

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ÁREA DE ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS

**OPERAÇÃO DE REDES DE ESCOAMENTO DE PETRÓLEO
UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO MULTI-OBJETIVO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ÉRICA CRISTINE MEDEIROS NOBRE MACHADO

Campina Grande – PB

Maio / 2006

ÉRICA CRISTINE MEDEIROS NOBRE MACHADO

**OPERAÇÃO DE REDES DE ESCOAMENTO DE PETRÓLEO
UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO MULTI-OBJETIVO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para a obtenção do Título de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA HIDRÁULICA

ORIENTADORES: CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO

FRANCISCO VILAR BRASILEIRO

Campina Grande – PB

Maio / 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M149o Machado, Érica Cristine Medeiros Nobre
2006 Operação de redes de escoamento de petróleo utilizando algoritmo genético multi-objetivo / Érica Cristine Medeiros Nobre Machado. — Campina Grande, 2006.

145fs.: il.

Referências.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Recursos Naturais.

Orientadores: Carlos de Oliveira Galvão e Francisco Vilar Brasileiro.

1— Redes de Escoamento de Petróleo - Otimização 2— Redes Hidráulicas - Otimização 3— Controle – Algoritmo Genético I— Título

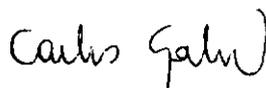
CDU 556.16:622.323

ÉRICA CRISTINE MEDEIROS NOBRE MACHADO

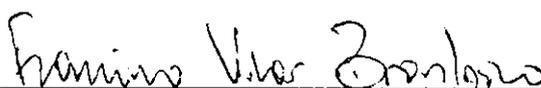
**OPERAÇÃO DE REDES DE ESCOAMENTO DE PETRÓLEO UTILIZANDO
ALGORITMO GENÉTICO MULTI-OBJETIVO**

Dissertação aprovada em 08 de junho de 2006.

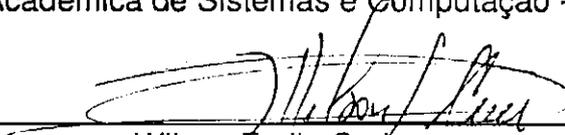
COMISSÃO EXAMINADORA:



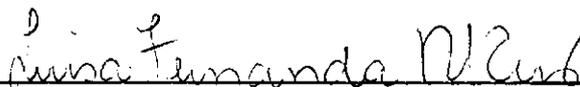
Carlos de Oliveira Galvão
Orientador
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil – UFCG



Francisco Vilar Brasileiro
Orientador
Unidade Acadêmica de Sistemas e Computação - UFCG



Wilson Fadlo Cupi
Examinador interno
Unidade Acadêmica de Física - UFCG



Luísa Fernanda Ribeiro Reis
Examinadora externa
Escola de Engenharia de São Carlos – USP



Vicente Delgado Moreira
Examinador externo
PETROBRAS

*"O Saber é saber que nada se sabe.
Esta é a definição do verdadeiro conhecimento."*

Confúcio

Agradecimentos

A Deus, pelo amparo nos momentos mais difíceis;

À minha família, em especial aos meus pais Francisco e Edite, pela confiança e apoio incondicional a todas as minhas decisões;

Ao meu esposo, Gildemberg, pela paciência e companheirismo;

Aos orientadores Carlos e Fubica, pela orientação efetiva e constante desse trabalho, com entusiasmo, confiança e dedicação;

Aos membros (Alan, Bárbara, Bruno, Carlos, Cledson, Fubica, Ivonaldo, Kennedy, Marcell, Thiago, Vinícius e Zeca) e ex-membros (Esther, Euriclides e Érico) do projeto SmartPumping, co-responsáveis pela execução desse trabalho;

Aos colegas de mestrado (Alcidney, Cledson, Myrla, Renato e Simone) pelo apoio e amizade consolidada durante esse período das nossas vidas;

Agradecimentos especiais a Esther e Marcell, pelas discussões e valiosas dicas aproveitadas nesse trabalho;

A todos que compõem o Laboratório de Sistemas Distribuídos, pela generosa acolhida e gratificante convívio nesse ambiente;

Aos professores, funcionários e colegas do Laboratório de Hidráulica I e II, pelos ensinamentos e serviços prestados;

Aos engenheiros Fabiano Azevedo e Vicente Delgado da UN-RNCE e ao engenheiro Fábio Arbex do CENPES, pelo esclarecimento de dúvidas, discussões relevantes e envio de dados necessários à execução desse trabalho;

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concedida;

À Financiadora Nacional de Estudos e Projetos (FINEP) e à Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS), financiadores do projeto intitulado “Controle Inteligente de Sistemas de Bombeamento em Redes de Escoamento de Petróleo – SmartPumping”, cuja infraestrutura deu suporte ao desenvolvimento do presente trabalho.

Resumo

A otimização da operação de sistemas de escoamento de petróleo é essencial para garantir o atendimento das restrições físicas do sistema e a maximização da eficiência dos objetivos operacionais, pois que prolonga a vida útil do sistema e mantém a produção do petróleo dentro dos requisitos de quantidade e qualidade segundo critérios racionais no custeio da energia elétrica. A utilização de modelos de otimização adaptados especificamente para obtenção da operação ideal permite oferecer uma possibilidade de operação mais racional, diminuindo a subjetividade, os riscos de falhas humanas e os conflitos que geralmente ocorrem quando a tentativa de otimização é feita de modo descentralizado e baseada unicamente na experiência adquirida pelos operadores em campo. O algoritmo genético tem sido utilizado com frequência na otimização desses sistemas, e se destaca pela sua natureza robusta, que permite associar as características de eficácia e eficiência. Recentemente têm sido desenvolvidos diversos algoritmos genéticos multi-objetivo, os quais tratam mais realisticamente problemas complexos que necessitam da otimização simultânea de diversos objetivos. Esse trabalho analisa a incorporação de diversas técnicas e alternativas ao método de otimização multi-objetivo *Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2*, com o propósito de aumentar a sua eficiência e torná-lo aplicável ao problema da otimização da operação de sistemas de escoamento de petróleo. As alternativas incorporadas abrangem a utilização da técnica de *seeding*, de heurísticas de reparo e descarte de soluções inviáveis, a integração do conceito de viabilidade com o conceito de dominância, a introdução de conhecimentos nos operadores de reprodução, dentre outras. Os experimentos foram conduzidos em uma sub-rede de escoamento de petróleo da Unidade de Negócios de Exploração e Produção do Rio Grande do Norte e Ceará da PETROBRAS, e os resultados validaram a metodologia como eficiente e aplicável ao problema, ao gerar boas alternativas para o escalonamento das bombas da rede para um período de 24 horas, em um tempo hábil.

Abstract

The optimization of the operation in oil pipeline networks is essential to guarantee the attendance of constraints and to maximize the efficiency of the operational objectives, in order to draw out its useful life while keeping the oil production in the requirements of quantity and quality with rationality of the costs of electric energy. The use of computational optimization models for solving this type of problem, allows to offer a more rational operation, diminishing the subjectivity, the risks of imperfections and the conflicts that generally occur when this operation are made decentralized and based solely in the experience acquired in field. Genetic algorithms have been used to optimize these systems, and it detaches for its robust nature, that allows associating its effectiveness and efficiency characteristics. Recently, has been developed various multi-objective genetic algorithms, which treat more reliability complex problems which need simultaneous optimization of diverse objectives. This work analyzes the incorporation of diverse techniques and in the Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2, with the intention of increase its efficiency and becoming applicable to the problem of pump scheduling in oil pipeline network. The incorporated alternatives surround the use of the technique of seeding, of knowledge for repair and discarding of infeasible solutions, the integration of the concept of viability with the dominance criteria, the introduction of knowledge in the reproduction operators, among others. The experiments are based in a small part of the pumping network of “Unidade de Negócios de Exploração e Produção do Rio Grande do Norte e Ceará”, of PETROBRAS, and the results show an efficient and applicable methodology to the problem, which generates good alternatives for the pump scheduling, for a period of 24 hour, in a skillful time.

Lista de ilustrações

Figuras

Figura 1 – Rede típica de escoamento da produção de petróleo (BRASILEIRO, 2005).....	6
Figura 2 – Localização da rede de transporte da UN-RNCE (Fonte: Arquivos de imagens da UN-RNCE).....	8
Figura 3 – Esquema da rede piloto da UN-RNCE.....	11
Figura 4 – Otimização multi-objetivo baseada na preferência (Adaptado de DEB, 2001).....	14
Figura 5 – Otimização multi-objetivo ideal (Adaptado de DEB, 2001).	14
Figura 6 – Esquema do método de seleção SUS.	27
Figura 7 – Esquema do operador de cruzamento de um ponto.....	28
Figura 8 – Esquema do operador de cruzamento uniforme.	29
Figura 9 – Esquema do operador de mutação.....	29
Figura 10 – Rede piloto modelada no SmartPumping.....	64
Figura 11 – Classificação dos indivíduos considerando inicialmente as relações de dominância.....	75
Figura 12 – Classificação dos indivíduos considerando inicialmente o conceito de viabilidade.....	75
Figura 13 – Representação do cromossomo.	77
Figura 14 – Cruzamento direcionado proposto por Brasileiro (2005).....	79
Figura 15 – Fluxograma de aplicação dos operadores para geração da nova população.....	82
Figura 16 – Exemplo de atuação da regra de reparo.....	84
Figura 17 – Modelagem da rede piloto simplificada para busca exaustiva.	88

Gráficos

Gráfico 1 – Caracterização do espaço de busca para a rede piloto simplificada.	98
Gráfico 2 – Distribuição das soluções no espaço de busca.....	99
Gráfico 3 – Valores de funções-objetivo das soluções do espaço de busca.....	100
Gráfico 4 – Distribuição das soluções viáveis no espaço de busca.	101
Gráfico 5 – Funções-objetivo das soluções viáveis no espaço de busca.	102
Gráfico 6 – Caracterização das soluções da fronteira Pareto.....	104
Gráfico 7 – Evolução para a fronteira Pareto das metodologias A, B e C.....	106
Gráfico 8 – Evolução para a fronteira Pareto das metodologias C e 1.	111
Gráfico 9 – Evolução para a fronteira Pareto das metodologias C e 2.	112
Gráfico 10 – Evolução para a fronteira Pareto das metodologias C, 3 e 4.	113
Gráfico 11 – Evolução para a fronteira Pareto das metodologias C, 5, 6, 7 e 8.	115
Gráfico 12 – Evolução para a fronteira Pareto das metodologias 9, 10 e 11.	122
Gráfico 13 – Evolução da função-objetivo 1 das metodologias aplicadas sobre a rede piloto.	126
Gráfico 14 – Evolução da função-objetivo 2 das metodologias aplicadas sobre a rede piloto.	126
Gráfico 15 – Evolução da função-objetivo 3 das metodologias aplicadas sobre a rede piloto.	127
Gráfico 16 – Evolução da função-objetivo 1 dos experimentos utilizando restrição temporal.	129
Gráfico 17 – Evolução da função-objetivo 2 dos experimentos utilizando restrição temporal.	129
Gráfico 18 – Evolução da função-objetivo 3 dos experimentos utilizando restrição temporal.	130
Gráfico 19 – Soluções finais normalizadas da otimização considerando a restrição temporal.....	132

Tabelas

Tabela 1 – Dados físicos da rede piloto.....	12
Tabela 2 – Propriedades dos fluidos da rede piloto.....	12
Tabela 3 – Dados de projeto e de operação da rede piloto.....	12
Tabela 4 – Exemplo de codificações binária <i>Gray</i> e convencional.....	23
Tabela 5 – Características físicas das bombas.....	64
Tabela 6 – Características físicas dos oleodutos.....	64
Tabela 7 – Características físicas dos tanques.....	64
Tabela 8 – Previsão da produção do fluido da rede piloto.....	65
Tabela 9 – Tarifas de energia elétrica.....	65
Tabela 10 – Critérios para aplicação da mutação direcionada alternativa.....	80
Tabela 11 – Parâmetros do algoritmo genético.....	92
Tabela 12 – Caracterização dos pontos de falha das soluções inviáveis.....	99
Tabela 13 – Funções-objetivo das soluções da fronteira Pareto da rede piloto simplificada.....	103
Tabela 14 – Métrica de desempenho 1 para as metodologias A, B e C.....	105
Tabela 15 – Métrica de desempenho 2 para as metodologias A, B e C.....	105
Tabela 16 – Métrica de desempenho 3 para as metodologias A, B e C.....	106
Tabela 17 – Métrica de desempenho 1 para as metodologias C e 1 a 8.....	110
Tabela 18 – Métrica de desempenho 2 para as metodologias C e 1 a 8.....	110
Tabela 19 – Métrica de desempenho 3 para as metodologias C e 1 a 8.....	111
Tabela 20 – Métrica de desempenho 1 para as metodologias 9, 10 e 11.....	121
Tabela 21 – Métrica de desempenho 2 para as metodologias 9, 10 e 11.....	122
Tabela 22 – Métrica de desempenho 3 para as metodologias 9, 10 e 11.....	122
Tabela 23 – Métrica de convergência para os experimentos sobre a rede piloto.....	124
Tabela 24 – Métrica de diversidade para os experimentos sobre a rede piloto.....	125
Tabela 25 – Métrica de otimização para os experimentos sobre a rede piloto.....	125
Tabela 26 – Métrica de convergência para os experimentos utilizando restrição temporal.....	128
Tabela 27 – Métrica de diversidade para os experimentos utilizando restrição temporal.....	128
Tabela 28 – Métrica de otimização para os experimentos utilizando restrição temporal.....	129
Tabela 29 – Soluções finais para a rede piloto considerando a restrição temporal.....	132

Quadros

Quadro 1 – Métodos clássicos para otimização multi-objetivo (DEB, 2001).....	18
Quadro 2 – Diferenças entre os métodos SPEA e SPEA2.....	69
Quadro 3 – Severidade das restrições violadas.....	74
Quadro 4 – Estratégias de reparo do calculador de solução viável.....	78
Quadro 5 – Metodologias avaliadas na otimização da rede piloto simplificada.....	89

Lista de abreviaturas e siglas

AG	Algoritmo Genético
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
API	<i>American Petroleum Institute</i>
BS&W	<i>Basic Sediments and Water</i>
CENPES	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello
COSERN	Companhia Energética do Rio Grande do Norte
CNSGA	<i>Controlled elitist non-dominated sorting genetic algorithm</i>
CSV	Calculador de solução viável
D	Dominado
DPGA	<i>Distance based Pareto genetic algorithm</i>
ECC	Estações coletoras centrais
ECS	Estações coletoras satélites
ETO	Estação de tratamento de óleo
FFGA	<i>Fonseca and Flemming's multi-objective genetic algorithm</i>
HLGA	<i>Hajela and Lin's genetic algorithm</i>
I	Inviável
LOR	Lorena, estação coletora da UN-RNCE
LPX	Leste de Poço Xavier, estação coletora da UN-RNCE
MOEA	<i>Multi-objective evolutionary algorithm</i>
MOGA	<i>Multiple objective genetic algorithm</i>
MOP	<i>Multi-objective optimization problem</i>
ND	Não-dominado
NDV	Não-dominado viável
NPGA	<i>Niched-Pareto genetic algorithm</i>
NSGA	<i>Non-dominated sorting genetic algorithm</i>
NSGA-II	<i>Elitist non-dominated sorting genetic algorithm</i>
PAES	<i>Pareto archives evolution strategy</i>
Pc	Probabilidade de cruzamento
PC	Ponto de corte
PESA	<i>Pareto envelope-based selection algorithm</i>
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
PAF	Ponto anterior à falha
PF	Ponto de falha
Pm	Probabilidade de mutação
pMOEA	<i>Parallel multi-objective evolutionary algorithm</i>
PPP	Estação de pré-processamento de petróleo
PSPMEA	<i>Parallel strength Pareto multi-objective evolutionary algorithm</i>

RAND	<i>Randomic</i>
RFQ	Riacho da Forquilha, estação coletora da UN-RNCE
SOEA	<i>Single-objective evolutionary algorithm</i>
SPEA	<i>Strength Pareto evolutionary algorithm</i>
SPEA2	<i>Strength Pareto evolutionary algorithm 2</i>
SUS	<i>Stochastic Universal Sampling</i>
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UN-RNCE	Unidade de Negócios de Exploração e Produção do Rio Grande do Norte e Ceará
UPN	Upanema, estação coletora da UN-RNCE
V	Viável
VEGA	<i>Vector evaluated genetic algorithm</i>
VOES	<i>Vector optimized evolution strategy</i>
WBGA	<i>Weighted based genetic algorithm</i>

Lista de símbolos e notações

a, b, c	Coefficientes da curva característica da bomba
Ab	Área da base do tanque
B	Bomba de uma unidade consumidora do sistema
BSW	Valor do BS&W do fluido
C	<i>Cluster</i> (Grupo)
$Custo$	Custo de energia elétrica
d	Diâmetro interno do duto
D	Densidade de vizinhança
DP	Desvio padrão da população
σ	Distância euclidiana
dc	Distância entre <i>clusters</i> (grupos)
dS	Duração do horizonte de operação
$dmês$	Duração do mês
ε	Rugosidade absoluta do duto
E	Estado da bomba
f	Coefficiente do fator de atrito no duto
F	Aptidão do indivíduo
$F(Q)$	Ganho/perda de carga nos elementos
FO	Função-objetivo
FP	Função ponderada
g	Aceleração da gravidade
G	Geração
H_{man}	Altura manométrica da bomba
H	Carga piezométrica
i	Intervalo de cálculo do horizonte de operação
Δi	Duração do intervalo de cálculo
IC	Intervalo de confiança
J	Matriz jacobiana para cálculo do equilíbrio hidráulico
κ	Fator de adequação da função-objetivo 3
L	Comprimento do duto
MS	Métrica de espaçamento
m, p	Parâmetros da equação da viscosidade cinemática
md	Medida de distância
n	Dimensão da amostra
N	Nível de fluido no tanque
NC	Nível de controle do tanque
η	Número de nós de carga piezométrica desconhecida

η_M	Rendimento do motor
η_B	Rendimento da bomba
P	Conjunto de soluções
P^*	Conjunto de soluções não-dominadas
PV^*	Conjunto de soluções não-dominadas viáveis
Pot	Potência da bomba
Pop	População corrente
\overline{Pop}	População externa
PU	União da população corrente com a população externa
Pr	Propriedade do fluido da estação receptora
$peso$	Peso atribuído à função-objetivo para ponderação
q	Quantidade de indivíduos da população
Q	Vazão
R	Matriz para cálculo do equilíbrio hidráulico
RF	Valor do <i>Raw Fitness</i> do indivíduo
Rey	Número de Reynolds do escoamento
ρ	Massa específica do fluido
s	Elemento com carga piezométrica conhecida
S	Valor do <i>Strength</i> do indivíduo
st	Coefficiente de <i>Student</i>
ΔS	Desvio padrão da amostra
T	Temperatura do fluido
t	Intervalo de atuação
Δt	Duração do intervalo de atuação
$tarifa$	Tarifa de energia elétrica
UC	Unidade consumidora de energia elétrica
V	Espaço de busca das soluções factíveis
ν	Viscosidade cinemática do fluido
Var	Variância
V_t	Volume de fluido no tanque
V_e	Volume de fluido na entrada
$\%Vol$	Proporção percentual de volume
$Volume$	Volume entregue na estação receptora final
\bar{x}	Média amostral
μ	Média populacional
$\alpha, \ell, \delta, \lambda, k$	Indivíduos das populações
$ \cdot $	Cardinalidade do conjunto
$\lceil \cdot \rceil$	Arredondar para cima

Sumário

<i>Agradecimentos</i>	<i>i</i>
<i>Resumo</i>	<i>ii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iii</i>
<i>Lista de ilustrações</i>	<i>iv</i>
<i>Lista de abreviaturas e siglas</i>	<i>vi</i>
<i>Lista de símbolos e notações</i>	<i>viii</i>
<i>Sumário</i>	<i>x</i>
1. Introdução	1
2. Operação de redes de escoamento de petróleo	5
2.1. Formalização do problema	5
2.2. Estudo de caso	8
3. Revisão Bibliográfica	13
3.1. Otimização multi-objetivo	13
3.1.1 Considerações gerais	13
3.1.2 Dominância e conceitos de Pareto	15
3.1.3 Métodos de otimização	16
3.2. Algoritmos evolucionários	18
3.2.1 Princípios	18
3.2.2 Algoritmos Genéticos	19
3.2.2.1 Representação das soluções	22
3.2.2.2 População inicial e substituição das populações	23
3.2.2.3 Função-objetivo e aptidão	24
3.2.2.4 Operador de seleção	25
3.2.2.5 Operadores de reprodução	27
3.2.2.6 Convergência do algoritmo	29
3.2.2.7 Parâmetros de controle	30
3.2.3 Algoritmos Evolucionários para Otimização Multi-objetivo	31
3.2.3.1 Breve Histórico	31
3.2.3.2 Métricas de desempenho	37
3.2.3.3 Consideração das restrições	39
3.3. Trabalhos Correlatos	40
3.3.1 Redes de escoamento de petróleo	40
3.3.2 Redes de escoamento de água	42
3.4. Análise da revisão de literatura	45
4. Metodologia	47

4.1. Modelo computacional SmartPumping	47
4.1.1 Generalidades	47
4.1.2 Mistura de fluidos	50
4.1.3 Equilíbrio hidráulico	53
4.1.4 Cálculo tarifário	58
4.1.5 Modelagem da rede piloto no SmartPumping	62
4.2. Objetivos da operação	65
4.3. Método para otimização multi-objetivo	68
4.3.1 Algoritmo evolucionário multi-objetivo SPEA2	68
4.3.2 Inclusão do conceito de viabilidade no método SPEA2	73
4.3.3 Representação das soluções e geração da população inicial	76
4.3.4 Operadores de reprodução direcionados	78
4.3.5 Descarte e reparo de indivíduos inviáveis	82
4.3.6 Redução do conjunto final e escolha da solução	84
4.4. Avaliação do modelo de otimização multi-objetivo	87
4.4.1 Experimentos de avaliação	87
4.4.2 Métricas de desempenho para as metodologias aplicadas sobre a rede piloto simplificada	93
4.4.3 Métricas de desempenho para as metodologias aplicadas sobre a rede piloto	95
4.5. Processo de desenvolvimento do método	97
5. Resultados e discussão	98
5.1. Espaço de busca do problema	98
5.2. Aplicação sobre a rede piloto simplificada	105
5.2.1 Avaliação das alternativas de preenchimento da população externa	105
5.2.2 Avaliação das alternativas incorporadas individualmente à metodologia base	109
5.2.3 Avaliação das alternativas incorporadas conjuntamente à metodologia base	120
5.3. Aplicação sobre a rede piloto	124
5.4. Aplicação sobre a rede piloto com restrição temporal	128
6. Conclusões e recomendações para estudos futuros	133
Referências Bibliográficas	136

1. Introdução

O Brasil tornou-se no corrente ano um dos poucos países auto-suficientes em petróleo, ao produzir 1,9 milhões de barris/dia ao passo que consome 1,8 milhões. Cerca de 20% dessa produção é do tipo *onshore* (terrestre), sendo a Unidade de Negócios de Exploração e Produção do Rio Grande do Norte e Ceará (UN-RNCE) da PETROBRAS (Petróleo Brasileiro S.A.) responsável pela maior produção de petróleo nesse setor, explorando mais de 4.500 poços situados na bacia Potiguar, a qual abrange parte dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará. A PETROBRAS e a UFCG vêm desenvolvendo, em parceria, o sistema computacional SmartPumping para controlar em tempo real o escoamento de fluidos em redes, e ser utilizado, inicialmente, como subsídio à tomada de decisão no âmbito da UN-RNCE.

O controle operacional de um sistema de produção de petróleo consiste em determinar, para um determinado horizonte futuro, quais bombas devem ser ligadas e em que intervalo de tempo, de modo que as restrições físicas da rede sejam atendidas, a produção não seja reduzida e os objetivos operacionais sejam atingidos com o máximo de eficiência. A adoção de um método de otimização eficiente nas atividades operacionais de campo se propõe a diminuir a subjetividade inerente à operação tradicionalmente realizada, a qual é baseada na experiência dos operadores, e aumentar a eficiência operacional.

Como os objetivos operacionais que se deseja atingir são de naturezas diferentes, o problema é caracterizado como multi-objetivo, cuja solução se torna mais complexa, principalmente devido aos objetivos serem geralmente conflitantes.

Em uma operação típica do sub-sistema “parque de bombas” de uma rede de escoamento de petróleo, o objetivo mais comum que se deseja atingir é a minimização do custo de energia elétrica do bombeamento, o qual pode variar expressivamente em função do escalonamento adotado para aquela operação das bombas. Outros custos operacionais podem ser expressos indiretamente em função do escalonamento adotado para as bombas, como através do número de chaveamentos do sistema que fornece um indicador do custo de manutenção das bombas, e da manutenção das características requeridas para o fluido entregue na estação de tratamento de óleo - ETO, as quais influenciam na eficiência dos equipamentos utilizados nessa estação.

A manutenção de propriedades como vazão e BS&W (porcentagem de água e sedimentos) do fluido entregue na ETO dentro dos limites estabelecidos, além de otimizar a operação realizada nessa estação, é importante também para que a produção do sistema seja constantemente mantida e que o fluido produzido esteja em conformidade com os limites fixados pelo *American Petroleum Institute* (API), o que pode ser considerado um objetivo operacional tão ou mais importante que os anteriores.

Dentre as restrições físicas da rede a serem atendidas durante a operação, as quais eventualmente podem ser consideradas como um objetivo explícito, estão o atendimento dos limites de velocidade e pressão nos dutos, das demandas da produção e dos limites de armazenamento dos tanques. Além das restrições físicas e dos objetivos operacionais, a determinação da operação ótima desses sistemas também está sujeita às restrições temporais, para que seja possível a sua utilização em campo.

Várias técnicas de otimização têm sido utilizadas para o problema operacional do escoamento em redes, tendo o algoritmo genético se destacado na resolução deste problema devido a sua natureza robusta, obtida pela associação das características de eficácia e eficiência. A eficiência é a capacidade de o algoritmo encontrar rapidamente uma solução para o problema, enquanto que a eficácia é a capacidade de encontrar a (ou se aproximar da) solução ótima global, a qual é composta de múltiplas soluções ótimas, no caso da otimização ser multi-objetivo.

Especificamente para as redes de escoamento de petróleo a natureza multi-objetivo do problema do escalonamento das bombas não tem sido considerada na literatura. De um modo geral, a maioria das metodologias que vem sendo empregadas para resolução desse tipo de problema não está adaptada para aplicação ao mundo real, por não considerar a complexidade inerente da dimensão das redes, não ajustar-se às particularidades típicas da operação de que se trata e não considerar a restrição temporal necessária para utilização contínua em campo.

Nesse contexto, o objetivo dessa pesquisa é indicar uma metodologia aplicável à otimização da operação de sistemas de escoamento de petróleo, considerando os múltiplos objetivos e as restrições específicas do problema. Foi escolhida a técnica dos algoritmos genéticos, a qual se mostra mais adequada para otimização do problema em análise devido: 1) ao espaço de busca grande e complexo, com presença de ótimos locais, situação que os algoritmos genéticos conseguem contornar com facilidade devido à exploração simultânea de vários pontos no espaço de busca; 2) à combinação de bombas diferentes na rede de escoamento e de restrições complicadas, o que dificulta a representação através de equações

matemáticas, requeridas em outros métodos de otimização; 3) à adoção de funções-objetivo conflitantes e de grandezas diversas, as quais podem ser consideradas explicitamente em uma otimização por algoritmo genético, sem a necessidade de normalização; e 4) à necessidade de utilização de um simulador hidráulico externo, no qual um algoritmo genético pode ser facilmente acoplado.

Após a definição de um método evolucionário multi-objetivo, serão incorporadas, nesse método, técnicas e alternativas que se propõem a aumentar sua eficiência e eficácia, bem como suprir algumas de suas deficiências. Dessa forma, os objetivos específicos dessa pesquisa constituem em quantificar o ganho de desempenho obtido quando da inclusão de conhecimento nos operadores do algoritmo genético e da utilização de heurísticas de reparo, descarte e ordenamento das soluções inviáveis.

Esse trabalho está organizado em seis capítulos. No capítulo 2, são apresentadas as características da operação em redes de escoamento de petróleo, como também os problemas inerentes dessa operação. A delimitação da rede de estudo, parte integrante da UN-RNCE, a qual servirá para análise e validação do algoritmo genético multi-objetivo e das alternativas incorporadas, também é apresentada nesse capítulo.

No capítulo 3 é realizada a revisão da literatura sobre os algoritmos evolucionários, em especial dos algoritmos genéticos, com revisão dos seus fundamentos e das suas vantagens em relação aos métodos tradicionais em problemas complexos. Especificamente para os algoritmos evolucionários multi-objetivo, é apresentado um breve histórico da evolução e aperfeiçoamento desses métodos até os dias atuais. Ao final do capítulo, é feita uma análise das pesquisas correlatas, tanto para o caso do escoamento de petróleo quanto para o caso do escoamento de água, cujo estado da arte apresenta-se muito mais evoluído e amplo do que para o caso do petróleo.

O capítulo 4 se propõe a detalhar cada metodologia utilizada nessa pesquisa, iniciando pela descrição do modelo computacional SmartPumping, o qual é utilizado para simulação hidráulica do escoamento e cálculo tarifário da operação. Apresenta ainda a definição das funções-objetivo a serem otimizadas, o detalhamento da metodologia de otimização multi-objetivo adotada e a descrição dos experimentos realizados para avaliação do desempenho dessa metodologia.

Os resultados dos experimentos são apresentados no capítulo 5, cuja análise conduz à seleção de uma metodologia robusta e adequada para a resolução do problema da operação

das bombas em um sistema de escoamento de petróleo. Neste capítulo, é realizada ainda, a análise da viabilidade da utilização, em campo, da metodologia selecionada. Finalmente, o capítulo 6, apresenta as conclusões e sugestões para novos estudos em continuidade ao presente.

2. Operação de redes de escoamento de petróleo

2.1. *Formalização do problema*

O petróleo é uma substância oleosa, inflamável, menos densa que a água, com cheiro característico e de cor variando entre o negro e o castanho escuro. É encontrado concentrado em terrenos denominados bacias sedimentares, formadas por camadas ou lençóis porosos de areia, arenitos ou calcários. Ao acumular-se, formam jazidas, onde é encontrado o gás natural, na parte mais alta, e petróleo e água, nas mais baixas.

O sistema de produção de petróleo tem início com a extração nos poços, onde o fluido emergido (composto de água salgada, gás natural e petróleo bruto) é centralizado em um equipamento denominado *manifold* que envia a produção de diferentes poços para uma Estação Coletora. O gás natural produzido pode ser queimado na própria estação, ou direcionado para um gasoduto e conduzido para uma Unidade de Processamento de Gás Natural - UPGN.

Parte da água produzida pelos poços é separada na estação coletora, o restante é bombeado através de oleodutos, juntamente com o petróleo, para a Estação de Tratamento de Óleo - ETO. A água extraída, que não possui valor econômico, é tratada e reinjetada nos poços, atuando como mantenedora da pressão da jazida, ou descartada através de emissário submarino, atendendo às normas ambientais que rejeitam o seu despejo a céu aberto. Na estação de tratamento, o petróleo é previamente tratado para atender às normas estabelecidas antes de ser enviado para as refinarias. Nessa estação ocorre a redução do BS&W (*Basic Sediments and Water*) que é o percentual de água e sedimentos presente no petróleo, até os limites fixados pelo API (*American Petroleum Institute*).

A Figura 1 mostra a configuração típica de uma rede de escoamento da produção de petróleo. As estações coletoras que recebem produção apenas de poços são denominadas Estações Coletoras Satélites – ECS, enquanto as que recebem, além dos poços, produção de outras estações, são denominadas Estações Coletoras Centrais – ECC.

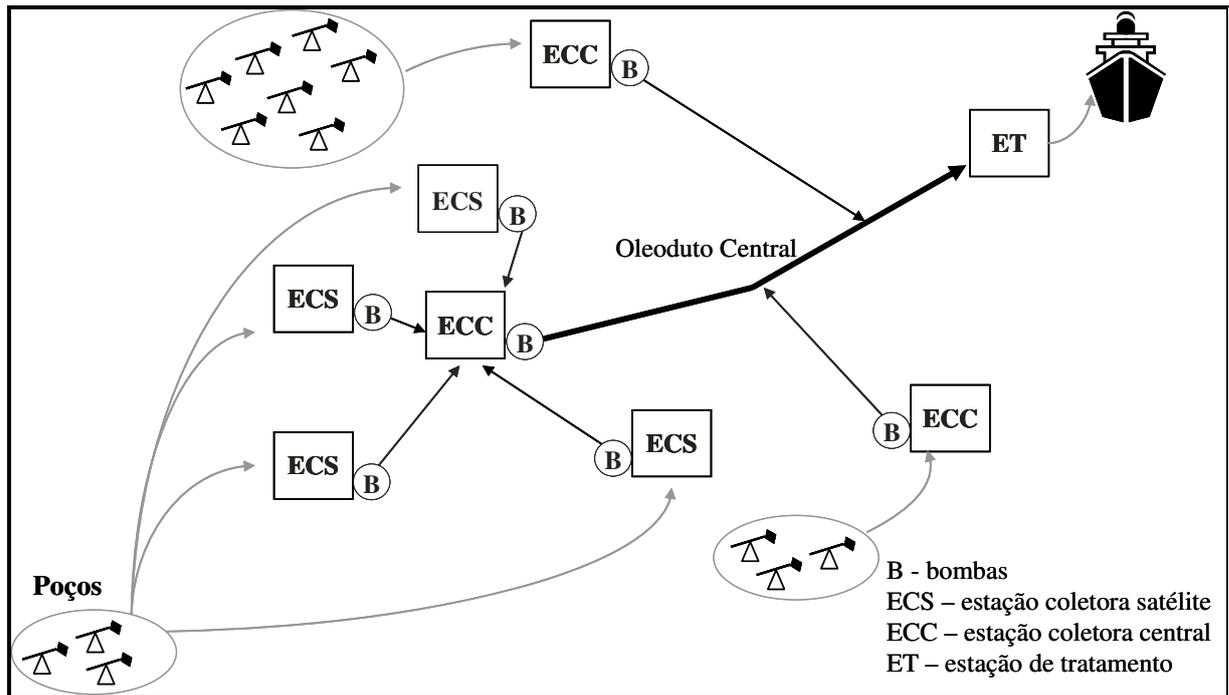


Figura 1 – Rede típica de escoamento da produção de petróleo (BRASILEIRO, 2005).

Uma das principais metas que se deseja atingir na operação de uma rede de escoamento de petróleo, considerando exclusivamente o sub-sistema “parque de bombas”, é diminuir os custos com energia elétrica referente ao bombeamento. O custo de energia elétrica é composto pelo custo de bombeamento dos poços para as estações coletoras, pelo custo de bombeamento das estações coletoras para a estação de tratamento, por custos de iluminação, entre outros.

O custo de bombeio dos poços para as estações coletoras é pouco variável, devido ao seu funcionamento contínuo. Desse modo, o sistema modelado nesse trabalho compreende apenas a produção entre as estações coletoras e a de tratamento por fornecer maior possibilidade de economia de energia elétrica através do escalonamento inteligente das bombas, diminuindo ou interrompendo o bombeamento em horários de pico de energia elétrica quando as tarifas são mais caras.

A redução dos custos de manutenção dos sistemas de bombeamento das estações coletoras é outro objetivo a ser alcançado. Esse custo é de difícil quantificação, mas é fortemente influenciado pela operação das bombas, sendo que escalonamentos com um alto número de chaveamentos aceleram o desgaste das bombas e diminuem a sua vida útil. O número de chaveamentos em um sistema é a quantidade de vezes que cada bomba que estava desligada foi acionada, e pode ser utilizado como parâmetro na escolha de soluções que irão provocar menos desgaste, e, portanto, menores custos.

O processo de tratamento de óleo na ETO é influenciado pela variação das características do fluido recebido nesta estação, de maneira que faz-se necessário minimizar a variação daquelas características até para que se aperfeiçoe o processo. Uma vazão pouco variável nessa estação possibilita, por exemplo, otimizar a operação do extrator e do separador de óleo, os quais foram projetados para operar em uma vazão pré-determinada ou numa faixa estreita de vazão.

O volume de produtos químicos utilizado para o tratamento do óleo é proporcional, dentre outros, ao BS&W do fluido recebido na ETO. Por um lado, se a porcentagem de água que chega nessa estação está abaixo dos limites estabelecidos, o volume de produtos químicos utilizado tornar-se-á super-dimensionado, causando desperdícios dos produtos; por outro lado, se a porcentagem de água está muito acima do esperado, o volume de produtos químicos se tornará insuficiente, sendo necessário, algumas vezes, reprocessar o óleo. Desse modo, um fluido com propriedades e fluxo constantes na entrada da estação de tratamento de óleo constitui objetivo da operação.

Além dos objetivos operacionais expostos, o atendimento do aumento de produção do sistema, sem que haja interferência em sua rede física, é uma meta a ser atingida. Segundo Silva (1999), um dos investimentos mais altos na estruturação da capacidade de escoamento de petróleo está na fase de construção dos dutos. Após essa construção, se houver deficiências na capacidade de escoamento da rede, devido a um aumento expressivo da produção, por exemplo, os gastos envolvidos no redimensionamento das redes serão extremamente altos, por se tratar de dezenas, ou centenas, de quilômetros de dutos e requerer algum tipo de paralisação parcial da linha de produção. Logo, quanto mais eficientemente esses sistemas forem operados, mais adiada será uma interferência na estrutura física na rede de escoamento.

A rede de escoamento de petróleo está sujeita, ainda, a uma série de restrições físicas e operacionais, tais como o limite de armazenamento dos tanques, a capacidade das bombas e os limites de pressões e velocidades nos dutos. O problema da operação desses sistemas se resume em determinar, para um horizonte definido, quais bombas devem operar em cada intervalo de tempo de modo que as restrições sejam satisfeitas, os múltiplos objetivos sejam otimizados e a demanda de produção seja atendida.

2.2. Estudo de caso

A Unidade de Negócios de Exploração e Produção do Rio Grande do Norte e Ceará (UN-RNCE) da PETROBRAS (Petróleo Brasileiro S.A.) é responsável pela maior produção de petróleo terrestre do Brasil, explorando mais de 4.500 poços compreendidos entre os estados do Rio Grande do Norte e Ceará. São cerca de 70 estações coletoras que utilizam em torno de 270 bombas para conduzir a produção ao longo de 300 km de dutos até a estação de tratamento de óleo em Guamaré, localizada no litoral norte do estado do Rio Grande do Norte (Figura 2).

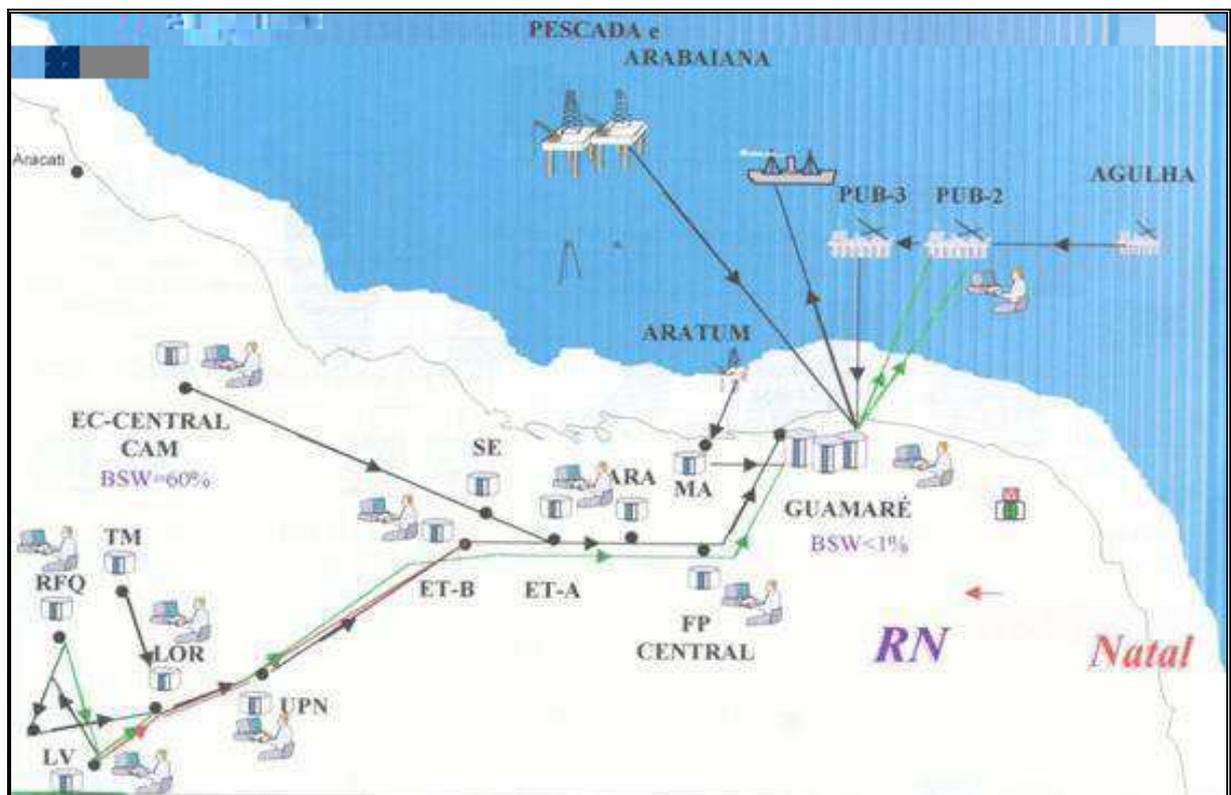


Figura 2 – Localização da rede de transporte da UN-RNCE (Fonte: Arquivos de imagens da UN-RNCE)

O controle da operação desse sistema é feito de forma descentralizada, com auxílio de equipamentos de segurança como sensores de nível e pressostatos e observando-se um sistema de monitoramento, denominado supervisório, o qual disponibiliza os níveis dos tanques registrados através dos transmissores de nível. Uma operação usual consiste em

desligar as bombas apenas quando os seus tanques de armazenamento estão próximos do nível mínimo de controle e no horário de pico de energia elétrica. Dessa forma, o escalonamento global das bombas gerado para o sistema pode não representar uma operação ótima, pois, os operadores de cada unidade administrativa, composta por uma estação coletora central e suas estações coletoras satélites, têm uma visão limitada do sistema como um todo. Como essas estações compartilham a mesma estação de tratamento de óleo e utilizam da mesma rede de oleodutos, podem ocorrer violações nas restrições operacionais do sistema, como os limites de pressão e velocidade nos dutos e o armazenamento nos tanques da ETO, e/ou o não atendimento dos demais objetivos almejados na operação.

Para minimizar os conflitos inerentes à complexidade do monitoramento e controle das redes de escoamento e tornar a operação mais eficiente, a PETROBRAS e a UFCG vêm desenvolvendo, em parceria, o sistema computacional SmartPumping (GALVÃO *et al.*, 2004; BRASILEIRO, *et al.*, 2003; <http://www.lsd.ufcg.edu.br/sp>) cujo objetivo principal é controlar em tempo real o escoamento de fluidos em redes.

A rede de escoamento composta pelas estações coletoras Lorena - LOR, Riacho da Forquilha - RFQ e Leste de Poço Xavier - LPX, que bombeiam sua produção para a Estação Coletora Central Upanema – UPN, está sendo utilizada para calibração do modelo hidráulico do SmartPumping através do monitoramento registrado no sistema de monitoramento da UN-RNCE, sendo denominada de rede piloto. Essa rede será utilizada para testes, análise e validação do modelo de otimização aqui proposto. Na Figura 3 (pág. 11) é mostrada a posição relativa das estações da rede piloto, a quantidade de bombas e tanques em cada estação, o comprimento dos dutos que ligam as estações e suas respectivas cotas topográficas (altura em relação ao nível do mar).

Dados físicos e operacionais da rede piloto foram obtidos através de visitas a campo e informações disponibilizadas pela PETROBRAS. As estações de RFQ, LPX e UPN contêm, cada uma, dois tanques de armazenamento. Foi constatado que, com exceção de LPX, os tanques de RFQ e UPN funcionam individualmente, ou seja, não-equalizados.

As bombas do sistema, em um total de seis, são do tipo volumétricas rotativas. Nas bombas volumétricas, a movimentação do fluido é causada diretamente pela ação do órgão de impulsão da bomba que obriga o fluido a executar o mesmo movimento a que está sujeito esse impulsor, e operam aquelas bombas apanhando um volume fixo de líquido e libertando a uma pressão mais alta por meio de um pistão (volumétricas alternativas) ou de uma engrenagem rotativa (volumétricas rotativas).

Bombas volumétricas alternativas envolvem o movimento de vai-e-vem de um pistão no interior de um cilindro, resultando em um escoamento intermitente, pois, para cada golpe do pistão, um volume fixo do líquido é descarregado na bomba. Ao contrário das bombas alternativas, as bombas rotativas resultam em um escoamento contínuo, pois utilizam uma engrenagem, lóbulo, parafuso, ou cata-vento para comprimir o líquido, o qual entra do lado de baixa pressão por uma abertura entre o elemento giratório e a parede de bomba e é expulso por uma válvula de mão única. Bombas volumétricas rotativas são tipicamente usadas em altas pressões, e são boas para fluidos viscosos e de baixa pressão de vapor (MACINTYRE, 1997).

O primeiro trecho da rede, entre RFQ e LPX possui diâmetro interno do duto de 154,00 mm; já os demais trechos possuem diâmetro interno de 261,88 mm. O oleoduto que sai de RFQ passa por dentro da estação LPX, o que significa que o trecho entre LPX e LOR deve comportar, além da produção de LPX, também a produção de RFQ, e assim por diante. A Tabela 1, vide página 12, mostra os dados físicos dos tanques, dutos e bombas fornecidos para a rede piloto. A Tabela 2, por sua vez, mostra os valores aproximados das propriedades dos fluidos em cada estação coletora, obtidos a partir de uma medição específica, portanto, sujeitos a variação em medições posteriores. A Tabela 3 mostra os dados de projeto e de operação fornecidos para a rede piloto.