín., méd. e Max.) da função objetivo a cada geração do Caso 26.

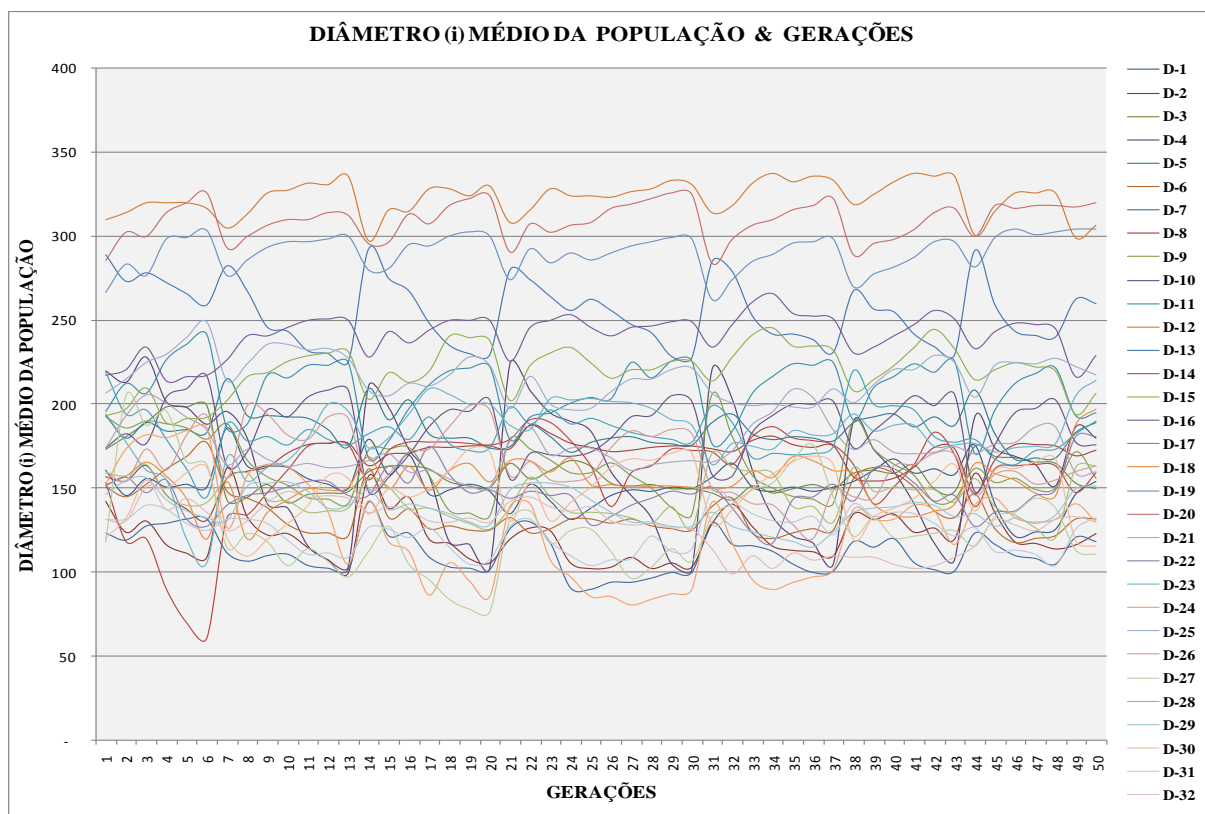


Figura 6.3.11 – Comportamento das médias dos respectivos diâmetros ao longo das gerações do Caso 26.

Este último caso apresenta gráfico, mostrado na figura 6.3.11, com sete iterações (7, 14, 21, 31, 38, 44 e 49) cujas populações são geradas aleatórias.

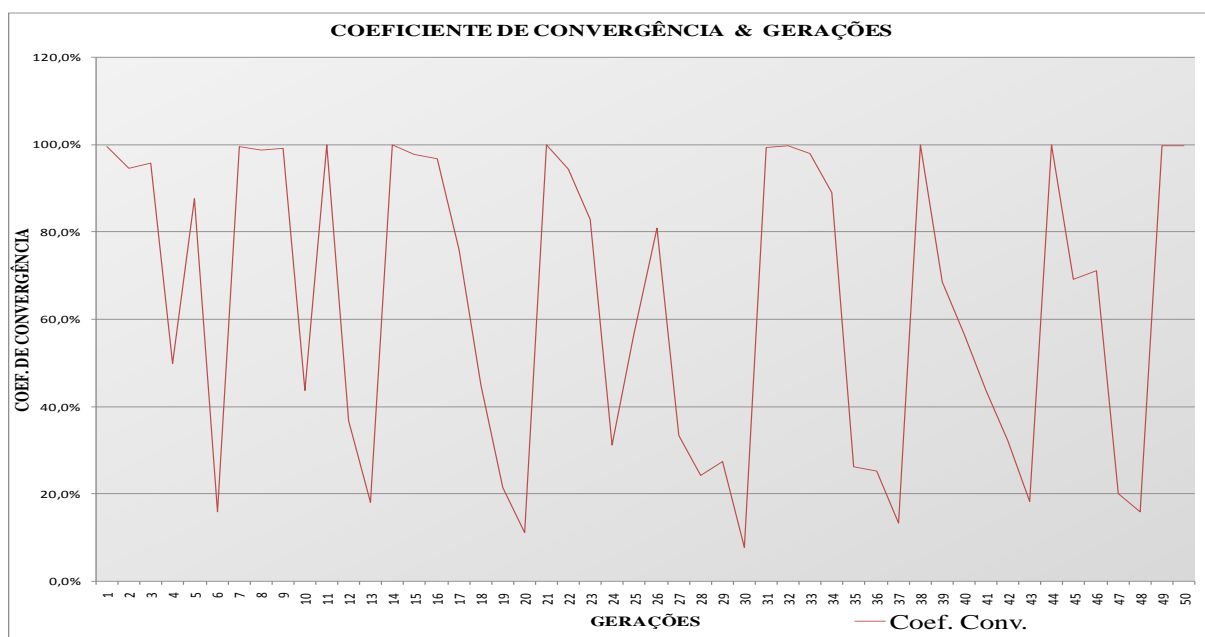


Figura 6.3.12 – Comportamento do Coeficiente de Convergência ao longo das gerações do Caso 26.

• *Síntese Analítica do Grupo 6*

Nº DA GERAÇÃO	CASO22-CC=0,0%	CASO23-CC=2,5%	CASO24-CC=5,0%	CASO25-CC=10,0%	CASO26-CC=20,0%
1	1,922	1,712	1,652	1,936	1,962
2	1,828	1,712	1,608	1,936	1,900
3	1,828	1,712	1,575	1,908	1,900
4	1,828	1,712	1,535	1,908	1,900
5	1,828	1,712	1,535	1,894	1,900
6	1,824	1,696	1,517	1,842	1,867
7	1,824	1,678	1,517	1,803	1,595
8	1,719	1,652	1,517	1,779	1,595
9	1,719	1,644	1,517	1,779	1,556
10	1,644	1,632	1,517	1,779	1,556
11	1,644	1,632	1,482	1,779	1,504
12	1,632	1,632	1,482	1,779	1,504
13	1,632	1,632	1,482	1,550	1,504
14	1,571	1,632	1,482	1,550	1,504
15	1,571	1,629	1,482	1,550	1,504
16	1,571	1,602	1,482	1,550	1,504
17	1,571	1,567	1,482	1,550	1,504
18	1,571	1,567	1,482	1,550	1,504
19	1,571	1,567	1,482	1,550	1,504
20	1,571	1,567	1,482	1,550	1,504
21	1,571	1,567	1,471	1,550	1,504
22	1,571	1,523	1,471	1,550	1,504
23	1,571	1,523	1,471	1,531	1,504
24	1,571	1,523	1,471	1,531	1,504
25	1,571	1,523	1,471	1,531	1,504
26	1,571	1,523	1,471	1,531	1,504
27	1,571	1,523	1,471	1,524	1,475
28	1,571	1,523	1,471	1,524	1,458
29	1,571	1,523	1,471	1,494	1,458
30	1,571	1,523	1,471	1,494	1,397
31	1,571	1,523	1,471	1,494	1,397
32	1,571	1,523	1,471	1,494	1,397
33	1,571	1,503	1,471	1,494	1,397
34	1,571	1,503	1,471	1,494	1,397
35	1,571	1,503	1,468	1,494	1,397
36	1,571	1,503	1,468	1,494	1,397
37	1,571	1,503	1,468	1,494	1,397
38	1,571	1,503	1,468	1,494	1,397
39	1,571	1,503	1,468	1,427	1,397
40	1,530	1,503	1,468	1,427	1,397
41	1,530	1,503	1,468	1,427	1,397
42	1,530	1,503	1,468	1,427	1,397
43	1,530	1,503	1,468	1,427	1,397
44	1,530	1,503	1,468	1,427	1,397
45	1,530	1,503	1,468	1,427	1,397
46	1,530	1,503	1,468	1,427	1,397
47	1,530	1,503	1,468	1,427	1,397
48	1,530	1,503	1,468	1,427	1,397
49	1,530	1,503	1,468	1,427	1,397
50	1,530	1,503	1,468	1,427	1,397
Coefficiente de Convergência Mínimo Admissível - [A %]	0,0%	2,5%	5,00%	10,0%	20,0%
Tempo de Processamento (min) - [B]	24,833	28,331	28,235	28,141	28,618
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	2,587	3,110	3,081	3,253	3,258
Geração de Localização do Melhor Elemento - [D]	40	33	35	39	30
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,922	1,712	1,652	1,936	1,962
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,530	1,503	1,468	1,427	1,397
Melhora no Valor da Função Objetivo [G]=[E]-[F]	0,392	0,209	0,183	0,509	0,566
Gradiente de Melhora no Valor da Função Obj. [H]=[G]/[D]	0,98%	0,63%	0,52%	1,31%	1,89%

Tabela 6.3.9 – Análise dos parâmetros relativos à melhor solução encontrada ao longo das gerações dos casos do grupo 6.

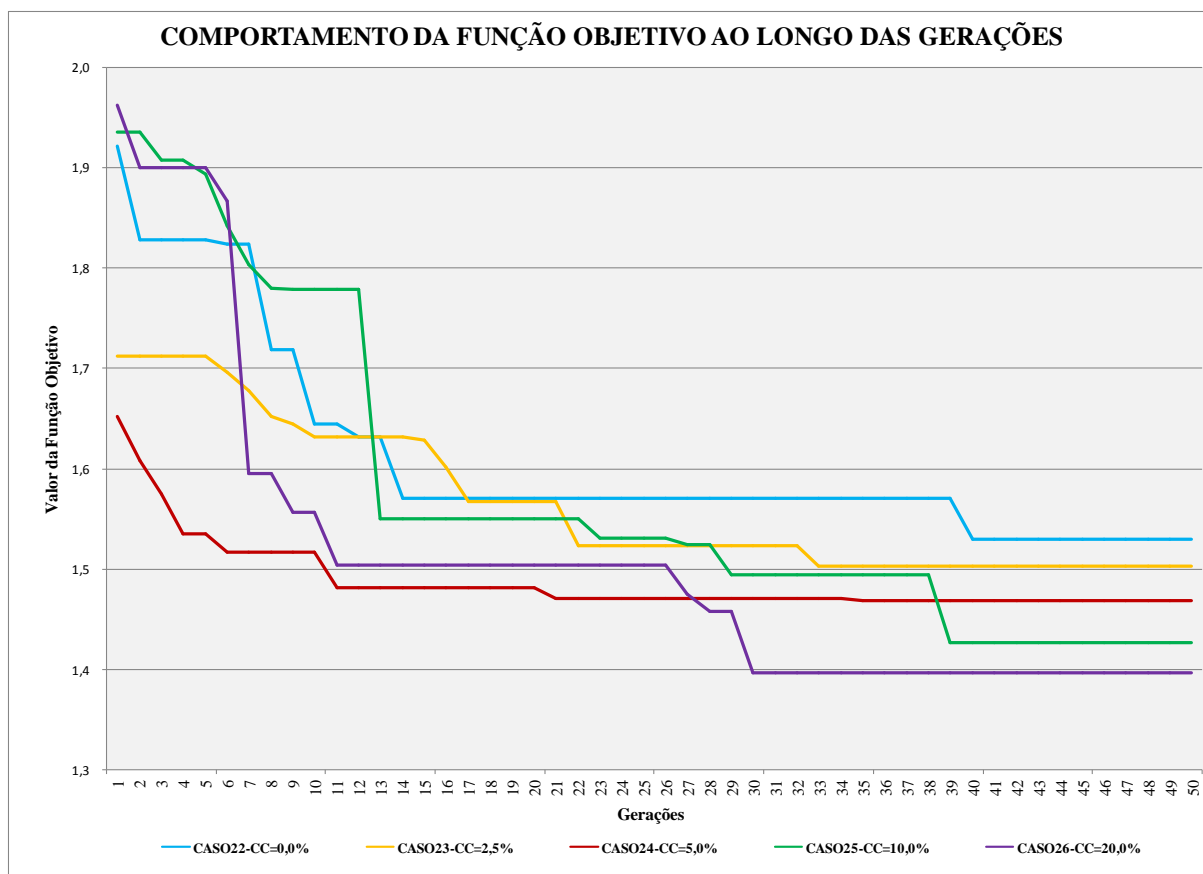


Figura 6.3.13 – Comportamento dos valores mínimos da função objetivo ao longo das gerações para os casos do grupo 6.

Analisando a figura 6.3.13 que representa a tabela 6.3.9 vê-se claramente que o implemento deste dispositivo ajuda a encontrar melhores soluções, ou seja aumentando-se o coeficiente de convergência admissível acha-se soluções mais aptas (valores mínimos) independente do ponto de partida da função objetivo inicial.

Na verdade o efeito da aleatoriedade inicial (somente com a primeira população gerada randomicamente) é atenuado com a ocorrência de outras gerações originadas aleatoriamente durante o processo, aumentando a probabilidade dentro de uma diversidade maior de soluções de se obter através de cruzamentos destas o ótimo global.

A correlação entre os valores mínimos da função objetivo encontrados e o coeficiente de convergência admissível é apresentada na figura 6.3.14.

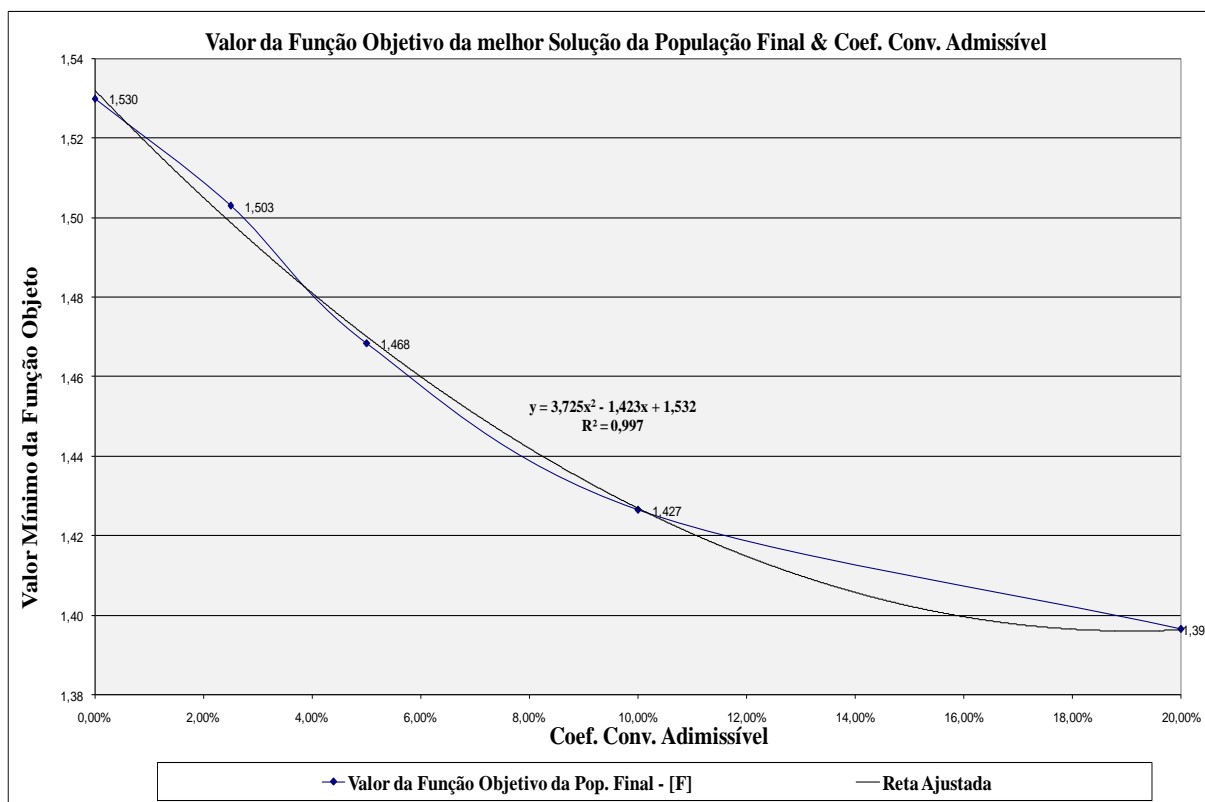


Figura 6.3.14 – Comportamento dos valores mínimos da função objetiva encontrados para os casos do grupo 6.

PARÂMETROS ANALISADOS	CASO22-CC=0,0%	CASO23-CC=2,5%	CASO24-CC=5,0%	CASO25-CC=10,0%	CASO26-CC=20,0%
Coefficiente de Convergência Admissível - [A%]	0,00%	2,50%	5,00%	10,00%	20,00%
Tempo de Processamento (min) - [B]	24,833	28,331	28,235	28,141	28,618
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	2,587	3,110	3,081	3,253	3,258
Iteração de Localização do Melhor Elemento - [D]	40,000	33,000	35,000	39,000	30,000
Valor da Função Objeto da Pop. Inicial - [E]	1,922	1,712	1,652	1,936	1,962
Valor da Função Objeto da Pop. Final - [F]	1,530	1,503	1,468	1,427	1,397
Melhora no Valor da Função Objeto [G]=[E]-[F]	0,392	0,209	0,183	0,509	0,566
Gradiente de Melhora no Valor da Função Objeto [H%]=[G]/[D]	0,98%	0,63%	0,52%	1,31%	1,89%
ANÁLISE RELATIVA À MELHOR SOLUÇÃO ENCONTRADA	CASO22-CC=0,0%	CASO23-CC=2,5%	CASO24-CC=5,0%	CASO25-CC=10,0%	CASO26-CC=20,0%
Percentual do Tempo de Proc. Relativo a Maior Tempo (TPMT=28,618min) - [I%]=[B]/[TPMT]	86,8%	99,0%	98,7%	98,3%	100,0%
Percentual do Tamanho do Arquivo Relativo a Maior Arquivo (TAMA=3,258Mb) - [J%]=[C]/[TAMA]	79,4%	95,5%	94,6%	99,8%	100,0%
Percentual Médio de Desempenho Relativo ao Esforço Computacional - [K%]=([I%]+[J%])/2	83,1%	97,2%	96,6%	99,1%	100,0%
Percentual de Desempenho de Convergência ou Proximidade do Valor da Função Objeto Relativa a Melhor	9,5%	7,6%	5,1%	2,1%	0,0%
Percentual de Desempenho Efetivo - [M%]=[K%]+[L%]	92,6%	104,8%	101,8%	101,2%	100,0%

Tabela 6.3.10 – Análise dos parâmetros relativos à melhor solução encontrada dos casos do grupo 6.

Quanto aos desempenhos associados ao esforço computacional referente ao tempo de processamento, apresentado na tabela 6.3.10 e na figura 6.3.15, se configura uma falta de correlação ( $R^2=0,353$ ) com a coeficiente de convergência, devido principalmente ao primeiro ponto, que obviamente representa a não implementação deste dispositivo (CC=0,0%).

Sendo o caso 26 o que requer mais tempo de processamento (28,618 minutos) cerca de 15,24% a mais que o caso 22 (24,833 minutos), o mais rápido

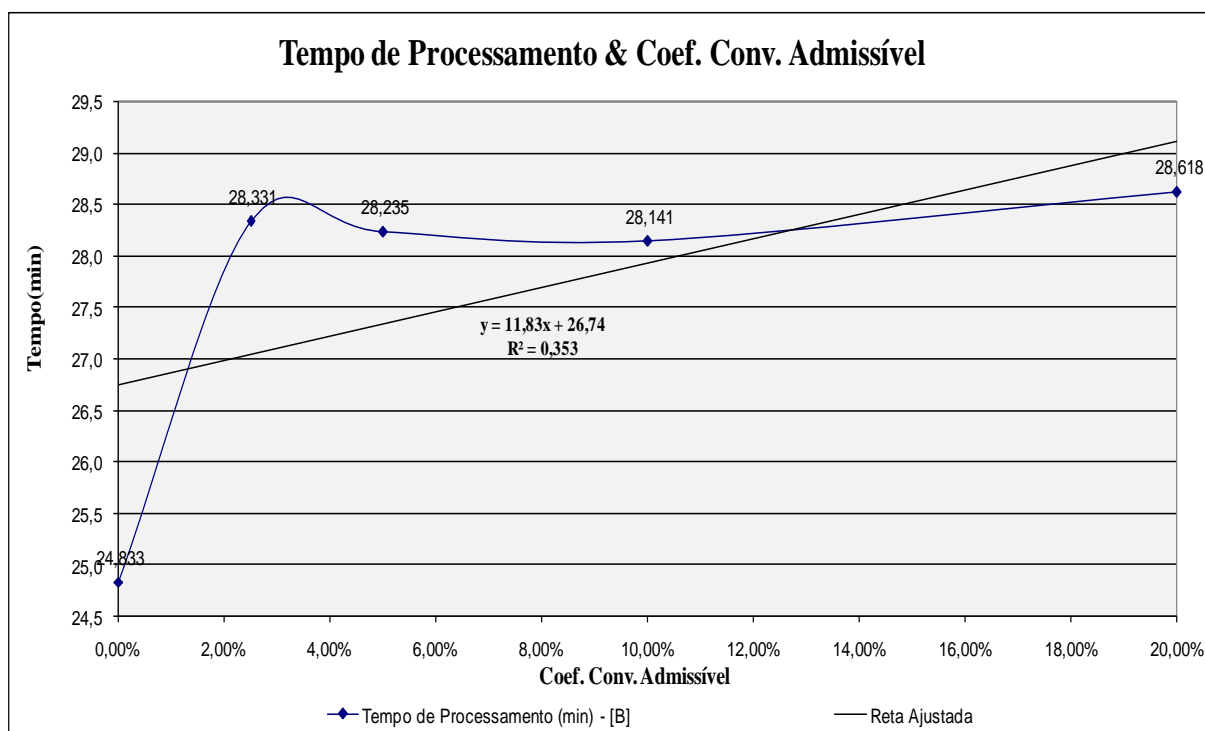


Figura 6.3.15 – Desempenho da componente do esforço computacional tempo de processamento para os casos do grupo 6.

No tocante à outra componente do esforço computacional, a capacidade requerida do arquivo, a figura 6.3.15, demonstra também a falta de correlação ( $R^2=0,507$ ) com o coeficiente de convergência admissível pelo mesmo motivo da outra componente, apresentando a relação de diferença nos desempenhos do pior caso CC=20,0% com 3,258Mb para o melhor CC=0,00% com 2,587Mb pouco a maior que a outra componente do esforço, cerca de 25,94%.



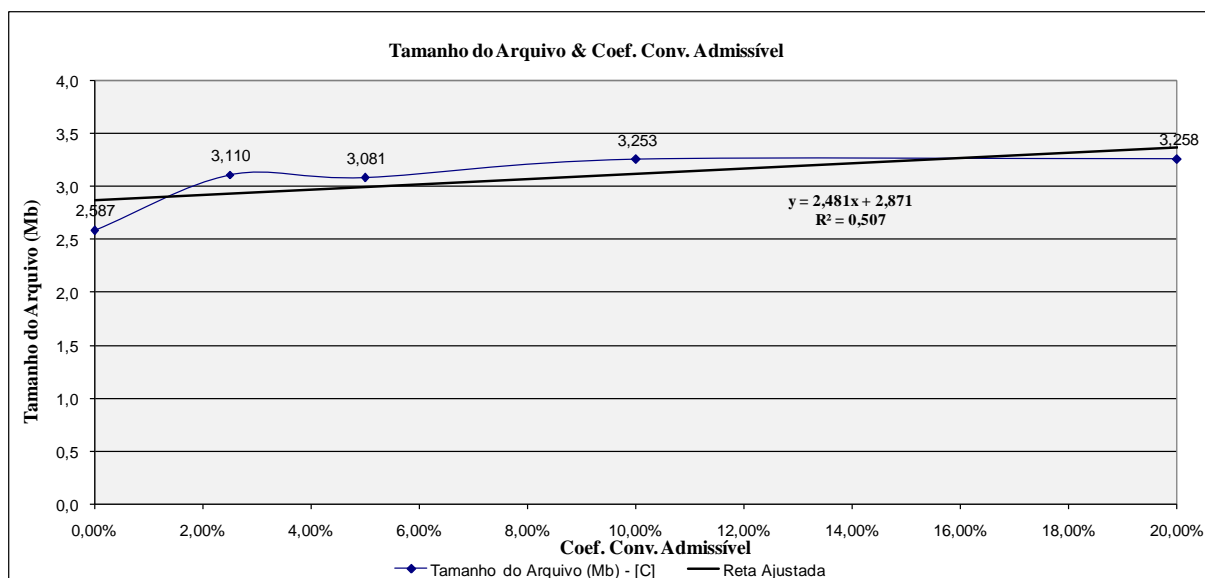


Figura 6.3.16 – Desempenho da componente do esforço computacional tamanho do arquivo (memória requerida) para os casos do grupo 6

O objetivo desta análise de sensibilidade é encontrar para este parâmetro opcional (coeficiente de convergência admissível) um ponto de equilíbrio do AG entre alentos antagônicos que são a convergência e qualidade final das soluções e o esforço computacional. Este ponto de equilíbrio resulta no melhor desempenho associado ao tempo de processamento, esforço computacional e proximidade ou convergência da solução ao resultado ótimo do problema.

A figura 6.3.17 apresenta o comportamento destes alentos para cada caso analisado deste grupo.

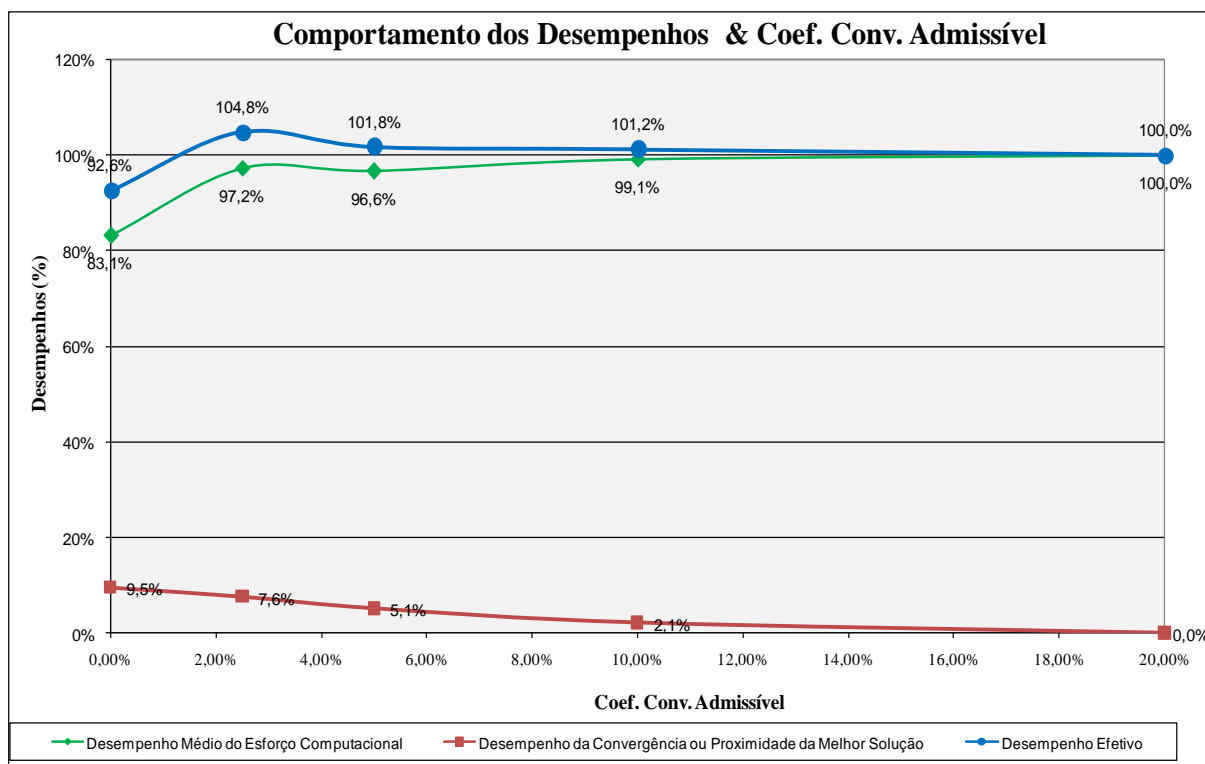


Figura 6.3.17 – Comportamento dos Desempenhos Relativos à melhor solução das simulações dos casos do grupo 6.

Concluindo-se por esta análise que, desde que este implemento opcional seja utilizado ( $CC \neq 0,0\%$ ) o valor de melhor desempenho efetivo apresenta-se quando o coeficiente de convergência é ( $CC = 20\%$ ).

E que a diferença de custos de desempenhos efetivos entre a utilização ( $CC = 20,0\%$ ) ou não deste dispositivo é de apenas 7,5% ( $100,0 - 92,5$ ).

Neste grupo seria redundante a análise do comportamento dos valores médios (de toda a população) da função objetivo uma vez que quanto maior o valor admissível para o coeficiente de convergência, maior o número de gerações cujas populações são geradas aleatoriamente e conseqüentemente maiores os valores médios da função objetivo.

### 6.3.3 Grupo 7 – Parâmetro Opcional em Análise Tipo de Cruzamento

Embora tenha sido previsto o tipo de recombinação uniforme para o caso do problema se comportar com AG deceptivo, fato que não ocorre (comprovado à análise do grupo três), neste grupo se realiza uma análise comparativa entre os desempenhos dos dois tipos de cruzamento previstos no modelo otimizador.

Para tanto são realizadas simulações variando a taxa de recombinação uniforme em uma maior amplitude nos percentuais, pois é possível que um pequeno percentual nesta taxa apresente um desempenho melhor já que este tipo de cruzamento, segundo Michalewicz (2004), apresenta a característica de destruir os blocos de construção.

E por último compara-se o melhor resultado obtido com a taxa de crossover uniforme com o desempenho mais apto obtido com cruzamento clássico.

A seguir apresenta-se a tabela 6.3.11 com os parâmetros analisados deste grupo.

Casos	Prob. De Cruz. Unif. (%)	Tamanho da População de Soluções	Núm. de Gerações	Prob. Mutação (%)	Coef. Conv. Adm. (%)	Adoção de Elitismo?	Tipo de Cruz.	Adoção de Coef. de Conv.?	Adoção de Crit. Parada Antecipada?
22	20,00	30	30	0,15	0,0%	Sim	Uniforme	Não	Não
23	40,00								
24	60,00								
25	80,00								
26	100,00								

Tabela 6.3.11 – Parâmetros adotados do AG para o grupo 7.

Novamente aqui são realizadas cinco simulações e adotada a média aritmética como resultado com o objetivo de reduzir o efeito da aleatoriedade.

Apresenta-se somente a síntese da análise dos resultados obtidos através do crossover uniforme.

• *Síntese Analítica da Recombinação Uniforme (Grupo 7)*

Nº DA GERAÇÃO	CASO27-TC=20,0%	CASO28-TC=40,0%	CASO29-TC=60,0%	CASO30-TC=80,0%	CASO31-TC=100,0%
1	1,917	1,822	1,922	1,922	1,807
2	1,917	1,822	1,922	1,922	1,807
3	1,917	1,822	1,922	1,922	1,807
4	1,902	1,822	1,922	1,922	1,807
5	1,902	1,804	1,922	1,922	1,807
6	1,883	1,804	1,922	1,917	1,807
7	1,883	1,803	1,922	1,917	1,792
8	1,863	1,799	1,922	1,917	1,785
9	1,863	1,799	1,918	1,902	1,769
10	1,863	1,786	1,902	1,902	1,767
11	1,863	1,786	1,902	1,894	1,750
12	1,863	1,786	1,887	1,888	1,750
13	1,863	1,769	1,873	1,888	1,750
14	1,863	1,769	1,873	1,863	1,750
15	1,863	1,769	1,873	1,863	1,750
16	1,863	1,769	1,867	1,863	1,746
17	1,863	1,769	1,867	1,863	1,746
18	1,854	1,756	1,867	1,863	1,746
19	1,810	1,756	1,867	1,863	1,746
20	1,810	1,756	1,854	1,847	1,746
21	1,810	1,756	1,854	1,847	1,746
22	1,810	1,756	1,854	1,839	1,746
23	1,798	1,751	1,854	1,839	1,746
24	1,798	1,746	1,854	1,833	1,746
25	1,798	1,746	1,854	1,833	1,746
26	1,798	1,746	1,821	1,818	1,738
27	1,762	1,746	1,821	1,818	1,738
28	1,762	1,746	1,821	1,814	1,738
29	1,762	1,746	1,821	1,814	1,738
30	1,759	1,746	1,821	1,814	1,738
Taxa de crossover- uniforme[A%]	20,0%	40,0%	60,00%	80,0%	100,0%
Tempo de Processamento (min) - [B]	11,451	11,179	11,379	11,414	11,612
Tamanho do Arquivo (Mb) - [C]	1,384	1,415	1,492	1,605	1,626
Geração de Localização do Melhor Elemento - [D]	30	24	26	28	26
Valor da Função Objetivo da Pop. Inicial - [E]	1,917	1,822	1,922	1,922	1,807
Valor da Função Objetivo da Pop. Final - [F]	1,759	1,746	1,821	1,814	1,738
Melhora no Valor da Função Objetivo [G]=[E]-[F]	0,158	0,076	0,101	0,109	0,069
Gradiente de Melhora no Valor da Função Obj. [H%]=[G]/[D]	0,53%	0,32%	0,39%	0,39%	0,27%

Tabela 6.3.12 – Análise dos parâmetros relativos à melhor solução encontrada dos casos do grupo 7.

A análise dos resultados apresentados na tabela 6.3.12, que para cada caso sintetiza a média aritmética de cinco simulações, demonstra que a solução menos apta em relação aos valores da função objetivo encontrados (caso29 - FOmin=1,821) é cerca de apenas 4,78% maior que o melhor resultado (caso31 - FOmin=1,738).

Referente aos desempenhos associados ao esforço computacional quanto ao tempo de processamento, o caso 31 requer mais tempo de processamento (11,612 minutos) cerca de apenas 3,87% a mais que o caso 28 (11,179 minutos), o mais rápido.

Comportamento semelhante ao grupo 3 (análise dos resultados das taxas de recombinação clássica com um ponto de corte), na proximidade dos desempenhos e na falta de uma perfeita correlação com a taxa de recombinação uniforme para estes dois parâmetros por consequência do efeito da aleatoriedade já discutido. Atente-se que a semelhança se dá no nível de comportamento, pois a magnitude dos resultados são bem inferiores como vê-se mais adiante.

Quanto à outra componente do esforço computacional, a capacidade requerida do arquivo, demonstrou ter uma perfeita correlação com a taxa de recombinação uniforme, apresentando significativa diferença nos desempenhos do pior (caso 31 – 1,626Mb) para o melhor (caso 27 – 1,384Mb), cerca de 17,49%.

Aqui, analogamente aos resultados observados no grupo 3, também tem-se o índice ou gradiente de melhora relativa no valor da função objetivo com o mais adequado para representar os desempenhos dos casos com diferentes taxas de recombinação uniforme, por levar em consideração somente as iterações até a geração onde se encontra a melhor solução. Sintetizando mais apropriadamente o gradiente de pressão que o operador crossover realiza na busca de uma solução mais apta.

Este índice revela a menor taxa de recombinação uniforme (caso 27 com 20%) como a de melhor desempenho 0,53%.

O comportamento do valor médio da função objetiva da população a cada geração apresentado na tabela 6.3.13 e figura 6.3.18, confirma o caso 27 como o de melhor desempenho, revelando que a menor taxa de recombinação exerce alguma pressão na busca de melhores soluções com menor poder de destruição dos *blocos de construção* cromossômica que as taxas maiores.

Nº DA GERAÇÃO	CASO27-TR=20%	CASO28-TR=40%	CASO29-TR=60%	CASO30-TR=80%	CASO31-TR=100%
1	65,088	35.357,670	396,267	6.289,873	54.946,192
2	11,820	101,061	2.443,620	2.564,886	252,422
3	15,892	184,269	447,664	41.258,417	718,374
4	108,440	6.669,463	518,928	319,822	10.656,335
5	4,213	13,567	192,011	757,097	4.701,328
6	23,028	5,962	43,622	204,256	376,054
7	2,669	6,431	14,826	325,590	151,087
8	134,515	6,441	14,649	174,970	144,707
9	2,552	25,389	4,242	345,254	121,143
10	1,926	2,670	10,957	458,155	8.078,394
11	1,873	2,056	5,593	10,283	21,586
12	1,988	1,993	16,184	5,631	15.427,122
13	4,398	1,972	2,311	3,530	3,291
14	2,116	1,848	1,941	3,856	6,919
15	1,869	1,865	1,907	4,880	3,705
16	18,580	1,774	3,460	2,804	2,057
17	4,258	1,770	2,387	2,828	38,153
18	1,865	1,831	1,870	4,075	2,034
19	1,978	1,782	1,976	2,209	18,379
20	1,928	1,762	1,917	2,116	2,226
21	1,860	1,799	2,364	1,959	2,708
22	1,819	1,759	1,885	1,895	3,068
23	1,816	1,866	1,927	2,008	1,783
24	1,828	1,788	1,930	1,894	1,903
25	1,807	1,753	2,045	2,195	1,775
26	1,863	1,771	1,934	2,303	1,762
27	1,814	1,756	1,992	2,021	1,878
28	1,801	1,759	1,948	2,210	1,785
29	1,807	3,228	2,015	1,984	6,609
30	2,745	2,346	1,882	2,041	1,912
<b>VALORES TOTAIS=</b>	430,157	42.411,400	4.146,251	52.761,041	95.696,689
<b>VALORES MÉDIOS=</b>	14,339	1.413,713	138,208	1.758,701	3.189,890

HACHURA AZUL INDICA O MENOR DOS VALORES ENCONTRADO A CADA GERAÇÃO ENTRE OS DOIS CASOS DE MELHORES DESMPENHOS.

Tabela 6.3.13 – Comparativo dos comportamentos dos valores médios da função objetivo a cada geração nos casos do grupo 7.

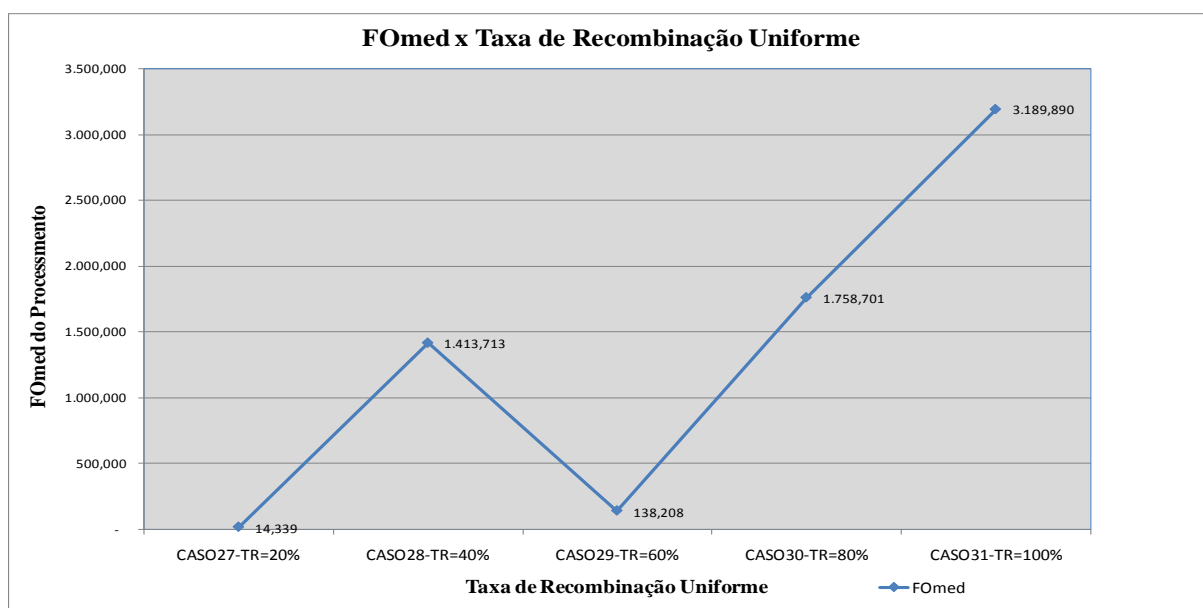


Figura 6.3.18 – Comparação dos valores médios da função objetivo (FOMed) obtidas no final do processamento das gerações para os casos do grupo 7

Observe-se que com exceção do caso 28 (taxa de recombinação 40%), o desempenho dos valores médios da função objetivo melhorou (minimizou) com a diminuição da taxa de recombinação uniforme. Este caso excepcional depara-se com duas de suas simulações (Caso 28C e 28D), apresentando a mesma melhor solução para todas as gerações.

Observando-se a tabela 6.3.13 nas colunas dos dois casos de melhor desempenho dos valores médios da função objetivo, vê-se que o caso com a menor taxa de recombinação uniforme, apresenta melhor resultado em vinte e duas das trinta gerações, (73% delas), enquanto o segundo melhor caso vence em apenas oito delas.

Tomando-se o melhor caso deste grupo (caso 27) que analisa o comportamento dos resultados em função da taxa de recombinação uniforme e comparando-se com os resultados obtidos com o cruzamento clássico (caso 16X) ambos calibrados com os parâmetros que fornecem o melhor resultado, têm-se os respectivos desempenhos apresentados na tabela 6.3.14 e gráficos 6.3.19 e 6.3.20.

A conclusão do tipo de recombinação de melhor desempenho é previsível já que o problema foi demonstrado obedecer à hipótese dos blocos de construção, onde no decorrer das gerações as informações neles contidas são combinadas pelos cromossomos pais produzindo filhos mais aptos.

A recombinação tipo uniforme apresenta desempenho inferior à clássica neste problema AG, por destruir estes blocos.

CASOS	CASO16X-Clássico		CASO27-Uniforme	
Nº DA GERAÇÃO	FOmin	FOmed	FOmin	FOmed
1	1,642	95,903	1,917	65,088
2	1,633	70,071	1,917	11,820
3	1,633	474,237	1,917	15,892
4	1,631	7,675	1,902	108,440
5	1,627	3,216	1,902	4,213
6	1,622	2,373	1,883	23,028
7	1,619	2,035	1,883	2,669
8	1,571	14,388	1,863	134,515
9	1,571	4,647	1,863	2,552
10	1,566	3,029	1,863	1,926
11	1,566	1,661	1,863	1,873
12	1,566	1,596	1,863	1,988
13	1,566	1,573	1,863	4,398
14	1,566	1,566	1,863	2,116
15	1,566	6,597	1,863	1,869
16	1,561	2,245	1,863	18,580
17	1,561	1,670	1,863	4,258
18	1,561	1,601	1,854	1,865
19	1,561	1,747	1,810	1,978
20	1,561	1,569	1,810	1,928
21	1,561	1,658	1,810	1,860
22	1,561	1,689	1,810	1,819
23	1,561	1,661	1,798	1,816
24	1,561	1,720	1,798	1,828
25	1,561	1,566	1,798	1,807
26	1,561	1,562	1,798	1,863
27	1,561	1,574	1,762	1,814
28	1,561	1,581	1,762	1,801
29	1,561	1,606	1,762	1,807
30	1,561	1,617	1,759	2,745

**HACHURA AZUL INDICA O MENOR DOS VALORES ENCONTRADOS A CADA GERAÇÃO ENTRE OS DOIS CASOS DE MELHORES DESMPENHOS.**

Tabela 6.3.14 – Comparativo dos comportamentos dos valores mínimos e médios da função objetivo ao longo das gerações para os casos de melhor desempenho de cada tipo de Recombinação.



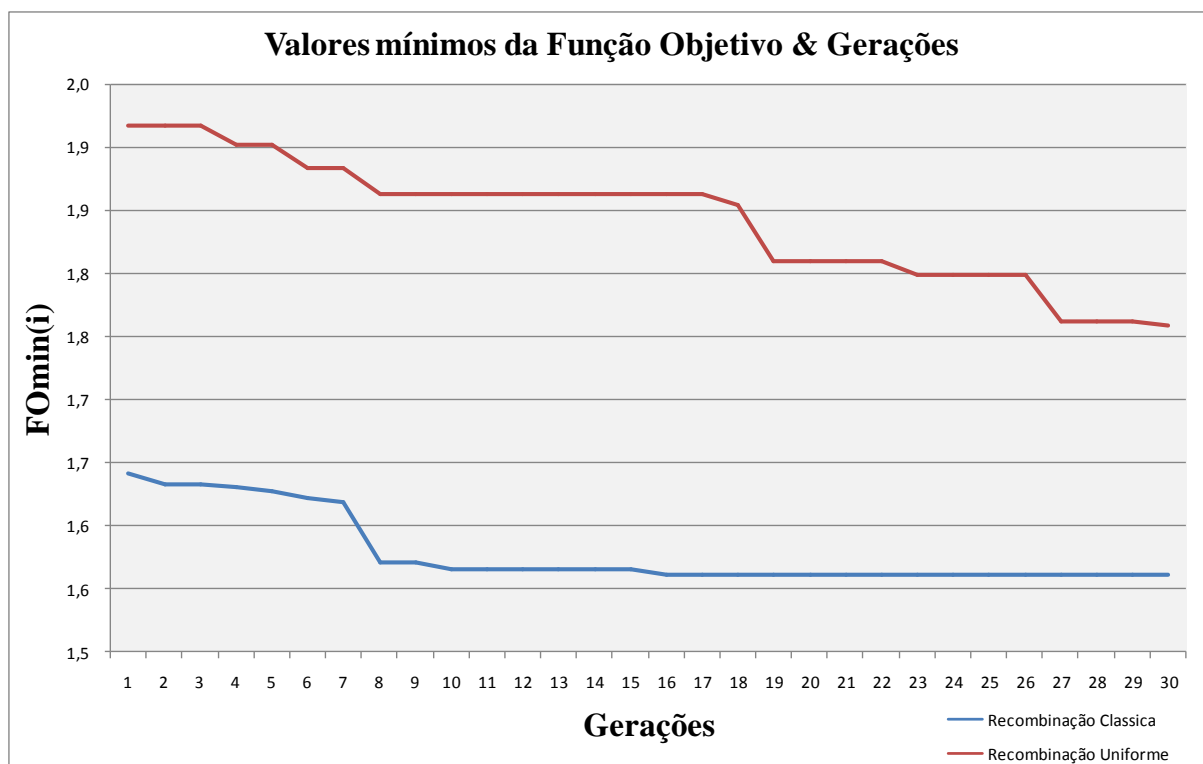


Figura 6.3.19 – Comparação dos valores mínimos da função objetivo (FOmin) obtidas ao longo das gerações para os tipos de recombinação.

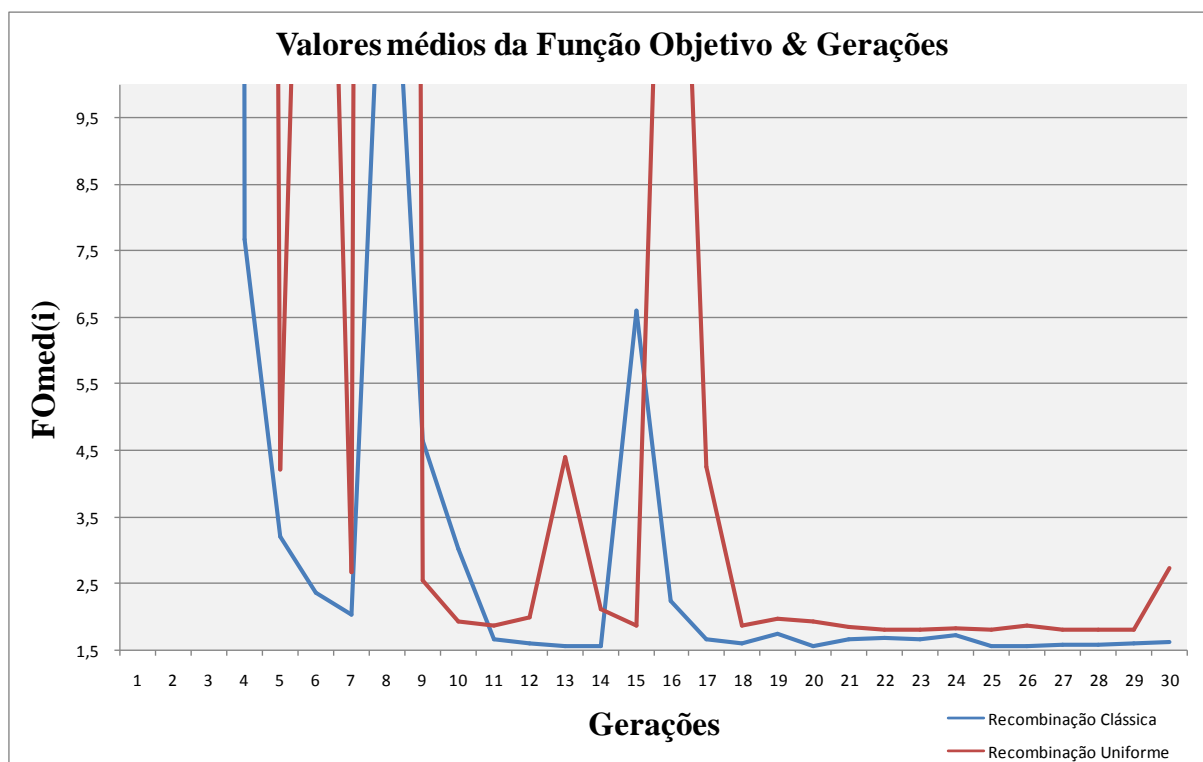


Figura 6.3.20 – Comparação dos valores médios da função objetivo (Fomed) obtidas ao longo das gerações para os tipos de recombinação.

## 6.4 RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE O AG E PNL

Concluída a fase de calibração dos parâmetros básicos e opcionais que proporcionam o melhor desempenho do AG, são realizadas simulações com números maiores de gerações em busca da solução ótima global.

### 6.4.1 Grupo 8 – Busca da Melhor Solução

Neste grupo são realizadas simulações variando o número de gerações (valores grandes) comparando além dos valores das funções objetivo os diâmetros dos condutos verificando a convergência dos mesmos.

A seguir apresenta-se a tabela com os parâmetros configurados para este grupo.

Casos	Núm. de Gerações	Tamanho da População de Soluções	Prob. De Cruz. (%)	Prob. Mutação (%)	Coef. Conv. Adm. (%)	Adoção de Elitismo?	Tipo de Cruz.	Adoção de Crit. Parada Antecipada?
32	100	30	100	0,15	20	Sim	Clássico	Não
33	150							
34	200							
35	250							
36	300							

Tabela 6.4.1 – Parâmetros adotados do AG para o grupo 8.

• **Grupo 8 – Resultados**

Casos	Núm. de Gerações	Tempo de Process. (min)	Tamanho Arquivo (Mb)	Valor da Função Objetivo	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32	Núm. de Condutores Convergentes		
32	100	80	6,348	1,498	150	100	125	100	175	75	150	200	175	225	250	325	250	175	225	250	150	175	300	325	150	150	200	200	200	225	150	75	150	150	100	150	50	10	
33	150	167	9,736	1,416	150	100	150	150	175	125	100	175	200	225	250	325	225	100	175	225	200	150	300	300	325	150	150	200	200	125	200	175	150	150	150	150	100	125	8
34	200	276	12,384	1,376	175	150	50	150	200	100	125	175	175	175	200	325	250	150	225	250	200	150	300	300	150	150	200	200	125	175	150	150	150	150	150	150	100	150	8
35	250	454	15,694	1,370	150	100	150	150	175	100	125	175	175	175	200	300	250	150	200	225	250	200	325	350	75	175	175	225	175	175	175	150	200	175	150	125	100	150	7
36	300	582	18,100	1,354	150	125	125	100	200	125	100	175	175	200	225	350	225	175	225	250	175	125	300	325	150	125	175	175	100	175	175	200	125	150	125	100	100	32	

**Tubos que apresentam diâmetro igual à melhor solução**

Tabela 6.4.2 – Resultados das simulações dos casos do grupo 8.

A tabela 6.4.2 demonstra que apesar da proximidade dos resultados encontrados para a função objetivo os diâmetros dos condutos correspondentes são bem diferentes entre as soluções encontradas.

A complexidade da função objetivo com trinta e duas variáveis de decisão podendo assumir cada uma delas treze bitolas diferentes de diâmetro, possibilita vários pontos de mínimo local.

Portanto não é correto pressupor que encontrar a solução ótima implica na convergência dos diâmetros correspondentes, uma vez que os resultados são de cinco simulações diferentes, cada uma delas encontrando um ponto de mínimo para a função objetivo.

Obviamente o maior número de gerações para uma simulação proporciona uma maior probabilidade de se encontrar soluções melhores, porém aumenta o esforço computacional.

A interface entre o módulo simulador (EPANET) e o módulo otimizador (AG) é realizada através de procedimentos em arquivos tais como abrir/ler/escrever/salvar/fechar. À medida que as iterações vão se processando ocorre o aumento do tamanho do arquivo que

registra os dados das populações de cada geração, majorando muito o tempo de processamento destes procedimentos.

Recorre-se à técnica de grande utilidade para este tipo de situação, o “seeding”, ou seja, pôr a semente (melhor solução encontrada até então) na população inicial de uma “nova” simulação com os arquivos de registros dos dados da população zerados, mantendo-se os parâmetros que proporcionam o melhor desempenho do AG.

Observe-se que recorrer ao “seeding” não modifica em nada o procedimento que vinha sendo executado, pois o elitismo e o coeficiente de convergência admissível já se encarregavam respectivamente de inserir na próxima geração o elemento mais apto da população, e gerar aleatoriamente a população.

Portanto a implementação desta técnica possibilita a continuação da simulação que produziu o melhor resultado até então, não sendo considerado como um novo processamento.

As continuações das simulações apontaram o caso 32 como melhor solução para o valor mínimo da função objetivo dentre os cinco casos.

A tabela 6.4.3 apresenta a comparação dos resultados dos parâmetros hidráulicos obtidos pelo AG (simulação do caso 32) com os alcançados através da PNL.

Método	Núm. de Gerações ou Iterações	Tempo de Process. (min)	Tamanho Arquivo (Mb)	Valor da Função Objetivo	Parâmetros	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32	Valores Médios
AG	500	741	30,405	1,314	Diâm.(D-mm)	150	100	125	175	175	100	125	175	175	175	200	300	250	150	200	225	150	225	325	350	75	175	225	225	75	175	100	175	200	150	125	100	175
					Vazão (Q-l/s)	13,46	5,46	8,89	21,92	23,46	4,35	7,65	22,65	23,48	31,48	92,84	55,37	-15,15	30,65	40,65	12,72	37,56	91,79	103,79	2,49	18,62	38,28	-2,30	17,76	5,47	-14,46	-26,46	11,96	7,93	9,11	4,89	.	
					$(D^5 Q^3) \cdot 10^{10}$	0,042	0,034	0,039	0,034	0,030	0,053	0,052	0,032	0,036	0,032	0,028	0,032	0,033	0,034	0,035	0,047	0,041	0,043	0,049	0,038	0,047	0,039	0,045	0,052	0,033	0,078	0,046	0,053	0,049	0,037	.		
					$\Sigma(D^5 Q^3) \cdot 10^{10}$	1,314																																.
					J(m/Km)	5,571	7,873	6,400	6,500	7,428	5,060	4,769	6,936	6,259	7,442	6,606	6,736	6,282	7,033	6,267	5,915	4,988	5,065	3,763	7,659	4,721	5,257	6,523	4,305	7,911	2,880	4,697	4,430	5,116	6,713	6,350	6,263	
					Vel. (V-m/s)	0,761	0,695	0,725	0,911	0,975	0,584	0,623	0,942	0,894	0,976	1,002	1,313	1,128	-0,857	0,975	1,022	0,720	0,945	1,106	1,079	0,564	0,774	0,963	0,520	0,739	0,696	-0,601	-0,842	0,677	0,646	0,743	0,622	0,752
PNL	>3000	.	.	2,333	Diâm.(D-mm)	200	150	100	275	225	125	100	175	275	175	225	300	325	175	150	200	200	250	275	300	150	125	300	150	125	150	200	175	200	100	125	125	175
					Vazão (Q-l/s)	21,21	13,21	4,05	48,93	31,21	7,27	4,73	19,73	43,61	13,73	21,73	81,89	90,15	9,88	14,78	24,78	27,38	28,19	67,96	79,96	11,66	43,57	6,82	8,76	5,58	-9,01	-21,01	19,04	2,59	7,37	6,63	.	
					$(D^5 Q^3) \cdot 10^{10}$	0,071	0,043	0,061	0,066	0,059	0,058	0,045	0,042	0,083	0,087	0,122	0,036	0,045	0,168	0,035	0,052	0,043	0,123	0,034	0,038	0,056	0,128	0,163	0,040	0,098	0,094	0,073	0,045	0,056	0,069	.		
					$\Sigma(D^5 Q^3) \cdot 10^{10}$	2,333																																.
					J(m/Km)	3,045	5,377	4,414	3,001	3,521	4,315	5,962	5,289	2,394	2,602	1,734	5,259	4,190	1,372	6,700	4,130	5,022	1,671	5,017	5,727	4,210	4,842	1,523	6,214	2,579	2,544	2,987	4,933	1,848	4,435	3,605	4,160	
					Vel. (V-m/s)	0,675	0,748	0,516	0,824	0,785	0,592	0,602	0,820	0,734	0,571	0,547	1,159	1,087	0,411	0,837	0,789	0,872	0,574	1,144	1,131	0,660	0,616	0,386	0,714	0,455	-0,310	-0,669	0,792	0,329	0,601	0,540	0,644	

Resultados mais aptos entre os métodos de otimização das parcelas da função objetiva para cada conduto.

Tabela 6.4.3 – Comparação dos resultados obtidos pelos da PNL e AG.

Devido à dificuldade de convergência da PNL quando há variáveis inteiras, os diâmetros foram calculados através do software otimizador ADS como contínuos e depois ajustados para a dimensão comercial mais próxima, sem realizar o balanceamento da rede para estes diâmetros ajustados.

A tabela 6.4.3 apresenta os parâmetros hidráulicos obtidos para o método da PNL através da alimentação do simulador EPANET com estes diâmetros ajustados, equilibrando hidráulicamente a rede, e fornecendo parâmetros próximos, porém diferentes dos resultados apresentados na tabela 4.1 no capítulo 4 - *Estudo de Caso*.

Não são fornecidos para o método da PNL os resultados referentes ao esforço computacional quanto a tempo de processamento e tamanho do arquivo, porém o programa realizou pouco mais de três mil iterações.

A análise dos resultados comparativos obtidos pelos dois métodos demonstra a superioridade do desempenho do AG em relação à convergência ou proximidade da melhor

solução, apresentando valores para as perdas de cargas unitárias mais próximas do máximo valor admitido (8 m/Km), diâmetros menores para os condutos correspondentes e conseqüentemente menores custos de implantação, representando uma rede de tubulações com seções mais eficientes.

Tomando-se a curva ajustada dos custos de implantação para tubulação em PVC (figura 5.2 na página 68) calcula-se na tabela 6.4.4 os resultados referentes à estimativa inicial (dimensionamento clássico), e às otimizações econômicas pelos métodos da PNL e AG.

Equação da curva ajustada  $\{y = 0,0013x^2 + 0,0288x + 28,462\}$  onde: y em (R\$) e x em (mm)

METODOLOGIA	PARÂMETROS		D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32	CUSTO TOTAL DE IMPLANT. (R\$)
	Comp. Cond (L-m)		250	100	210	300	150	350	180	190	150	110	110	200	150	180	100	100	110	180	140	100	180	200	210	210	150	140	250	220	230	250	200	200	
Dimens. Clássico	Diâm.(D-mm)		250	250	125	250	250	150	100	200	300	200	250	300	350	200	200	250	250	250	300	350	150	100	300	150	150	140	250	220	230	250	200	200	534.984,15
	Custo Implant.(R\$)		29.228,00	11.691,20	10.998,65	35.073,60	17.536,80	21.711,20	7.981,56	16.382,18	23.115,30	9.484,42	12.860,32	30.820,40	29.668,80	15.519,96	8.622,20	11.691,20	12.860,32	21.044,16	21.574,28	19.779,20	11.165,76	8.868,40	32.361,42	13.026,72	9.304,80	8.684,48	11.085,50	18.968,84	19.831,06	13.093,63	10.474,90	10.474,90	
PNL	Diâm.(D-mm)		200	150	100	275	225	125	100	175	275	175	225	300	325	175	150	200	200	250	275	300	150	125	300	150	125	125	150	200	175	100	125	487.686,68	
	Custo Implant.(R\$)		21.555,50	6.203,20	9.311,82	40.408,35	15.113,18	18.331,08	7.981,56	13.929,76	20.204,18	8.064,60	11.083,00	30.820,40	26.270,18	13.196,61	6.203,20	8.622,20	9.484,42	21.044,16	18.857,23	15.410,20	11.165,76	10.474,90	32.361,42	13.026,72	7.856,18	7.332,43	15.508,00	18.968,84	16.862,34	11.085,50	10.474,90		10.474,90
AG	Diâm.(D-mm)		150	100	125	175	175	100	125	175	175	175	200	300	250	150	200	225	150	225	325	350	75	175	225	75	175	100	175	200	150	125	100	430.656,00	
	Custo Implant.(R\$)		15.508,00	4.434,20	10.998,65	21.994,35	10.997,18	15.519,70	9.427,41	13.929,76	10.997,18	9.484,42	30.820,40	17.536,80	11.165,76	8.622,20	10.075,45	6.823,52	18.135,81	24.518,83	19.779,20	6.828,21	14.662,90	21.158,45	7.966,25	10.997,18	6.207,88	18.328,63	18.968,84	14.267,36	13.093,63	10.474,90	8.868,40		

Tabela 6.4.4 – Comparação dos custos de implantação das redes dimensionadas pelas metodologias analisadas.

Levando-se em consideração somente o custo de implantação (aquisição e montagem) da tubulação, a metodologia do AG apresenta uma rede de abastecimento com o custo de R\$ 430.656,00, sendo mais econômica R\$ 57.030,68 (11,69%), que a rede obtida pela PNL.

A seguir será realizada a análise que além dos valores de implantação leva em consideração os custos com a operação, ou bombeamento.

## 6.5 RESULTADOS DO AG COM A FUNÇÃO OBJETIVO COM ENFOQUE NOS CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO.

Analizados e comparados os resultados obtidos pelos métodos de otimização em questão, o trabalho agora utilizando o mesmo modelo calibrado, aprecia a mesma rede com a função objetivo definida na equação (5.3), na pagina 67.

Aplicando esta função, apresentada no capítulo 5 – *Modelo Computacional*, pretende-se obter a rede mais econômica levando em consideração a relação antagônica destes dois custos (implantação x bombeamento).

### 6.5.1 Grupo 9 – Busca da Melhor Solução

Neste grupo são realizadas quatro simulações distintas utilizando-se do artifício “seeding” para continuidade das mesmas em arquivos “leves”.

Por se tratar da mesma rede de abastecimento de água com as mesmas restrições hidráulicas foram mantidos os mesmos parâmetros básicos que configuram o melhor desempenho do AG.

Porém, a mudança de função objetivo fez com que os valores observados do coeficiente de convergência diminuíssem significativamente, ou seja, a diferença percentual entre a média e o menor dos valores da função objetivo fosse pequena. Para parâmetro opcional do coeficiente de convergência admissível foi configurado o valor de 0,1%.

A seguir apresenta-se a tabela 6.5.1 com os parâmetros configurados para este grupo.

Casos	Núm. de Gerações	Tamanho da População de Soluções	Prob. De Cruz. (%)	Prob. Mutação (%)	Coef. Conv. Adm. (%)	Adoção de Elitismo?	Tipo de Cruz.	Adoção de Crit. Parada Antecipada?
37	500	30	100	0,15	0,1	Sim	Clássico	Não
38								
39								
40								

Tabela 6.5.1 – Parâmetros adotados do AG para o grupo 9.

• **Grupo 9 – Resultados**

Casos	Valor da Função Objetivo (mil R\$)	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32	Núm. de Condutos Converg.	
37	899,092	150	125	100	250	200	100	175	200	250	175	200	350	300	75	225	250	200	50	250	275	200	50	175	200	175	50	150	125	150	175	50	32		
38	904,301	225	200	100	100	225	150	100	175	200	225	250	350	275	125	250	275	200	50	250	275	225	50	175	75	200	175	50	150	125	125	150	175	100	15
39	905,525	175	150	50	200	200	75	175	225	150	125	125	350	275	250	325	300	225	75	250	275	200	200	50	150	100	200	150	200	175	125	125	175	125	10
40	926,134	150	125	100	225	200	75	175	250	175	150	150	350	300	200	250	250	225	125	275	350	150	150	200	125	200	150	200	125	175	175	125	125	11	

Tubos que apresentam diâmetro igual à melhor solução

Tabela 6.5.2 – Resultados das simulações dos casos do grupo 9.

Novamente tem-se a proximidade dos resultados encontrados para a função objetivo com os diâmetros dos condutos correspondentes bem diferentes entre as soluções encontradas.

Caracterizando, para cada caso, a localização de pontos de mínimos diferentes no espaço de busca.

As continuações das simulações apontaram o caso 37 como melhor solução para o valor mínimo da função objetivo dentre os quatro casos.

A tabela 6.5.3 apresenta os parâmetros hidráulicos obtidos pelas simulações campeãs de cada uma das funções objetivo, caso 32 (ênfase na eficiência da seção) e caso 37 (focalizando no custo de implantação e operação).





CONDUTOS		D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12	D-13	D-14	D-15	D-16	D-17	D-18	D-19	D-20	D-21	D-22	D-23	D-24	D-25	D-26	D-27	D-28	D-29	D-30	D-31	D-32	CUSTOS TOTAIS (Mil R\$)		
COMPRIM. DO CONDUTO (L-m)		250	100	210	300	150	350	180	175	150	110	200	300	200	150	180	100	200	110	180	140	100	180	200	210	210	150	140	250	220	230	250	200	200		
CASO 32	Diâm.(D-mm)	150	100	125	175	175	100	125	175	175	175	200	300	250	150	200	225	150	225	180	325	350	75	175	200	225	75	175	100	140	250	200	150	125	100	430,656
	Custo Implant.-CI (Mil R\$)	15,508	4,434	10,999	21,994	10,997	15,520	9,427	13,930	10,997	8,065	9,484	30,820	17,537	11,166	8,622	10,075	6,824	18,136	24,519	19,779	6,828	14,663	21,158	7,966	10,997	6,208	18,329	18,969	14,267	13,094	10,475	8,868			
	CI = 0,0013D² + 0,0288D + 28,462																																			
	Custo de Bomb.-CB (Mil R\$)	Ch= 3.128,06										F <sub>a</sub> = 11,13										H= 16,007										557,301				
	Custo Total - CT (Mil R\$)	CT=CI+CB																																987,957		
CASO 37	Diâm.(D-mm)	150	125	100	250	200	100	175	200	250	175	200	350	300	75	225	250	200	50	250	275	200	50	175	75	200	175	50	150	125	150	175	50	434,298		
	Custo Implant.-CI (Mil R\$)	15,508	5,237	9,312	35,074	12,933	15,520	13,197	16,382	17,537	8,065	9,484	39,558	23,115	6,828	10,075	11,691	9,484	5,967	16,368	13,469	15,520	6,630	15,396	7,966	12,933	10,264	8,288	13,647	12,046	15,508	14,663	6,630			
	CI = 0,0013D² + 0,0288D + 28,462																																			
	Custo de Bomb.-CB (Mil R\$)	Ch= 3.128,06										F <sub>a</sub> = 11,13										H= 13,350										464,793				
	Custo Total - CT (Mil R\$)	CT=CI+CB																																	899,092	

Tabela 6.5.4 – Comparação dos resultados dos custos envolvidos obtidos nas simulações campeãs para as duas funções objetivo analisadas.

A tabela, apesar de ser auto-explicativa, contém fórmulas e variáveis definidas no item 5.3.3 do capítulo 5 – *Modelo Computacional*.

A comparação dos resultados da tabela 6.5.4 demonstra uma proximidade dos custos de implantação nos dois casos, sendo a diferença de R\$ 3.642,00 (0,83%), a favor (mais econômico) do caso 32.

Quanto aos custos de bombeamento, o caso 37 se mostra bem mais vantajoso apresentando um custo de R\$ 464.793,00 contra R\$557.301,00 do caso 32. Uma significativa diferença de R\$ 92.508,00 (16,60%), que demonstra a importância da consideração deste custo.

Considerando-se o custo total de implantação e bombeamento o caso 37 apresenta-se bem mais econômico custando R\$ 899.092,00 contra R\$ 987.957,00 do caso 32. Uma economia total de R\$ 88.865,00 (8,99%).

Quanto maior a quantidade de horas de bombeamento diário, maior será a relevância deste custo em relação ao de implantação. Para o exemplo é considerado um bombeamento de treze horas diárias, sendo a escolha deste valor explicada também no item 5.3.3 do capítulo 5 - *Modelo Computacional*.

Observe-se que para os dois casos os custos de bombeamento são superiores ao de implantação, no caso 32 ele representa R\$ 557.301,00 (56,41%) do custo total R\$ 987.957,00. Enquanto no caso 37 monta R\$ 464.793,00 (51,70%) do total de R\$ 899.092,00.

---

## CONCLUSÕES E PROPOSIÇÕES

---

No presente trabalho é desenvolvido um modelo computacional *SOSNET* – *Sistema Otimizador Simulador de Redes*, para otimização do dimensionamento de sistemas de distribuição de água em redes malhadas em regime permanente. O modelo é concebido em dois módulos: o módulo de simulação hidráulica e o módulo de otimização multiobjetivo.

A implementação do módulo de simulação hidráulica é realizada através do acoplamento do software *EPANET2* ao compilador *Visual Basic for Applications-VBA* do *Microsoft Excel*. Este acoplamento é possível graças à biblioteca de funções *Toolkit* que realiza a interface entre as rotinas do *EPANET2* com os procedimentos do código *VBA*.

Obtida a interface entre os módulos, os estudos seguem realizando simulações de análises de sensibilidade quanto à variação individual de cada parâmetro para encontrar seus valores que fazem o desempenho do algoritmo melhorar em termos de convergência, qualidade final das soluções e esforço computacional para a primeira função objetivo analisada que focaliza a eficiência da seção dos condutos da rede de abastecimento.

Encontrados os parâmetros básicos e opcionais que propiciam o melhor desempenho do AG para a rede analisada, são realizadas simulações mais longas em busca da melhor solução ou do ótimo global, que tem seus resultados analisados e comparados com os obtidos através da *PNL – Programação Não Linear*.

O estudo prossegue com a implementação da segunda função objetivo com enfoque na minimização dos custos de implantação (fornecimento e montagem) e de operação (bombeamento) da rede de abastecimento, realizando-se simulações longas à procura da melhor solução, finalizando com as analogias e comparações dos resultados obtidos das duas funções objetivo estudadas.

A investigação do modelo computacional desenvolvido neste trabalho apresenta vários resultados que culminam em conclusões interessantes sobre as ferramentas utilizadas e sobre a aplicação do modelo proposto para o sistema de distribuição de água estudado. Algumas destas conclusões são relatadas aqui.

As análises de sensibilidade realizadas para encontrar os valores dos parâmetros que fazem o desempenho do AG melhorar possibilitam o entendimento dos mesmos e das relações entre eles, ajudando a reduzir significativamente o esforço computacional das simulações em busca da melhor solução.

Alguns dos resultados destas análises confirmam propriedades que intuitivamente se previam, caso do tamanho da população, e do número de gerações, cujos maiores valores adotados como parâmetros propiciam o encontro de soluções mais aptas, porém aumentam esforço computacional.

Para outros parâmetros, a exemplo da taxa de recombinação, os resultados não mostram uma correlação bem definida entre seu crescimento e a obtenção de melhores soluções, sendo necessárias diversas simulações para um mesmo caso, e a adoção de valores médios diminuindo o caráter aleatório da geração da população inicial e do processo seletivo das soluções que sofrem a recombinação.

Porém uma análise levando em consideração não somente o menor valor encontrado, mas toda a população demonstra claramente através do comportamento do valor médio da função objetivo que a maior taxa de recombinação propicia melhores soluções na população.

A análise anterior permite primeiramente a conclusão que o problema obedece à hipótese dos blocos de construção não apresentando altos níveis de epistasia nem se caracterizando como AG deceptivo, fato comprovado posteriormente quando da análise comparativa dos resultados obtidos através da recombinação convencional com um ponto de corte e do cruzamento uniforme, mais indicado para o caso de AG deceptivo, que se apresentam amplamente favorável ao primeiro tipo. Concluindo-se finalmente que, para o problema analisado, uma maior taxa de recombinação favorece a localização de melhores soluções.

Já para o parâmetro da mutação é necessário a análise de diferentes valores para sua taxa desde o valor nulo, significando processamento do AG sem o operador mutação até valores máximos conceituados na literatura. Sendo indispensável, a inclusão de valores intermediários por questão de refinamento da taxa que apresente o melhor desempenho do AG, já que desta vez, as melhores taxas não se encontravam nos extremos e sim no meio da escala de crescimento deste parâmetro.

Parâmetros opcionais são analisados, tais como elitismo, tipo de cruzamento (já mencionado seus resultados), e coeficiente de convergência admissível, este sendo sugerido neste trabalho como uma ferramenta para recuperação da diversidade dos cromossomos na população.

Em todos os casos analisados fica bem evidenciado que durante as primeiras gerações ocorre uma rápida melhora das soluções em virtude da recombinação dos elementos que diferem entre si (presença de boa diversidade). E que com o passar das gerações esta diversidade vai diminuindo chegando algumas vezes a apresentar uma convergência extrema em que todos os elementos da população são semelhantes cromossomicamente, colocando o AG na situação de poder contar apenas com o operador mutação, pois o cruzamento de pais semelhantes gera filhos idênticos aos pais.

A adoção do elitismo aliado ao parâmetro sugerido neste trabalho se mostra uma poderosa ferramenta ajudando a encontrar soluções mais aptas com maior rapidez. Seu procedimento é simples, originar aleatoriamente a população da geração consecutiva à que tem o valor mínimo admissível atingido para o coeficiente de convergência, ou seja, quando a grande maioria das soluções de uma população convergirem para um mesmo valor.

Na verdade o efeito da aleatoriedade inicial (somente com a primeira população gerada randomicamente) é atenuado com a ocorrência de outras gerações originadas aleatoriamente durante o processo, aumentando-se a varredura dentro do espaço de busca e conseqüentemente a probabilidade, dentro de uma diversidade maior de soluções, de se encontrar através do cruzamento destas o ótimo global.

Os resultados alcançados pelo AG calibrado demonstram que apesar da proximidade dos resultados, valores mínimos da função objetivo, os diâmetros dos condutos

correspondentes são bem diferentes entre as soluções encontradas nas cinco simulações realizadas com um número grande de gerações.

A conclusão desta análise é que a complexidade da função objetivo com trinta e duas variáveis de decisão (diâmetros), cada uma delas podendo assumir treze bitolas diferentes, possibilita a incidência de vários pontos de mínimo local. Não se podendo garantir, apesar da utilização de ferramentas estratégicas para tentar varrer todo o espaço de busca, que o melhor resultado encontrado dentre as cinco simulações seja o ótimo global.

Porém a conclusão da análise dos resultados comparativos obtidos através dos dois métodos de otimização AG e PNL, aponta a superioridade do desempenho do primeiro em relação à convergência ou proximidade da melhor solução, apresentando valores para as perdas de cargas unitárias mais próximas da restrição adotada (máximo valor admitido 8m/km), diâmetros menores para os condutos correspondentes e conseqüentemente menores custos de implantação, representando uma rede de tubulações com seções mais eficientes.

Com relação à comparação do esforço computacional requerido pelos métodos não se pode concluir qual o mais vantajoso, uma vez que o exemplo analisado da PNL não informou os resultados referentes ao tempo de processamento ou tamanho de arquivo, relatando somente que o programa realizou pouco mais de três mil iterações para obter seu melhor resultado, enquanto o AG efetuou 500 iterações.

Mensurando os resultados obtidos pelos dois métodos em termos de custos de implantação através da equação da curva ajustada *Preço x Diâmetro* proposto por Gomes (2004) conclui-se que a solução do método AG custa R\$ 430.656,00, sendo mais econômico R\$ 57.030,68 (11,69%), que a rede do método PNL cujo valor orça R\$ 487.686,68

Para implementação da segunda função objetivo com enfoque na minimização dos custos de implantação e bombeamento, aproveita-se a calibração dos parâmetros para a primeira função objetivo, pois se trata da mesma rede não havendo alterações nas características cromossômicas representativas do problema. Porém para o único parâmetro relacionado à função objetivo, o coeficiente de convergência ocorre uma significativa diminuição, ou seja, torna-se muito pequena a diferença percentual entre a média e o menor

dos valores desta função objetivo. Por conseguinte, reduz-se o valor do parâmetro opcional coeficiente de convergência admissível sendo-lhe atribuído o taxa de 0,1%.

Os resultados obtidos com a nova função objetivo através de simulações com muitas gerações, também demonstram proximidade nas soluções encontradas embora os diâmetros sejam bem diferentes culminando em conclusão semelhante à anterior, de que não se poder garantir que a melhor solução encontrada seja o ótimo global.

A conclusão da análise comparativa do melhor resultado obtidos por cada uma das duas funções objetivo confirma a expectativa de que a primeira função objetivo com enfoque na eficiência da seção apresentaria velocidades superiores, maiores perdas de carga unitária, próximos do limite máximo restritivo e, por conseguinte maior altura manométrica requerida para bombeamento, no caso de a altitude do reservatório não conseguir suprir carga hidráulica suficiente aos pontos de consumo, dentro dos limites restritivos de pressão mínima e máxima.

Porém quando considerada também a necessidade de bombeamento, e conseqüentemente o custo referente ao consumo de energia elétrica, as conclusões da análise comparativa dos resultados das duas funções objetivo adotadas são que:

- o custo de bombeamento é superior aos de implantação para ambas as funções;
- o custo de implantação da primeira função é menor que o da segunda, mas a diferença é insignificante, menos de um por cento;
- Já o custo de bombeamento da segunda função é significativamente menor que o da primeira, quase dezessete por cento;
- O custo total, implantação mais bombeamento, da segunda função é bem mais vantajoso que o da primeira, quase nove por cento.

Donde se conclui a importância da consideração do custo de bombeamento para o dimensionamento da maioria das redes de distribuição, cujos mananciais se encontram em elevações inferiores aos pontos de consumo.

A conclusão geral sobre a utilização do Algoritmo Genético no dimensionamento econômico de sistemas de abastecimento de água é de plena viabilidade frente a outras técnicas de otimização, despontando como um procedimento bastante promissor.



Algumas proposições para futuros estudos relacionadas a este trabalho são aludidas agora:

- aplicação da metodologia a casos reais;
- implementação do regime transitório com variações horárias de consumo e níveis de reservação;
- implementação de funções objetivo avaliando o dimensionamento econômico considerando também os custos referentes à qualidade da água;
- Hibridização do método AG, que demonstrou maior capacidade de varredura do espaço de busca, com alguma técnica de otimização convencional para aumentar a velocidade de convergência e refinar os resultados.

Consideram-se como maiores contribuições deste trabalho, o desenvolvimento de uma ferramenta útil, prática, genérica, que proporciona o dimensionamento econômico de diferentes redes somente com a alimentação dos parâmetros de entrada através do formulário do modelo e do desenho do traçado da rede no próprio EPANET; a forma didática de como são introduzidos os conceitos do AG, e de como são realizadas as análises de sensibilidade objetivando encontrar os valores dos parâmetros que melhorem seu desempenho, que poderão ajudar a despertar e divulgar o interesse desta técnica; e finalmente, o aprendizado e a satisfação pessoal que a conclusão da presente dissertação proporcionou para o autor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12218: *Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público*. Rio de Janeiro, julho de 1994.
- [ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5647: *Tubos de PVC rígido com junta elástica*. Rio de Janeiro, 1999.
- [CAGEPA] Companhia de Água e Esgoto da Paraíba. Relatório Técnico. João Pessoa, PB, 2000.
- ALPEROVITS, E. ; SHAMIR, U. (1977). *Design of optimal water distribution systems*. Water Resources Research. New York, v. 13, n. 6, p. 885-900.
- ARAÚJO, J. K. (2003). *Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado a escoamento transiente*. São Carlos. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos.
- BAKER, J. E. (1987). *Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm*. Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms. Cambridge, MA: Lawrence Erlbaum Associates, p. 14-21.
- BARBOSA, P. S. F. (1997). *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos* - Coleção ABRH vol. 6. Porto Alegre: Editora da Universidade - UFRGS. cap 3, p. 97-163.
- BARCELOS, J. C. H. (2000). *Algoritmos genéticos adaptativos: um estudo comparativo*. São Paulo. 184p. Dissertação(Mestrado)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- BEASLEY, D.; BULL, D. R.; MARTIN, R. R. (1993). *An overview of genetic algorithms: Part 1, Fundamentals*. University Computing, v.15, n.2, p.58-69.
- BELLMAN, R. E. (1957). *Dynamic programming*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
- BELLMAN, R. E.; DREYFUS, S. (1962). *Applied dynamic programming*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
- BOOTH, A. D. (1949). *An application of the method of steepest descents to the solution of systems of nonlinear simultaneous equations*. Quart. J. Mech. Appl. Math., p.11-460.
- BOX, M. J. (1966). *A comparison of several current optimization methods and the use of transformations in constrained problems*. Computer J. , p. 9-67.

- BRAGA, B. P. F. e outros. (1987). *Modelos para gerenciamento de recursos hídricos*. Editora Nobel, Cap. 5, p. 427-518.
- BROYDEN, G. G. (1970). *The convergence of a class of double-rank minimization algorithms: I general considerations*. J. Inst. Math. Appl., p. 6-76.
- BURAS, N. (1966). *Dynamic programming in water resources development*. *Advances in hydroscience*. Ven Te Chow, ed. v. 3, p. 367-412.
- BURGSCHWEIGER, J.; GNÄDIG, B.; STEINBACH, M. C. (2005). *Nonlinear programming techniques for operative planning in large drinking water networks*. Zib Paperweb disponível em: < <http://www.zib.de/Publications/abstracts/ZR-05-31/>
- CARRIJO, I. B. (2004). *Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de A.G. multiobjetivo e aprendizado de máquina*. São Carlos. 234p. Tese(Doutorado)-Escola de Engenharia de São Carlos.
- CHENEY, E. W.; GOLDSTEIN, A. A. (1959). *Newton's method for convex programming and Tchebycheff approximation*. *Numerical math*, p. 4-253.
- CIRILO, J. A. (1997). *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos* - Coleção ABRH vol. 6. Porto Alegre: Editora da Universidade - UFRGS. cap 6, p. 305-359.
- DANDY, G.C.; ENGELHARDT, M. (2001). *Optimal Scheduling of Water Pipe Replacement Using Genetic Algorithms*. J. Water Resour. Plng. and Mgmt., v. 127, n. 4, p. 214-223.
- DAVIDON, W. C. (1959). *Variable metric method for minimization*. Argonne National Laboratory, ANL-5990 Rev, University of Chicago.
- DAVIES, D. (1968). *The use of davidon's method in nonlinear programming*. ICI Ltd. Rept. MSDH/68/110. Springfield, Virginia: Doc. N69-33235 from CFSTI
- DAVIES, D. (1969). *Some practical methods of optimization*. *Notes for the NATO summer school on integer and nonlinear programming*. New York: Academic, p. 8-20.
- DAVIS, L. D. (1991). *Handbook of genetic algorithms*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- DEJONG, K. A. (1975). *An analyses of the behavior of a class of genetic adaptive systems*. Ann Arbor, MI: PhD Thesis, University of Michigan.
- DREYFUS, S. E.; LAW, A. M. (1977). *The art and theory of dynamic programming*. *Mathematics in science and engineering*, v. 130, Academic Press Inc.

- DUAN, N.; MAYS, L. W.; LANSEY, K. E. (1990). *Optimal reability-based design of pumping and distribution systems*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 116, n. 2, p. 249-268.
- ESHELMAN, L. J.; SHAFFER, D. J. (1992). *Real-coded genetic algorithms and interval-schema*. In: WHITLEY, D; L. (ed). Foundations of genetic algorithms3. San Mateo, CA: Morgan Kaufman, p.187-203.
- FLETCHER. R.; REEVES, C. M. (1964). *Function minimization by conjugate directions*. Computational Journal, n. 7(2).
- FUERTES, V. S. y otros. (2002). *Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua*. Serviço de Publicación de la Universidad Politécnica de Valencia. Valencia: 1 ed.
- GALVÃO et al (1999). *Sistemas inteligentes-aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Porto Aleegre, RS: Editora da Universidade, UFRGS, 246p.
- GAMBALE, S. R. (2000). *Aplicação de algoritmo genético na calibração de redes de água*. São Paulo. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- GESSLER, J. ; WALSKI, T. M. (1985). Technical Report EL-85-11: *Water distribution system optimization*, DC, USA: U.S. Army Corps Engineers, Washington.
- GIBBS, M. S.; DANDY, G. C.; MAIER, H. R.; NIXON, J. B. (2005). *Selection of Genetic Algorithm Parameters for Water Distribution System Optimization*. World Water and Environmental Resources Congress, May 15–19, 2005, Anchorage, Alaska, USA
- GOLDBERG, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company.
- GOMES, H. P. (2004). *Sistemas de abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes elevatórias*. 2. edição João Pessoa: Editora Universitária-UFPB. 2004, 242p.
- GOMES, H. P. ; LEAL, A. F. (2000). *Dimensionamento de redes urbanas de abastecimento de água a partir do método de granados*. Anais do XIX Congresso Latinoamericano de Hidráulica. Cordoba: Asociación Internacional de Investigación e Ingeniería Hidráulica (IAHR), v.3. p. 183-192.
- GRANADOS, A. (1986). *Infraestructuras de Regadios - Redes Colectivas de Riego a Presión*. Madrid: Serviço de Publicación de E. T. S. I. de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.

- GREFENSTETTE, J. J. (1986). *Optimization of control parameters for genetic algorithms*. IEEE trans SMC., v. 16, p.122-128.
- GUERCIO, R.; XU, Z. (1997). *Linearized Optimization Model for Reliability-Based Design of Water Systems*. J. Hydr. Engrg., v. 123, n. 11, p. 1020-1026.
- HADLEY, G. (1964). *Nonlinear and dynamic programming*. Palo Alto: Addison Wesley.
- HALL, W. A.; BURAS, N. (1961). *The dynamic programming approach to water resources development*. J. Geophys. Res., 66(2), p.510-520.
- HALL, W. A.; DRACUP, J. A. (1970). *Water resources systems engineering*. New York: Mc-Graw Hill.
- HASTINGS, N. A. J. (1973). *Dynamic programming with management applications*. New York: Crane Russel
- HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E. (1998). *Practical genetic algorithms*. New York: Wiley-Interscience.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. (1995). *Introduction to operations research*. McGraw Hill Inc., sixth edition.
- HOLLAND, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor, MIT Press.
- HOWARD, R. A. (1960). *Dynamic programming and Markov process*. Cambridge MA: MIT Press.
- KARMARKAR, N (1984). *A new polynomial time algorithm for linear algorithm*. Combination, n. 4 p. 373-395.
- KARMEI, D.; GADISH, Y ; MEYERS, S. (1968). *Design of optimal water distribution networks*, Journal of Pipeline Division, ASCE New York, v. 94, n. 10, p. 1-10.
- KIM, J. H.; MAYS, L. W. (1994). *Optimal rehabilitation model for water-distribution systems*. J. Water Resour. Plng. and Mgmt., v. 120, n.5, p. 674-692.
- KLEINER, Y; ADAMS, B. J. (2001). *Water Distribution Network Renewal Planning*. J. Comp. in Civ. Engrg., v. 15, n. 1, p. 15-26
- KUHN, H. W.; TUCKER, A. W. (1951). *Nonlinear programming*. Proc. 2nd Berkeley Symp. Math. Statistics Probabilities, J. Neyman, Berkeley, California: University of California Press.
- "KUMAR, S. V.; DOBY, T. A.; BAUGH, J. W.; BRILL, E. D.; RANJITHAN, S. R. (2000). *Method for Least Cost Design of Looped Pipe Networks for Different Levels of*

*Redundancy Using Genetic Algorithms*. Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning & Management, July 30 – August 2, 2000, Minneapolis, Minnesota, USA

LANSEY, K.; MAYS, L. W. (1989). *Optimization model for water distribution system design*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 115, n. 10, p. 1401-1419.

LARSON, R. E.; CASTI, J. L. (1978). *Principles of dynamic programming*. Control and system theory. Basel: Marcel Dekker

LOCKS, D. D.; STEDINGER, J. R.; HAITH, D. A. (1981). *Water resources systems planning and analysis*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall Inc.

MAWER, P. A.; THORN, D. (1974). *Improved dynamic programming and their application to water resource systems*. Water resource research, 10(2), p. 183-190.

MAYER, G. E. (1968). *Properties of the conjugate gradient and Davidon methods*. J. Opt. Theory Appl.

MICHALEWICS, Z. (1992). *Genetic algorithms + Data structures = Evolution programs*. New York: Springer, 387p.

MICHALEWICS, Z.; ATTIA, N. (1994). *Evolutionary optimization of constrained problems*. In Proceedings of the Third Annual Conference on Evolutionary Programming, p. 98-108.

MITCHELL, T. M. (1998). *Machine Learning*. Mc-Graw Hill.

MORGAN, D. R.; GOULTER, I.C. (1985). *Optimal Urban Water Distribution Design*. Water resource research, v.21, n.5, p. 642-652.

NEMHAUSER, G. L. (1966). *Introduction to dynamic programming*. New York: John Wiley.

NETO, M. F. A. (2003). *Otimização de redes de distribuição de água por algoritmos genéticos*. Fortaleza. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Ceará.

OSTFELD, A.; KARPIKA, A. (2005). *A GA—LP Approach to Water Distribution Systems Optimal Design*. World Water and Environmental Resources Congress, May 15–19, 2005, Anchorage, Alaska, USA

PÉREZ, R.; MARTINEZ F.; VELA A. (1993). *Improved design of branched networks by using pressure-reducing valves*. J. Hydr. Engrg., v.119, n. 2, p. 164-180

POWELL, M. J. D. (1962). *An iterative method for finding stationary values*. Computer J., v. 5.

POWELL, M. J. D. (1966). *Numerical analyses*. London: J. Walsh (ed), Academic Press Inc.

- POWELL. M. J. D. (1969). *A method for nonlinear constraints in minimization problems*. London: R. Fletcher (ed), Academic Press Inc.
- POWELL. M. J. D. (1970). *A survey of numerical methods for unconstrained optimization*. SIAM Rev . p. 12-79.
- PRASAD, T. D.; PARK, N. (2004). *Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks*. J. Water Resour. Plng. and Mgmt., v. 130, n.1, p. 73-82
- ROSENBROCK, H. H. (1960). Computer J., p. 3-174.
- ROSSMAN, L. A. (2000). *EPANET 2 - Users Manual*. U. S. Environmental Protection Agency-EPA. Cincinnati, Ohio.
- SAKARYA, A. B. A.; MAYS, L. W. (2000). *Optimal Operation of Water Distribution Pumps Considering Water Quality*. J. Water Resour. Plng. and Mgmt., v. 126, n.4, p. 210-220.
- SAMANI, H. M. V.; MOTTAGHI, A. (2006). *Optimization of Water Distribution Networks Using Integer Linear Programming*. J. Hydr. Engrg., v. 132, n. 5, p. 501-509
- SAVIC, D. A.; HALHAL, D.; WALTERS, G. A.; OUAZAR, D. (1997). *Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm*. J. Water Resour. Plng. and Mgmt., v.123, n.3, p. 137-146
- SAVIC, D. A.; WALTERS, G.A. (1997). *Genetic Algorithms for Least-Cost Design of Water Distribution Networks*. J. Water Resour. Plng. and Mgmt., v. 123, n. 2, p. 67-77.
- SAVIC, D. A.; WALTERS, G.A.; SMITH, M. R.; ATKINSON, R.M.(2000). *Cost Savings on Large Water Distribution Systems: Design through Genetic Algorithm Optimization*. Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management, July 30 – August 2, 2000, Minneapolis, Minnesota, USA
- SHANNO, D. F. (1970). *An accelerated gradient projection method for linearly constrained nonlinear estimation*. SIAM J. Appl. Math., p. 18-322.
- SIMPSON, A. R.; DANDY, G. C.; MURPHY L. J. (1994). *Genetic Algorithms Compared to Other Techniques for Pipe Optimization*. J. Water Resource Plng. and Mgmt., v. 120, n.4, p. 423-443.
- SWANN, W. H. (1964). *Report on the development of a new direct search method of optimization*. Imperial Chemical Industries, Ltd. Central Instr. Lab. Res. Note 6413.
- SYSWERDA, G. (1989). *Schedule optimization using genetic algorithms*. In: DAVIS, L. D., *Handbook of genetic algorithms*. Van Nostrand Reinhold. P. 332-349.
- TAHER, S. A.; LABADIE, J. W. (1996). *Optimal Design of Water-Distribution Networks with GIS*. J. Water Resour. Plng. and Mgmt., v. 122, n. 4, p. 301-311.

- VAIREVAMOORTHY, K.; ALI, M. (2005). *Pipe Index Vector: A Method to Improve Genetic-Algorithm-Based Pipe Optimization*. J. Hydr. Engrg., v. 131, n. 12, p. 1117-1125
- VARMA, K. V. K.; NARASIMHAN, S.; BHALLAMUDI, S. M. (1997). *Optimal Design of Water Distribution Systems Using an NLP Method*. J. Envir. Engrg., v. 123, n.4, p. 381-388
- WALSKI, T. M.; CHASE, D. V.; SAVIC, D. A. (2003). *Advanced water distribution modeling and management*. Waterbury, CT USA: Haestad Press, chapter 2, Modeling Theory, p. 19-74.
- WHITLEY, D. L. (1992). *A genetic algorithm tutorial*. Technical report CS-93-103, Colorado State University.
- WILLIS, R.; YEH, W. W-G. (1987). *Groundwater systems planning and management*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall Inc.
- WRIGHT, T. M. (1991). *Genetic algorithms for real parameter optimization*. In Foundations of Genetic Algorithms 2 (FOGA-1), p. 205-218.
- WU, Z.; BOULOS, P.; SCHAETZEN, W., ORR, C. ; MOORE, M. (2001). *Using Genetic Algorithms for Water Distribution System Optimization*. World Water and Environmental Resources Congress, May 20–24, 2001, Orlando, Florida, USA
- ZANGWILL, W. I. (1969). *Convergence conditions for nonlinear programming algorithms*. Management Science.
- ZYL, J. E.; SAVIC, D. A.; WALTERS G. A. (2004) *Operational Optimization of Water Distribution Systems Using a Hybrid Genetic Algorithm*. J. Water Resour. Plng. and Mgmt., v. 130, n. 2, p. 160-170



## ANEXO A – LISTAGEM DO PROGRAMA SOSNET

Módulo1 - 1

```
'Programa ODRAGEP
Public Declare Function ENopen Lib "C:\Henrique\MESTRADO\TESE\ELABORACAO DO PROGRAMA\epanet2.dll" (
ByVal F1 As String, ByVal F2 As String, ByVal F3 As String) As Long
Public Declare Function ENclose Lib "C:\Henrique\MESTRADO\TESE\ELABORACAO DO PROGRAMA\epanet2.dll"
() As Long
Public Declare Function ENreport Lib "C:\Henrique\MESTRADO\TESE\ELABORACAO DO PROGRAMA\epanet2.dll"
() As Long
Public Declare Function ENSaveH Lib "C:\Henrique\MESTRADO\TESE\ELABORACAO DO PROGRAMA\epanet2.dll"
() As Long
Public Declare Function ENSolveH Lib "C:\Henrique\MESTRADO\TESE\ELABORACAO DO PROGRAMA\epanet2.dll"
() As Long
Public Declare Function ENgetlinkvalue Lib "C:\Henrique\MESTRADO\TESE\ELABORACAO DO PROGRAMA\epanet
2.dll" (ByVal Index As Long, ByVal Code As Long, Value As Single) As Long
Public Declare Function ENgetnodevalue Lib "C:\Henrique\MESTRADO\TESE\ELABORACAO DO PROGRAMA\epanet
2.dll" (ByVal Index As Long, ByVal Code As Long, Value As Single) As Long
Private Diam(500) As Integer 'Diam(n=1 to Ntub) Diametro do tubo em mm.
Private DiamMed(500, 500) As Variant 'Diametro médio do tubo(n) para geração (i)
Private FO(500, 500) As Variant 'FO(i=1 to Nint, k=1 to Npop) Soma  $D(i)^5/Q(i)^2/10^{10}$  pa
ra i=1 to Ntub
Private FOMin(500) As Variant 'Valor min de FO para geração (i)
Private FOMed(500) As Variant 'Valor med de FO para geração (i)
Private FOMax(500) As Variant 'Valor max de FO para geração (i)
Private CoefConv(500) As Variant 'Coef. de convergencia para geração (i) calculado como
Abs(FOMed(i) - FOMin(i)) / FOMed(i)
Private Crom(500, 500) As String 'Crom(i=1 to Nint, k=1 to Npop) Numero binario que repre
senta os diametros dos tubos da rede, uma solucao factivel (k)
Private MelhorCrom(500) As String 'Numero binario que representa o elemento mais apto da
geração i
Private FOB(500) As Variant 'FOB(n=1 to Ntub) valor  $D^5/Q^2/10^{10}$  para o tubo
Private J(500) As Variant 'J(n=1 to Ntub), Perda de carga unit[EPANET] (m/Km) no t
ubo, restrita  $J < 8m/Km$ 
Private Qlps(500) As Variant 'Qlps(n=1 to Ntub), Vazao l/s [EPANET] no tubo
Private AptAcum(500) As Variant 'AptAcum(k=1 to Npop)
Private NJ(500) As Integer 'Dispositivo que se ativado (NJ(n)=1) significa sair da
rotina pois mesmo  $c/D(n) = Dmax$ ,  $J(n) > Jmax$  por duas vezes no solve do Epanet
Private Ct(500) As Variant 'Custo de implantação(material+serviço) do Tubo
Private Cr(500, 500) As Variant 'Custo de implantação e operação da Rede
Private i As Integer 'Indice da Interacao ou Geracao, valor maximo de i=100
Private k As Integer 'Indice do Elemento da Populacao, valor maximo de k=100
Private Ntub As Integer 'Numero de tubos da rede(lido do arquivo Epanet)
Private Nnos As Integer 'Numero de nós da rede(lido do arquivo Epanet)
Private Diapolmax As Integer 'Diametro maximo da tubulacao em polegada, igual a 16"
Private Diapolmin As Integer 'Diametro maximo da tubulacao em polegada, igual a 1"
Private Pai1 As String 'Pai 1 selecionado para crossover
Private Pai2 As String 'Pai 2 selecionado para crossover
Private Filho1 As String 'Filho 1 obtido do crossover
Private Filho2 As String 'Filho 2 obtido do crossover
Private CromMut As String 'Elemento (binário) selecionado para mutação.
Private BitMut As Variant 'Bit (0 ou 1) que será trocado através da mutação.
Private PC As Integer 'Ponto de corte da cadeia para cruzamento
Private PM As Integer 'Ponto ou bit da cadeia que sofre a mutação.
Private Mascara As String * 4 'Número binário parâmetro para seleção de bits dos pais
no cruzamento tipo uniforme
Private String1 As String * 4 'Número binário utilizado para representar cada tubo (4
bits)do Pai1 no cruzamento uniforme
Private String2 As String * 4 'Número binário utilizado para representar cada tubo (4
bits)do Pai2 no cruzamento uniforme
Private Bit1 As String * 1 'Número binário utilizado para selecionar o bit do Pai1
no cruzamento uniforme
Private Bit2 As String * 1 'Número binário utilizado para selecionar o bit do Pai1
no cruzamento uniforme
Private Npop As Integer 'Numero de Elementos da Populacao, valor maximo de Npop
=100
Private Nint As Integer 'Numero de Interacoes ou Geracoes, valor maximo de Nint
=100
Private ProbCruz As Variant 'Probabilidade de cruzamento
Private ProbMut As Variant 'Probabilidade de mutação.
Private flagElit As Integer 'Dispositivo que se ativado (flagElit=1) adota elitismo
no processo.
Private flagNJ As Integer 'Dispositivo que se ativado (flagNJ=1) significa que ai
nda não foi atendida restrição hidráulica
Private flagCruzUnif As Integer 'Dispositivo que se ativado (flagCruzUnif=1) realiza cr
uzamento uniforme no processo.
Private CC As Variant 'Valor min. estabelecido para o Coef. Convergência, aba
ixo do qual há a geração aleatória da população em lugar do cruzamento da mesma.
```

Módulo1 - 2

```

Private CritParadaConv As Integer      'Critério de parada antecipada por convergência (repeti
ção do elemento mais apto pelo número de gerações estabelecido.
Private CritParadaProc As Integer      'Critério de parada antecipada por exceder o tempo de p
rocessamento estabelecido
Private TabDiam As Variant              'Tabela somente com os diâmetros selecionados no formul
ário de entrada de dados.
Private FormSel As String               'Fórmula selecionada (D-W/H-W/C-M)para processamento no
Epanet.
Private CoefRug As Variant              'Coeficiente de Rugosidade em função da fórmula (D-W =
e(mm);H-W = C;C-M = n).
Private Jmax As Variant                 'Valor máximo da Restrição Hidráulica da Perda de carga
unitária (m/Km).
Private Pmax As Variant                 'Valor máximo da Restrição Hidráulica da Pressão dos Nó
s (mca).
Private Pmin As Variant                 'Valor mínimo da Restrição Hidráulica da Pressão dos Nó
s (mca).
Private MinInicial As Variant           'Iniacializa o tempo (min) de Processamento.
Sub ODRAGEP()
    Workbooks("PROGRAMA.xls").Sheets("PARAMETROS").Select 'Associa os Parâmetros do AG às variávei
s do programa
    Npop = Cells(12, 2)
    Npop_aux = Npop
    Nint = Cells(12, 3)
    ProbCruz = Cells(12, 4)
    ProbMut = Cells(12, 5)
    flagElit = Cells(12, 6)
    flagCruzUnif = Cells(12, 7)
    CC = Cells(12, 8)
    CritParadaConv = Cells(12, 9)
    CritParadaProc = Cells(19, 9)
    TempoInicial = Timer
    MinInicial = TempoInicial / 60
    DataInicial = Date
    Diapolmax = Cells(29, 10)            'Associa os Parâmetros Hidráulicos às v
ariáveis do programa
    Diapolmin = Cells(30, 10)
    Set TabDiam = Range(Cells(12, 15), Cells(27, 15))
    FormSel = Cells(12, 11)
    CoefRug = Cells(12, 12)
    Jmax = Cells(12, 13)
    Pmin = Cells(12, 14)
    Pmax = Cells(19, 14)
    'Limpar o conteúdo das planilhas RELATORIO & POP INTERM
    Workbooks("PROGRAMA.xls").Sheets("RELATORIO").Select
    Cells.Select
    Selection.Clear
    Columns("C:C").Select
    Selection.NumberFormat = "@"
    Workbooks("PROGRAMA.xls").Sheets("POP_INTERM").Select
    Cells.Select
    Selection.Clear
    Columns("M:IT").Select
    Selection.NumberFormat = "@"
    Workbooks("PROGRAMA.xls").Sheets("GRAFICOS").Select
    Cells.Select
    Selection.Clear
    'Ordenacao dos tubos e dos nós pelo ID do arquivo Epanet e Configuração das informações do tipo da
fórmula de Cálculo e seu respectivo Coef. de Rugosidade.
    Workbooks.OpenText Filename:= _
        "C:\Henrique\MESTRADO\TESE\ELABORACAO DO PROGRAMA\ANEIS_1_10.inp", Origin:= _
        437, StartRow:=1, DataType:=xlDelimited, TextQualifier:=xlDoubleQuote, _
        ConsecutiveDelimiter:=False, Tab:=True, Semicolon:=False, Comma:=False, _
        Space:=False, Other:=False, FieldInfo:=Array(Array(1, 1), Array(2, 1), _
        Array(3, 1), Array(4, 1), Array(5, 1)), TrailingMinusNumbers:=True
    Sheets("ANEIS_1_10").Select
    Cells.Find(What:="[JUNCTIONS]", after:=ActiveCell, LookIn:=xlFormulas, _
        LookAt:=xlPart, SearchOrder:=xlByRows, SearchDirection:=xlNext, _
        MatchCase:=False, SearchFormat:=False).Activate
    ActiveCell.Offset(2, 0).Select
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
    Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
    Selection.Sort Key1:=Columns("A"), Order1:=xlAscending, Header:=xlNo, _
        OrderCustom:=1, MatchCase:=False, Orientation:=xlTopToBottom, _
        DataOption1:=xlSortNormal
    Cells.Find(What:="[JUNCTIONS]", after:=ActiveCell, LookIn:=xlFormulas, _

```

Módulo 1 - 3

```

        LookAt:=xlPart, SearchOrder:=xlByRows, SearchDirection:=xlNext, _
        MatchCase:=False, SearchFormat:=False).Activate
    Selection.End(xlDown).Select
    Nnos = ActiveCell.Value 'Leitura do Nnos através do arquivo Epanet
    Cells.Find(What:="[PIPIES]", after:=ActiveCell, LookIn:=xlFormulas, _
    LookAt:=xlPart, SearchOrder:=xlByRows, SearchDirection:=xlNext, _
    MatchCase:=False, SearchFormat:=False).Activate
    ActiveCell.Offset(2, 0).Select
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
    Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
    Selection.Sort Key1:=Columns("A"), Order1:=xlAscending, Header:=xlNo, _
    OrderCustom:=1, MatchCase:=False, Orientation:=xlTopToBottom, _
    DataOption1:=xlSortNormal
    Cells.Find(What:="[PIPIES]", after:=ActiveCell, LookIn:=xlFormulas, _
    LookAt:=xlPart, SearchOrder:=xlByRows, SearchDirection:=xlNext, _
    MatchCase:=False, SearchFormat:=False).Activate
    Selection.End(xlDown).Select
    Ntub = ActiveCell.Value 'Leitura do Ntub através do arquivo Epanet
    Cells.Find(What:="[PIPIES]", after:=ActiveCell, LookIn:=xlFormulas, _
    LookAt:=xlPart, SearchOrder:=xlByRows, SearchDirection:=xlNext, _
    MatchCase:=False, SearchFormat:=False).Activate
    ActiveCell.Offset(2, 5) = CoefRug 'Configura o arquivo EPANET para o Coef. Rugosidade inerent
e a formula selecionada (D-W,H-W,C-M)
    ActiveCell.Offset(2, 5).Activate
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
    Selection.FillDown
    Cells.Find(What:="[OPTIONS]", after:=ActiveCell, LookIn:=xlFormulas, _
    LookAt:=xlPart, SearchOrder:=xlByRows, SearchDirection:=xlNext, _
    MatchCase:=False, SearchFormat:=False).Activate
    ActiveCell.Offset(2, 1) = FormSel 'Configura o arquivo EPANET para a formula selecionada (D-W
,H-W,C-M)
    Sheets("ANEIS 1_10").Range("a1").Select
    Workbooks("ANEIS_1_10.inp").Save
    Nconv = 0 'Contador de repetições sequenciaia da melhor solução nas geraçõ
es.
'Inicio das interações ou gerações.
    For i = 1 To Nint
        If Date = DataInicial Then 'Cálculo do tempo de processamento (minutos) a cada
        geração.
            MinProc = Timer / 60 - MinInicial
        Else
            MinProc = Timer / 60 + (Day(Date) - DataInicial) * 1440 - MinInicial
        End If
        If Nconv = CritParadaConv = 1 Then 'Parada e saída do programa se o critério de parada
        por convergência (repetições da melhor solução por varias gerações for atendido.
            MsgBox "Parada do Processamento, pelo Critério de Convergência. A Melhor Solução " & FO
min(i - 1) & " , Repetiu-se por " & (Nconv + 1) & " Gerações.", vbExclamation
        End If
        End If
        If CritParadaProc <> 0 Then 'Parada e saída do programa se o critério de tempo
        de processamento (min) for excedido.
            If MinProc > CritParadaProc Then
                MsgBox "Parada do Processamento, pelo Critério de Tempo Limite de Cálculo Excedido.
                " & MinProc & " Minutos Processados.", vbExclamation
            End If
        End If
        End If
        Call Cabecalho(i)
        If i < (Nint / 2) + 1 Then
            Npop = 100
        Else
            Npop = Npop_aux
        End If
        If i = 1 Or CoefConv(i - 1) < CC Then 'Gera a populacao aleatoriamente para primeira gera
ção ou quando Coef.Conv<CC estabelecido
            k = 1
            flagNJ = 1 'O valor de flagNJ=1 (ativado), significa que vetor
            diametro(Ntub) pode não atender as restrições hidráulicas (Jmax,Pmin,Pmax)
            Call FuncaoObjetivo(i, k, flagNJ) 'Adota o 1º elemento da população com os diâmetros
            da estimativa inicial ou o mais apto da geração anterior
            For k = 2 To Npop
                flagNJ = 1 'Enquanto o valor de flagNJ retornado da Function F
                unçãoObjetivo for 1 Gerar randomicamente
                Do While flagNJ = 1 'os diâmetros dos tubos para o elemento k, com seme
                nte baseada no relógio do sistema.

```



Módulo1 - 4

```

Workbooks("ANEIS_1_10.inp").Sheets("ANEIS_1_10").Activate
Cells.Find(What:="[PIPIES]", after:=ActiveCell, LookIn:=xlFormulas, _
    LookAt:=xlPart, SearchOrder:=xlByRows, SearchDirection:=xlNext, _
    MatchCase:=False, SearchFormat:=False).Activate
For n = 1 To Ntub
    Randomize 'relogio do sistema.
    Diam(n) = Int((Diapolmax - Diapolmin + 1) * Rnd + Diapolmin) * 25
    Diam(n) = Application.WorksheetFunction.VLookup(Int(Diam(n)), TabDiam, 1)
    If Diam(n) < Int(Diapolmin * 25) Then Diam(n) = Diapolmin * 25
    If Diam(n) > Int(Diapolmax * 25) Then Diam(n) = Diapolmax * 25
    ActiveCell.Offset(n + 1, 4).Value = Int(Diam(n))
Next
Sheets("ANEIS_1_10").Range("a1").Select
Workbooks("ANEIS_1_10.inp").Save
Call FuncaoObjetivo(i, k, flagNJ)
Loop
Next
Else 'Obtem a população pelo cruzamento.
Workbooks("PROGRAMA.xls").Sheets("POP_INTERM").Activate
mlinha = Range("A65536").End(xlUp).Row - Npop + 1
Cells(mlinha, 1).Select
For k = 1 To Npop
    flagNJ = 1
    Do While flagNJ = 1
        m = 1 'Indexador do bit inicial do tubo (4 bits), que varia de 4 em 4 bits
        mcoluna = 21
        Workbooks("PROGRAMA.xls").Sheets("POP_INTERM").Activate
        For n = 1 To Ntub 'Rotina que fragmenta o cromossomo (128bits = rede em strings (4bits = cada tubo).
            Cells(mlinha, mcoluna) = Mid(Cells(mlinha, 13), m, 4)
            Cells(mlinha, mcoluna + 1).FormulaR1C1 = "=IF(RC[-1]=0,500,(bin2dec(RC[-1]))+1)*25)"
            Diam(n) = Cells(mlinha, mcoluna + 1).Value
            Diam(n) = Application.WorksheetFunction.VLookup(Int(Diam(n)), TabDiam, 1)
            m = m + 4
            mcoluna = mcoluna + 2
        Next
        Workbooks("ANEIS_1_10.inp").Sheets("ANEIS_1_10").Activate
        Cells.Find(What:="[PIPIES]", after:=ActiveCell, LookIn:=xlFormulas, _
            LookAt:=xlPart, SearchOrder:=xlByRows, SearchDirection:=xlNext, _
            MatchCase:=False, SearchFormat:=False).Activate
        For n = 1 To Ntub 'Armazena no arquivo do Epanet os diâmetros das tubulações
            ActiveCell.Offset(n + 1, 4).Value = Int(Diam(n))
        Next
        mlinha = mlinha + 1
        Sheets("ANEIS_1_10").Range("a1").Select
        Workbooks("ANEIS_1_10.inp").Save
        Call FuncaoObjetivo(i, k, flagNJ)
    Loop
Next
End If
Call CrossoverMutacao(i, k)
If CritParadaConv <> 0 Then
    If i = 1 Then MelhorCrom(i - 1) = 0
    If MelhorCrom(i) = MelhorCrom(i - 1) Then
        Nconv = Nconv + 1
    Else
        Nconv = 0
    End If
End If
End If
'Dados para gráficos
Workbooks("PROGRAMA.xls").Sheets("GRAFICOS").Activate
If i = 1 Then 'Cabeçalho
    Cells(1, 1) = "ITER\TUBOS"
    Cells(1, 2) = "FOMin(i)"
    Cells(1, 3) = "FOMed(i)"
    Cells(1, 4) = "FOMax(i)"
    Cells(1, 5) = "Coef.Conv."
    colunaGD = 6
    For n = 1 To Ntub
        Cells(1, colunaGD) = n
        colunaGD = colunaGD + 1
    Next

```

Módulo1 - 5

```

End If
linhaG = 1 + Range("A65536").End(xlUp).Row
Cells(linhaG, 1) = i 'Preenchimento dos dados para gráficos
Cells(linhaG, 2) = FOMin(i)
Cells(linhaG, 3) = FOMed(i)
Cells(linhaG, 4) = FOMax(i)
Cells(linhaG, 5) = CoefConv(i)
colunaG = 6
For n = 1 To Ntub
    Cells(linhaG, colunaG) = DiamMed(i, n)
    colunaG = colunaG + 1
Next
Next
Cells(linhaG + 1, 1) = "Tempo de Proces.="
If Date = DataInicial Then
    Cells(linhaG + 1, 2) = Timer / 60 - MinInicial
Else
    Cells(linhaG + 1, 2) = Timer / 60 + (Day(Date) - DataInicial) * 1440 - MinInicial
End If
MsgBox "FIM DO PROCESSAMENTO.", vbExclamation
End Sub
Function Cabecalho(i As Integer) As Variant
Workbooks("PROGRAMA.xls").Sheets("RELATORIO").Activate
linhafinal = 1 + Range("A65536").End(xlUp).Row
Cells(linhafinal, 1).Value = "i="
Cells(linhafinal, 2).Value = i
Cells(linhafinal + 1, 1).Value = Now
Cells(linhafinal + 1, 3).Value = "n"
Cells(linhafinal + 2, 1).Value = "k"
Cells(linhafinal + 2, 2).Value = "FO(i,k)"
Cells(linhafinal + 2, 3).Value = "CROM(i,k)"
Cells(linhafinal + 1, 4).Select
linha = ActiveCell.Row
coluna = ActiveCell.Column
For n = 1 To Ntub
    Range(ActiveCell.Offset(1, 0), ActiveCell.Offset(1, 3)).Value = Array("J", "Q", "D", "DBIN")
)

ActiveCell.Value = n
Range(ActiveCell, ActiveCell.Offset(0, 3)).Select
With Selection
    .HorizontalAlignment = xlCenter
    .VerticalAlignment = xlBottom
    .WrapText = False
    .Orientation = 0
    .AddIndent = False
    .IndentLevel = 0
    .ShrinkToFit = False
    .ReadingOrder = xlContext
    .MergeCells = False
End With
Selection.Merge
coluna = coluna + 4
Cells(linha, coluna).Select
Next
Cells(linha, coluna) = "HMan"
Cells(linha, coluna + 1) = "Custo Imp&Oper"
Cells(linha, coluna + 2) = "FO(i, k)"
End Function
Function FuncaoObjetivo(i As Integer, k As Integer, flagNJ As Integer) As Variant
'Function para balanceamento das vazoes e pressoes (Simulador Epanet), retornando o valor da funcao
'objetivo para o elemento da populacao (k) da geracao (i) registrando os dados na planilha RELATORIO
.
Dim NJ As Range 'NJ representa os tubos da rede que não atenderam a restrição J (m/Km)
Workbooks("ANEIS_1_10.inp").Sheets("ANEIS_1_10").Activate
For n = 1 To Ntub
    NJ(n) = 0
Next
flagit = 0
Do While flagNJ = 1 'Enquanto flagNJ=1 significa que a restricao J(n)<Jmax estabelecido não
foi atendida para todos os tubos
    flagNJ = 0
    FO(i, k) = 0
    Cr(i, k) = 0
    NDmod = 0 'Número de Diâmetros (tubos) modificados na iteração Do While
    ENopen "C:\Henrique\MESTRADO\TESE\ELABORACAO DO PROGRAMA\ANEIS_1_10.inp", "C:\Henrique\MEST

```

Módulo1 - 6

```

RADO\TESE\ELABORACAO DO PROGRAMA\ANEIS_1_10.rpt", "C:\Henrique\MESTRADO\TESE\ELABORACAO DO PROGRAMA
\ANEIS_1_10.bin"
    ENSolveH          'Simulação do Epanet para os valores e parâmetros contidos no arquivo "
ANEIS_1_10.inp"
    ENSaveH
    ENreport
    Cells.Find(What:="[PIPIES]", after:=ActiveCell, LookIn:=xlFormulas, _
        LookAt:=xlPart, SearchOrder:=xlByRows, SearchDirection:=xlNext, _
        MatchCase:=False, SearchFormat:=False).Activate
    For n = 1 To Ntub
        'Rotina para identificar os tubos que não atendem à
        restrição J(n) < Jmax
        ENgetlinkvalue n, 10, Hf          'Retorna do Epanet a perda de carga (Hf) no tubo(n)
        ENgetlinkvalue n, 1, l            'Retorna do Epanet o comprimento (l) do tubo(n)
        J(n) = (Hf / l) * 1000            'Calcula a perda de carga unit. (Hf/l) do tubo(n)
        ENgetlinkvalue n, 0, D            'Retorna do Epanet o diâmetro (D) do tubo(n)
        Diam(n) = D                     'Indexa Diam(n) igual ao diâmetro retornado do Epane
t
        ENgetlinkvalue n, 8, Q            'Retorna do Epanet a vazão (Q) do tubo(n)
        If FormSel = "D-W" Then          'Calcula o diâmetro (Dmm) para que J(n)=Jmax na form
ula D-W.
            f = (J(n) / 1000) * (D / 1000) ^ 5 / ((Q / 1000) ^ 2 * 0.0827)
            Dmm = (0.0827 * f * (Q / 1000) ^ 2 / (Jmax / 1000)) ^ (1 / 5) * 1000
        Else
            'Calcula o diâmetro (Dmm) para que J(n)=Jmax na form
ula H-W.
            C = (10.643 * (Abs(Q) / 1000) ^ 1.85 / (J(n) / 1000 * (D / 1000) ^ 4.87)) ^ (1 / 1.
85)
            Dmm = (10.643 * (Abs(Q) / 1000) ^ 1.85 / (Jmax / 1000 * C ^ 1.85)) ^ (1 / 4.87) * 1
000
        End If
        If Dmm < Int(Diapolmin * 25) Then Dmm = Int(Diapolmin * 25)
        If Dmm > Int(Diapolmax * 25) Then Dmm = Int(Diapolmax * 25)
        If J(n) > Jmax Then
            If Int(D) < Int(Diapolmax * 25) Then 'Procedimento de aumentar o diâmetro, reali
zado desde que o mesmo esteja
                Diam(n) = Round(Dmm / 25, 0) * 25 'menor que o máximo estabelecido,
                Diam(n) = Application.WorksheetFunction.VLookup(Diam(n), TabDiam, 1)
                If Diam(n) - Round(D, 0) < 24.9 And Diam(n) < Int(Diapolmax * 25) Then 'Increm
enta o diâmetro de 25mm, até o limite do máximo diâmetro estabelecido, pois o
                Diam(n) = Application.WorksheetFunction.VLookup(Int(Diam(n) + 25), TabDiam,
1) 'procedimento acima forneceu o mesmo diâmetro do tubo
            End If
            NDmod = NDmod + 1
            If Diam(n) = Int(Diapolmax * 25) Then
                If NJ(n) = 1 Then 'Encerra a Function, pois mesmo com o diâmetro máximo a
dmitido a restrição J(n) < Jmax
                    ENclose          'não pode ser atendida.
                    Sheets("ANEIS_1_10").Range("a1").Select
                    Workbooks("ANEIS_1_10.inp").Save
                    flagNJ = 1
                    Exit Function
                Else
                    NJ(n) = 1
                End If
            End If
        Else
            If NJ(n) = 1 Then
                If NJ(n) = 1 Then 'Encerra a Function, pois m
e mesmo com o diâmetro máximo admitido a restrição J(n) < Jmax
                    ENclose          'não pode ser atendida.
                    Sheets("ANEIS_1_10").Range("a1").Select
                    Workbooks("ANEIS_1_10.inp").Save
                    flagNJ = 1
                    Exit Function
                Else
                    NJ(n) = 1
                End If
            End If
        End If
        ActiveCell.Offset(n + 1, 4).Value = Int(Diam(n)) 'Escreve no arquivo "ANEIS_1_10.inp"
o novo diâmetro do tubo(n) para ser posteriormente analisado
    Next
    flagit = 1
    Sheets("ANEIS_1_10").Range("a1").Select
    Workbooks("ANEIS_1_10.inp").Save
    If NDmod = 0 Then
        For m = 1 To Nnos
            'Identifica o nó com menor carga hidráulica (menorH).

```



Módulo 1 - 7

```

        ENgetnodevalue m, 10, Hm      'Retorna o valor carga hidráulica (Hm) do nó(m) do Epan
et
        If m = 1 Then
            menorHm = Hm
            primHm = Hm                'O primeiro nó (mais próximo da fonte)
        End If
        If Hm < menorHm Then menorHm = Hm 'Verifica e identifica a menor carga hidráulica d
os Nnos da rede
    Next
    ENclose
    Hman = Pmin + primHm - menorHm    'Otimiza minimizando a alt. man. suficiente p/ atende
r a restrição hidráulica onde o nó(m) mais desfavorável tenha P(m)=Pmin estabelecida
    Sheets("ANEIS_1_10").Range("a1").Select
    Cells.Find(Whati="PUMP:", after:=ActiveCell, LookIn:=xlFormulas, _
        LookAt:=xlPart, SearchOrder:=xlByRows, SearchDirection:=xlNext, _
        MatchCase:=False, SearchFormat:=False).Activate
    ActiveCell.Offset(1, 2).Value = Hman 'Escreve no arquivo "ANEIS_1_10.inp" a nova Hma
n da rede
    Workbooks("ANEIS_1_10.inp").Save

    'Novamente o Epanet Balancea vazões e press
ões com Hman otimizada
    ENopen "C:\Henrique\MESTRADO\TESE\ELABORACAO DO PROGRAMA\ANEIS_1_10.inp", "C:\Henrique\
MESTRADO\TESE\ELABORACAO DO PROGRAMA\ANEIS_1_10.rpt", "C:\Henrique\MESTRADO\TESE\ELABORACAO DO PROG
RAMA\ANEIS_1_10.bin"
    ENSolveH
    ENsaveH
    ENreport
    SomaQn = 0
    For m = 1 To Nnos                'Identifica o nó com maior carga hidráulica (maiorH)
        ENgetnodevalue m, 10, Hm
        ENgetnodevalue m, 1, Qn
        If m = 1 Then
            maiorHm = Hm
            maiorNo = m
        End If
        If Hm > maiorHm Then
            maiorHm = Hm
            maiorNo = m
        End If
        SomaQn = SomaQn + Qn
    Next
    If maiorHm > Pmax Then 'Verificação da restrição hidráulica onde o nó(m) com maior pre
ssão tenha P(m)<Pmax
        MsgBox "A restrição da Max. Pressão Admissível para os Nós, não pode ser atendida.
O nó " & maiorNo & " apresentou pressão=" & maiorHm & " mca. ", vbExclamation, "Tente entrando com
menor valor para a Max. Perd. Carga Unit Adm."
    End If
    End If
    For n = 1 To Ntub                'Processamento da Função Objetivo e armazenamento das variáveis
de decisão.
        ENgetlinkvalue n, 0, D
        Diam(n) = D
        ENgetlinkvalue n, 8, Q
        Qlps(n) = Q
        '
        FOB(n) = (D ^ 5 / Q ^ 2) / 100000000000#                'Usar esta linha para o caso da
Função objetivo 01 - com enfoque na eficiência da seção
        FO(i, k) = FO(i, k) + FOB(n)                'Usar esta linha para o caso da
Função objetivo 01 - com enfoque na eficiência da seção
        Ct(n) = (D ^ 5 / Q ^ 2) / 100000000000#                'Usar esta linha para o caso da
Função objetivo 02 - com enfoque no mínimo custo de implantação e bombeamento
        Cr(i, k) = Cr(i, k) + Ct(n)                'Usar esta linha para o caso da
Função objetivo 02 - com enfoque no mínimo custo de implantação e bombeamento
        ENgetlinkvalue n, 1, l
        Ct(n) = (0.0013 * D ^ 2 + 0.0288 * D + 28.462) * l 'Usar esta linha para o caso da
Função objetivo 01 - com enfoque na eficiência da seção
        Cr(i, k) = Cr(i, k) + Ct(n)                'Usar esta linha para o caso da
Função objetivo 01 - com enfoque na eficiência da seção
        FOB(n) = (0.0013 * D ^ 2 + 0.0288 * D + 28.462) * l 'Usar esta linha para o caso da
Função objetivo 02 - com enfoque no mínimo custo de implantação e bombeamento
        FO(i, k) = FO(i, k) + FOB(n)                'Usar esta linha para o caso da
Função objetivo 02 - com enfoque no mínimo custo de implantação e bombeamento
    Next
    FO(i, k) = (FO(i, k) + (9.81 * (SomaQn / 1000) * 13 * 365 * 0.2 / 0.75) * Hman * 11.13)
/ 1000 'Valores em mil reais
    ENclose

```

Módulo1 - 8

```

        Sheets("ANEIS_1_10").Range("a1").Select
        Workbooks("ANEIS_1_10.inp").Save
    Else
        flagNJ = 1
    EndClose
End If
Loop
Workbooks("PROGRAMA.xls").Sheets("RELATORIO").Activate
linha = Range("A65536").End(xlUp).Row + 1
coluna = 4
Crom(i, k) = ""
For n = 1 To Ntub
    Cells(linha, coluna).Value = J(n)
    Cells(linha, coluna + 1).Value = Qlps(n)
    Cells(linha, coluna + 2).Value = Round(Diam(n), 0)
    If Round(Diam(n), 0) / 25 > 16 Then
        StringTubo = Application.WorksheetFunction.Dec2Bin(Round(0, 0), 4)
        Cells(linha, coluna + 3).Value = StringTubo
    Else
        StringTubo = Application.WorksheetFunction.Dec2Bin(Round(Diam(n) / 25, 0) - 1, 4)
        Cells(linha, coluna + 3).Value = StringTubo
    End If
    Crom(i, k) = Crom(i, k) + StringTubo
    coluna = coluna + 4
Next
Cells(linha, coluna).Value = Hman
Cells(linha, coluna + 1).Value = Cr(i, k) + (9.81 * (SomaQn / 1000) * 10 * 365 * 0.2 / 0.75) *
Hman * 11.13 'Usar esta linha para o caso da Função objetivo 01 - com enfoque na eficiência da
seção
Cells(linha, coluna + 1).Value = Cr(i, k)
Cells(linha, coluna + 2).Value = FO(i, k)
Cells(linha, 1).Value = k
Cells(linha, 2).Value = FO(i, k)
Cells(linha, 3).Value = Crom(i, k)
If k = Npop Then
    colunad = 6
    For n = 1 To Ntub
        DiamMed(i, n) = Application.WorksheetFunction.Average(Range(Cells(linha - Npop + 1, colunad), Cells(linha, colunad)))
        colunad = colunad + 4
    Next
    FOMin(i) = Application.WorksheetFunction.Min(Range(Cells(linha - Npop + 1, 2), Cells(linha, 2)))
    FOMed(i) = Application.WorksheetFunction.Average(Range(Cells(linha - Npop + 1, 2), Cells(linha, 2)))
    FOMax(i) = Application.WorksheetFunction.Max(Range(Cells(linha - Npop + 1, 2), Cells(linha, 2)))
    CoefConv(i) = Abs(FOMed(i) - FOMin(i)) / FOMed(i)
End If
End Function
Function CrossoverMutacao(i As Integer, k As Integer) As Variant
    Workbooks("PROGRAMA.xls").Sheets("RELATORIO").Activate 'Ordenacao Crescente dos elementos da p
opulacao pelo valor da funcao objetivo
    linha = Range("A65536").End(xlUp).Row - Npop + 1
    Cells(linha, 1).Select
    Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
    Selection.Sort Key1:=Cells(linha, 2), Order1:=xlAscending, Header:=xlNo, _
        OrderCustom:=1, MatchCase:=False, Orientation:=xlTopToBottom, _
        DataOption:=xlSortNormal
    If CoefConv(i) < CC Then 'Coef. Convergência definirá se a população será gerada, neste caso
esta rotina salva o melhor
        coluna = 6
        'elemento no arquivo EPANET "Elitismo"
        For n = 1 To Ntub
            Diam(n) = Cells(linha, coluna)
            coluna = coluna + 4
        Next
        Workbooks("ANEIS_1_10.inp").Sheets("ANEIS_1_10").Activate
        Cells.Find(What:="[PIPER]", after:=ActiveCell, LookIn:=xlFormulas, _
            LookAt:=xlPart, SearchOrder:=xlByRows, SearchDirection:=xlNext, _
            MatchCase:=False, SearchFormat:=False).Activate
        For n = 1 To Ntub
            ActiveCell.Offset(n + 1, 4).Value = Diam(n)
        Next
        Sheets("ANEIS_1_10").Range("a1").Select

```



Módulo 1 - 9

```

        Workbooks("ANEIS_i_10.inp").Save
    End If
    Workbooks("PROGRAMA.xls").Sheets("POP_INTERM").Activate
    linha = Range("A65536").End(xlUp).Row + 1
    Cells(linha, 1).Select
    For k = 1 To Npop
        If k = 1 Then
            Cells(linha, 1).Value = "i="
            Cells(linha, 2).Value = i
            Cells(linha + 2, 1).Value = "Apt. Acum."
            Cells(linha + 2, 2).Value = "k"
            Cells(linha + 2, 3).Value = "Crom(i,k)"
            Cells(linha + 2, 4).Value = "FO(i,k)"
            Cells(linha + 2, 5).Value = "Aptidao"
            Cells(linha + 2, 6).Value = "NumRandom"
            Cells(linha + 2, 7).Value = "SelRandom"
            Cells(linha + 2, 8).Value = "ElemSelPop"
            Cells(linha + 2, 9).Value = "ElemSelCros"
            Cells(linha + 2, 10).Value = "ElemSelMut"
            Cells(linha + 2, 12).Value = "PontoMutacao"
            If flagCruzUnif = 0 Then
                Cells(linha + 2, 11).Value = "PontoCorte"
            Else
                Cells(linha + 2, 11).Value = "Mascara"
            End If
            linha = linha + 3
        End If
        Cells(linha, 2).FormulaR1C1 = "=RELATORIO!RC[-1]"
        Cells(linha, 3).FormulaR1C1 = "=RELATORIO!RC"
        Cells(linha, 4).FormulaR1C1 = "=RELATORIO!RC[-2]"
        Cells(linha, 5).Value = 2 * (Npop - k) / (Npop - 1)
        If k = 1 Then
            Cells(linha, 1).Value = "=RC[4]"
            MelhorCrom(i) = Cells(linha, 3)
        Else
            Cells(linha, 1).Value = "=R[-1]C+RC[4]"
        End If
        Randomize
        Cells(linha, 6).Value = Rnd
        Cells(linha, 7).Value = Cells(linha, 6).Value * Npop
        If Cells(linha, 7).Value < 2 Then Cells(linha, 7).Value = 2
        linha = linha + 1
    Next
    linha = Range("A65536").End(xlUp).Row - Npop + 1
    Set Tabela = Range(Cells(linha, 1), Cells(linha + Npop - 1, 5))
    For k = 1 To Npop
        Cells(linha, 8).Value = Application.WorksheetFunction.VLookup(Cells(linha, 7), Tabela, 2)
        If Cells(linha, 6).Value < ProbCruz Then Cells(linha, 9).Value = Application.WorksheetFunction.VLookup(Cells(linha, 7), Tabela, 2)
        linha = linha + 1
    Next
    linha = Range("A65536").End(xlUp).Row - Npop + 1
    flagpai = 0
    If flagCruzUnif = 0 Then
        Columns("P:P").Select
        Selection.NumberFormat = "0"
        Columns("T:T").Select
        Selection.NumberFormat = "0"
        For k = 1 To Npop
            If Cells(linha, 9).Value = 0 Then
                Cells(linha, 13).Value = Crom(i, Cells(linha, 8))
            Else
                If flagpai = 0 Then
                    ha elemento para cruzamento
                    l1 = linha
                    Pai1 = Crom(i, Cells(l1, 9))
                    Cells(l1, 13).Value = Pai1
                    elemento para formação do par
                    flagpai = 1
                Else
                    selecionado um elemento
                    l2 = linha
                    Pai2 = Crom(i, Cells(l2, 9))
                End If
            End If
        Next
    End If
    'Cruzamento tipo Clássico
    'Rotina do Cruzamento
    'Elemento nao selecionado para cruzamento
    'Elemento selecionado para cruzamento
    'flagpai=0 implica que do par atual, ainda nao
    'Mantem o Pai1, no caso de nao haver mais outro
    'flagpai=1 implica que do par atual, ja foi sel

```

Módulo1 - 10

```

        flagpai = 0                                'Retorno a situacao de nenhum elemento do par s
elecionado.
        Randomize
        PC = Int((Ntub * 4) * Rnd) + 1 'Gera o único ponto de corte
        If PC = 0 Then PC = 1
        Cells(11, 11).Value = PC
        Cells(12, 11).Value = PC
        Cells(11, 14) = Left(Pai1, PC)
        Cells(11, 15) = Right(Pai2, Ntub * 4 - PC)
        Cells(12, 14) = Left(Pai2, PC)
        Cells(12, 15) = Right(Pai1, Ntub * 4 - PC)
        Cells(11, 16).FormulaR1C1 = "=CONCATENATE(RC[-2],RC[-1])"
        Cells(12, 16).FormulaR1C1 = "=CONCATENATE(RC[-2],RC[-1])"
        Filho1 = Cells(11, 16).Value
        Filho2 = Cells(12, 16).Value
        Cells(11, 13).Value = Filho1                ' Cruzamento realizado para o filho1
        Cells(12, 13).Value = Filho2                ' Cruzamento realizado para o filho2
    End If
End If
linha = linha + 1
Next
Else                                            'Cruzamento tipo Uniforme
    For k = 1 To Npop
        If Cells(linha, 9).Value = 0 Then      'Elemento nao selecionado para cruzamento
            Cells(linha, 13).Value = Crom(1, Cells(linha, 8))
        Else
            If flagpai = 0 Then
                l1 = linha
                Pai1 = Crom(1, Cells(l1, 9))
                Cells(l1, 13).Value = Pai1        'Mantem o Pai1,no caso de nao haver mais outro
elemento para formação do par
                flagpai = 1
            Else
                l2 = linha
                Pai2 = Crom(1, Cells(l2, 9))
                flagpai = 0                        'Retorno a situacao de nenhum elemento do par s
elecionado.
                m = 1
                Filho1 = ""
                Filho2 = ""
                For n = 1 To Ntub
                    Randomize
                    Mascara = Application.WorksheetFunction.Dec2Bin(Int((15 - 0) * Rnd + 0), 4)
                    String1 = Mid(Pai1, m, 4)
                    String2 = Mid(Pai2, m, 4)
                    For Nbit = 1 To 4
                        If Mid(Mascara, Nbit, 1) = 1 Then
                            Bit1 = Mid(String1, Nbit, 1)
                            Bit2 = Mid(String2, Nbit, 1)
                        Else
                            Bit1 = Mid(String2, Nbit, 1)
                            Bit2 = Mid(String1, Nbit, 1)
                        End If
                        Filho1 = Filho1 + Bit1
                        Filho2 = Filho2 + Bit2
                    Next
                    m = m + 4
                Next
                Cells(l1, 11).Value = Mascara
                Cells(l2, 11).Value = Mascara
                Cells(11, 16).Value = Filho1        ' Cruzamento realizado para o filho1
                Cells(12, 16).Value = Filho2        ' Cruzamento realizado para o filho2
                Cells(11, 13).Value = Filho1
                Cells(12, 13).Value = Filho2
            End If
        End If
        linha = linha + 1
    Next
End If
linha = Range("A65536").End(xlUp).Row - Npop + 1
For k = 1 To Npop                                'Rotina da mutacao
    CromMut = Cells(linha, 13)
    For PM = 1 To Ntub * 4
        Randomize
        ProbMutBit = Rnd

```

```

Módulo1 - 11

    If ProbMutBit < ProbMut Then
        BitMut = Mid(CromMut, PM, 1)
        If BitMut = 0 Then
            BitMut = 1
        Else
            BitMut = 0
        End If
        Cells(linha, 13).Value = Left(CromMut, PM - 1) & BitMut & Right(CromMut, Ntub * 4 -
PM)
    End If
Next
If k = Npop And flagElit = 1 Then
    Cells(linha, 13).Value = MelhorCrom(i) 'Mantem o elemento com maior aptidao para proxim
a geracao "Elitismo".
    Cells(linha, 8).Value = "Elitismo"
End If
linha = linha + 1
Next
End Function

```