



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO**

THOMAS EDSON CORDEIRO DOS SANTOS

**REDUÇÃO DOS CUSTOS COM ENERGIA ELÉTRICA
ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DA LÓGICA DE
AUTOMAÇÃO DE BOMBEIO DE FLUIDOS EM
INSTALAÇÕES TERRESTRES DE PRODUÇÃO DE
PETRÓLEO NO OESTE POTIGUAR**

MOSSORÓ - RN

2013

THOMAS EDSON CORDEIRO DOS SANTOS

**REDUÇÃO DOS CUSTOS COM ENERGIA ELÉTRICA
ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DA LÓGICA DE
AUTOMAÇÃO DE BOMBEIO DE FLUIDOS EM
INSTALAÇÕES TERRESTRES DE PRODUÇÃO DE
PETRÓLEO NO OESTE POTIGUAR**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientadora: Profa. Dra. Fabiana Karla de Oliveira
Martins Varella - UFERSA

Co-orientador: Prof. Dr. Adrião Duarte Dória Neto
- UFRN

MOSSORÓ - RN

2013

**Ficha catalográfica preparada pelo setor de classificação e
catalogação da Biblioteca “Orlando Teixeira” da UFERSA**

S194r	Santos, Thomas Edson Cordeiro dos. Redução dos custos com energia elétrica através da modificação da lógica de automação de bombeio de fluídos em instalações terrestres de produção de petróleo no Oeste Potiguar / Thomas Edson Cordeiro dos Santos -- Mossoró, RN: 2013. 100f. : il. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Automação e Comunicação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação. Orientador: Prof ^o . Dra. Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella Coorientador: Prof ^o . Dr. Adrião Duarte Dória Neto 1. Redes de escoamento de petróleo. 2. Automação. 3. Uso eficiente de energia. I. Título. CDD: 665.5
-------	---

Bibliotecária: Marlene Santos de Araújo
CRB-5/1033

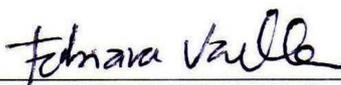
THOMAS EDSON CORDEIRO DOS SANTOS

**REDUÇÃO DOS CUSTOS COM ENERGIA ELÉTRICA
ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DA LÓGICA DE
AUTOMAÇÃO DE BOMBEIO DE FLUIDOS EM
INSTALAÇÕES TERRESTRES DE PRODUÇÃO DE
PETRÓLEO NO OESTE POTIGUAR**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

APROVADA EM: 12 / 07 / 13

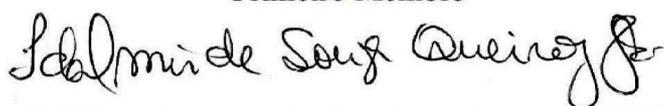
BANCA EXAMINADORA



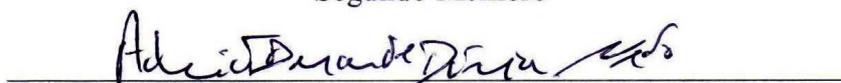
Prof. Dra. Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella - UFERSA
Presidente



Prof. Dr. Luiz Affonso Henderson Guedes de Oliveira - UFRN
Primeiro Membro



Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Junior - UFERSA
Segundo Membro



Prof. Dr. Adrião Duarte Dória Neto - UFRN
Terceiro Membro

Mossoró, 12 de julho de 2013

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha esposa Rílvia S. M. N. Santos, a meu filho Daniel Nascimento dos Santos e a minha mãe Ana L. D. Santos

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida e pela força e perseverança que me concederam tão importante momento.

Agradeço, a Profa. Dra. Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella pela orientação e ao Prof. Dr. Adrião Duarte Dória Neto pela co-orientação. Agradeço a ambos pela disponibilidade irrestrita, forma exigente e crítica de argüir as idéias apresentadas; pela confiança em mim depositada; pelos ensinamentos; pela paciência e pela motivação. Todos esses fatores foram fundamentais durante todo o processo de elaboração desta dissertação.

À Profa. Dra. Danielle S. S. Casillo e ao Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior pelas sugestões, recomendações e críticas construtivas no exame de qualificação, que permitiram melhorar a qualidade do trabalho.

Agradeço a minha mãe Ana L. C. Santos pela educação propiciada que constituiu a base de minha formação.

À minha esposa Rílvia S. M. N. Santos, pelo apoio incondicional, pela compreensão na ausência, pelo amor, carinho, afeto e cumplicidade.

Agradeço especialmente a meu filho Daniel, que com apenas um ano de idade digitou incontáveis vezes suas próprias sugestões de melhoria no presente trabalho, sugestões estas que infelizmente foram suprimidas da revisão final por não terem sido escritas em nenhum idioma conhecido na atualidade.

Epígrafe

“Não sejas sábio a teus próprios olhos; teme ao SENHOR e aparta-te do mal.”

Provérbios 3:7

RESUMO

A indústria de produção terrestre de petróleo demanda quantidades consideráveis de energia elétrica e corresponde a cerca de 16% do consumo de energia elétrica no Oeste Potiguar. Como toda indústria eletrointensiva, esta possui várias possibilidades de aplicação de técnicas de eficiência energética e uso eficiente de energia. Já que a maior parcela da energia nesta indústria é aplicada ao acionamento de bombas hidráulicas, diversos trabalhos foram desenvolvidos no sentido de desenvolver técnicas que permitam o aprimoramento do acionamento das bombas de forma a minimizar, entre outros, os custos com energia elétrica. Os primeiros trabalhos tratando a respeito foram desenvolvidos e aplicados a sistemas de distribuição de água que são, em diversos aspectos, diferentes dos sistemas de produção terrestre de petróleo. No presente trabalho são apresentadas algumas técnicas de eficiência energética e trabalhos já desenvolvidos com aplicações à indústria terrestre de produção de petróleo. Serão expostas dificuldades encontradas na implementação dessas metodologias e será sugerida uma metodologia alternativa baseada em automação utilizando controladores lógicos programáveis existentes nas instalações. O objetivo do presente trabalho é abstrair da compreensão das peculiaridades do processo, lógicas de automação que possam ser implementadas de forma confiável e sem necessidade de investimentos expressivos. De forma a validar os resultados é modelada uma rede real de produção de petróleo e são comparados os custos unitários de energia por volume transferido de fluido para cada uma das lógicas de automação avaliadas. As simulações realizadas mostram reduções de custo da ordem de 48% com relação às estratégias originais indicando que a estratégia proposta é viável.

Palavras-Chave: redes de escoamento de petróleo, automação, uso eficiente de energia

ABSTRACT

The onshore petroleum industry demands considerable amounts of energy, corresponding to about 16% of electricity consumption in the western Rio Grande do Norte. Like all electricity-intensive industries, this has various possible applications of energy efficiency techniques. Since the largest portion of the energy in this industry is applied to drive hydraulic pumps, several studies were conducted to develop techniques for improving the automation of pumps to minimize, among others, the electricity costs. The first studies regarding this theme have been developed and applied to water distribution systems and are, in many respects, different from onshore oil production systems. In this paper are presented some energy efficiency techniques from work already developed applications with the onshore oil production industry. In this paper are exposed difficulties in implementing these methodologies and is suggested an alternative approach based on automation using programmable logic controllers in existing facilities. The aim of this work is to abstract from the understanding of the peculiarities of the process automation a logic that can reliably and without significant investment be implemented. In order to validate the results, a real oil production network is modeled and compared the costs of energy per unit volume of fluid transferred to each of the logical automation evaluated. The simulations show cost reductions of approximately 48% compared to the original strategies indicating that the proposed strategy is feasible.

Keywords: networks of oil flow, automation, energy efficiency

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados físicos dos tanques da rede piloto.....	50
Tabela 2 - Dados físicos das bombas da rede piloto.....	51
Tabela 3 - Dados físicos dos dutos da rede piloto	51
Tabela 4 - Propriedades dos fluidos da rede piloto	52
Tabela 5 - Dados de projeto e de operação da rede piloto.....	55
Tabela 6 - Características físicas das bombas	57
Tabela 7 - Características físicas dos oleodutos	57
Tabela 8 - Características físicas dos tanques	57
Tabela 9 - Previsão da produção da rede piloto.....	57
Tabela 10 - Tarifas de energia elétrica	69
Tabela 11 - Potências das unidades consumidoras alimentadas em 69 kV para o regional MSD da COSERN	70
Tabela 12 - Relatórios de simulação das diferentes lógicas de automação obtidas por meio do EPANET	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rede típica de escoamento de petróleo.....	26
Figura 2 - Consumo de energia no Brasil e na indústria	29
Figura 3 - Rendimento e carregamento de motor com potência	30
Figura 4 - Instrumentos para análise de carregamento	31
Figura 5 - Curvas características de motor de 100 cv.....	32
Figura 6 - Curvas características de motor de 90 cv.....	33
Figura 7 - Custos durante a vida útil de um motor de indução.....	33
Figura 8 - Variação da vazão por restrição da descarga	35
Figura 9 - Variação da vazão por <i>bypass</i>	36
Figura 10 - Métodos de variação de vazão	37
Figura 11 - Esquema da rede piloto da UO-RNCE	49
Figura 12 - Rede piloto modelada no aplicativo <i>SmartPumping</i>	56
Figura 13 - Algoritmo de operação intuitivo da rede	60
Figura 14 - Evolução da Estrutura da Oferta Interna de Energia	72
Figura 15 - Consumo final por fonte	73
Figura 16 - Consumo total de derivados de petróleo e de gás natural.....	74
Figura 17 - Versão do aplicativo EPANET traduzida pelo LENHS UFPB utilizada nas simulações	77
Figura 18 - Rede piloto modelada utilizando o aplicativo EPANET	78
Figura 19 - Campos de opções de modelagem de energia no aplicativo EPANET	79
Figura 20 - Padrão temporal da variação do custo de energia ao longo do dia.....	80
Figura 21 - Interface EPANET para edição da lógica de automação 1	85
Figura 22 - Interface EPANET para edição da lógica de automação 2.....	86
Figura 23 - Interface EPANET para edição da lógica de automação 3.....	88
Figura 24 - Variação do nível do tanque da estação de Riacho da Forquilha (TQ-RFQ) ao longo do tempo para diferentes lógicas de automação	90

Figura 25 - Variação da vazão de fluido nas bombas de transferência da estação de Riacho da Forquilha para diferentes lógicas de automação	91
Figura 26 - Comportamento da Rcv (função objetivo) para as diferentes lógicas de automação.....	93
Figura 27 - Variação da carga hidráulica aplicada às bombas de transferência da estação de Riacho da Forquilha para diferentes lógicas de automação.....	93

NOMENCLATURA

Siglas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN - Balanço Energético Nacional

BIRD - Banco Mundial

BS&W - *Bottom Water and Sediments*

COPEL - Companhia Paranaense de Energia Elétrica

COSERN - Companhia Energética do Rio Grande do Norte

ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

EPA - *U.S. Environmental Protection Agency*

ETO - Estação de Tratamento de Óleo

GEF - *Global Environment Facility*

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia

LENHS - Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento

LOR - Estação coletora de Lorena

LPX - Estação Coletora de Leste de Poço Xavier

MME - Ministério de Minas e Energia

NPSH - *Net Positive Suction Head*

PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem

PETROBRAS - Petróleo Brasileiro S. A.

PNE - Plano Nacional de Energia

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PROCEL INFO - Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética

REFAP - Refinaria Henrique Lage

RFQ - Estação Coletora de Riacho da Forquilha

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande

UFPB - Universidade Federal da Paraíba

UPN - Estação Coletora Central Upanema

Definições

Cavitação - Condição de operação de uma bomba de fluxo que ocorre quando a pressão absoluta em qualquer ponto de um sistema (tipicamente imediatamente a montante do impelidor da bomba) se torna baixa o suficiente para que ocorra a vaporização de parte do fluido bombeado que em seguida retorna à fase líquida de forma abrupta gerando ondas de pressão que podem destruir o bombeador.

EPANET - O nome EPANET é uma combinação da sigla do nome em inglês da agência de proteção ao meio ambiente norte americana (*U.S. Environmental Protection Agency* - EPA), que desenvolveu o código original, com a palavra inglesa “net”, cujo significado em português é “rede”, como uma alusão à capacidade do programa de simular o comportamento de redes de escoamento de fluidos ao longo do tempo.

NPSH - Sigla derivada de expressão em inglês *Net Positive Suction Head* (NPSH). A vazão para a qual a perda de carga no sistema antes da bomba proporciona esta altura manométrica, é a vazão mínima permissível para esta bomba neste sistema.

Shutoff - Condição de operação de uma bomba de fluxo que ocorre quando a pressão imposta à bomba é igual ou maior que aquela para a qual, de acordo com a curva de operação desta, a vazão é nula.

SmartPumping - Aplicativo desenvolvido pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG com o objetivo de simular e otimizar a operação de malhas de escoamento de líquidos produzidos na extração terrestre de petróleo.

Unidades

A (ampère) - Unidade básica do S.I. Corrente elétrica invariável que, mantida em dois condutores retilíneos, paralelos de comprimento infinito e de área de seção transversal desprezível e situados no vácuo a 1 metro de distância um do outro, produz entre esses condutores uma força igual a 2×10^{-7} Newton por metro de comprimento desses condutores.

atm (atmosfera) - Unidade de pressão não reconhecida pelo S.I. Corresponde à pressão atmosférica exercida sobre uma área de 1 m² ao nível do mar nas CNTP.

cv (cavalo-vapor) - Unidade de potência não reconhecida pelo S.I. Potência necessária para levantar 33000 lb de água a uma altura de um pé em um minuto.

kgf/cm² (quilograma força por centímetro quadrado) - Unidade de pressão não reconhecida pelo S.I. Corresponde à pressão necessária para gerar uma força de um quilograma força em um centímetro quadrado.

mm (milímetro) - Unidade de comprimento correspondente a um milésimo de metro.

V (volt) - Diferença de potencial entre os terminais de um elemento passivo de circuito, que dissipa a potência de 1 watt quando percorrido por uma corrente invariável de 1 ampère.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
1.1.	OBJETIVOS	21
1.1.1.	Objetivo geral	21
1.1.2.	Objetivos secundários	22
1.1.3.	Metodologia e estrutura da dissertação	22
2.	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO	24
2.1.	A INDÚSTRIA DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO	25
2.2.	AÇÕES ENVOLVENDO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	27
2.2.1.	Programas de incentivo à eficiência energética	27
2.2.1.1.	Programa nacional de conservação de energia elétrica	27
2.2.1.2.	Lei de eficiência energética	28
2.2.1.3.	Programa brasileiro de etiquetagem	28
2.2.2.	Eficiência no uso de motores elétricos trifásicos de indução	29
2.2.2.1.	Dimensionamento de motores elétricos trifásicos de indução	30
2.2.2.2.	Substituição de motores elétricos trifásicos de indução	33
2.2.3.	Eficiência energética no uso de bombas de fluxo	34
2.2.4.	Automação do acionamento de bombas	37
2.2.4.1.	Aplicação em sistemas de produção terrestre de petróleo	38
2.2.4.2.	Aplicação em sistemas de distribuição de água	41
3.	REDES DE ESCOAMENTO DE PETRÓLEO	45
3.1.	OPERAÇÃO DE REDES DE ESCOAMENTO DE PETRÓLEO	45
3.1.1.	Cavitação	47
3.2.	CONFIGURAÇÃO DA REDE PILOTO	48
3.3.	CONFIGURAÇÃO DOS DUTOS DA REDE PILOTO	50
3.4.	LIMITES OPERACIONAIS	52

3.4.1.	Objetivos do aprimoramento	53
3.4.2.	Estudo de caso	55
3.5.	CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS	58
3.6.	LÓGICAS DE AUTOMAÇÃO.....	59
3.6.1.	Lógica convencional	59
3.6.2.	Lógica proposta	61
4.	A ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO	64
4.1.	ESTRUTURA DO SETOR ELÉTRICO.....	64
4.2.	CLASSIFICAÇÃO DE CONSUMIDORES.....	66
4.3.	TARIFAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	68
4.4.	PARTICIPAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO OESTE POTIGUAR	69
4.5.	PARTICIPAÇÃO DO PETRÓLEO NA MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL	71
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	75
5.1.	EPANET.....	75
5.2.	COMPARAÇÃO ENTRE LÓGICAS DE AUTOMAÇÃO	79
5.2.1.	Escopo da avaliação	79
5.2.2.	Definição da função objetivo	81
5.2.3.	Lógica de automação 1	84
5.2.4.	Lógica de automação 2	85
5.2.5.	Lógica de automação 3	87
5.2.6.	Resultados e análise	90
6.	CONCLUSÃO	96
	PRODUÇÃO CIENTÍFICA	98
	REFERÊNCIAS	99

1. INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo no Brasil foi iniciada nos anos 30 do século XX em um campo terrestre da Bahia. Na década de 70, quando os primeiros campos do recôncavo baiano entravam em maturidade, foi descoberta a província petrolífera marítima da Bacia de Campos, através do campo marítimo de Garoupa (THOMAS, 2004).

O estado do Rio Grande do Norte se tornou na década de 80 do século XX a segunda maior área produtora de petróleo do país (THOMAS, 2004). Campos como o desta região, hoje, são considerados “maduros” e, como tal, apresentam forte tendência de decréscimo da produção. De forma a reverter esta tendência, são necessários investimentos em equipamentos mais modernos que demandam maiores quantidades de energia. Neste contexto, a indústria de produção terrestre de petróleo demanda cerca de 16 % do consumo total de energia elétrica dessa microrregião (AZEVEDO, 2011). Com essa tendência natural de aumento do consumo de energia elétrica e decréscimo da produção, os custos com energia elétrica tendem a se tornar cada vez mais significativos com relação aos custos totais da empresa de produção de petróleo. Dessa forma, aplicações de uso eficiente de energia possuem grande potencial de aumento da rentabilidade e da competitividade dessa indústria.

A transferência do petróleo bruto, que consiste no objetivo da indústria de produção de petróleo, é realizada por bombas de fluxo acionadas por motores elétricos nos poços e nas estações coletoras. As bombas das estações coletoras são controladas por Controladores Lógicos Programáveis (CLP) de acordo com variáveis como níveis dos tanques das estações e hora do dia. O objetivo do presente trabalho é com base em trabalhos correlatos, técnicas de conservação de energia e na compreensão do processo de produção terrestre de petróleo, propor uma melhoria de estratégias de automação

destas bombas. A justificativa para esta estratégia é o fato de uma modificação de lógica de automação não demandar investimento em novos equipamentos e poder ser implementada sem implicar em violação dos limites operacionais dos equipamentos.

Para atender às peculiaridades do processo, é necessário utilizar ferramentas de simulação computacional que tenham a capacidade de calcular as vazões, pressões e consumos de energia do sistema ao longo do tempo. Com base nesses cálculos é possível verificar quais as formas mais eficientes de transferir os fluidos, assim como as formas de minimizar os custos com energia elétrica sem comprometer a produção ou violar os limites operacionais dos equipamentos. Com relação às bombas, é necessário evitar que a pressão na admissão seja muito baixa de forma a causar cavitação¹ ou que a pressão na saída seja muito alta de forma a ocasionar *shutoff*². No caso dos dutos é necessário garantir que não sejam ultrapassadas a pressão ou a velocidade máxima de operação e é interessante evitar vazões muito baixas já que estas favorecem o depósito de sedimentos com a conseqüente obstrução do duto. Para os tanques é imprescindível evitar ultrapassagem dos níveis de fluido já que estes podem ocasionar transbordamentos com suas conseqüentes implicações ambientais e legais. Além de atender as peculiaridades do processo são aplicados conceitos oriundos de diversas técnicas de conservação de energia aplicáveis à indústria.

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL da ELETROBRAS) fomenta práticas de eficiência energética e consumo eficiente de energia. Algumas dessas práticas estão compiladas em aplicativos disponibilizados na página do programa. Dentre eles um que se mostra especialmente promissor para o objetivo deste trabalho é o EPANET. Dentre as funções desse aplicativo uma das que pode ser aplicada ao processo de produção terrestre de petróleo é a de calcular o efeito de ações que diminuem o consumo de energia elétrica em um sistema de bombeio e

¹ Condição de operação de uma bomba de fluxo que ocorre quando a pressão absoluta em qualquer ponto de um sistema (tipicamente imediatamente antes do impelidor da bomba) se torna baixa o suficiente para que ocorra a vaporização de parte do fluido bombeado que em seguida retorna à fase líquida de forma abrupta gerando ondas de pressão que podem destruir o bombeador.

² Condição de operação de uma bomba de fluxo que ocorre quando a pressão imposta à bomba é igual ou maior que aquela para a qual, de acordo com a curva de operação, a vazão é nula.

armazenagem de água (ou outros fluidos uma vez que o aplicativo permite ajustar as características do fluido como densidade e viscosidade).

De forma a validar os resultados foi modelada uma rede real de produção de petróleo e foram comparados os custos unitário de energia por volume transferido de fluido para cada uma das lógicas de automação avaliadas. Nesse sentido, o aplicativo possui a capacidade de realizar simulações dinâmicas da operação das instalações de bombeamento para verificar, por exemplo, a possibilidade das bombas operarem em horário fora de ponta³, visando à minimização do custo de energia elétrica dos sistemas de abastecimento de água, considerando a capacidade de armazenagem de fluido das instalações.

1.1. OBJETIVOS

Os objetivos da dissertação estão divididos em geral e secundários.

1.1.1. **Objetivo geral**

Implementar uma lógica visando o melhor desempenho energético na automação de bombas em instalações de produção terrestre de petróleo, de forma a maximizar a rentabilidade; minimizar os impactos ao meio ambiente (evitando derramamentos e as consequentes sanções legais associadas); e evitar a violação dos limites operacionais dos equipamentos (evitando o desgaste prematuro ou mesmo a destruição dos mesmos com os consequentes custos associados ao reparo ou à substituição). Essas lógicas poderão ser aplicadas aos controladores existentes nos sistemas de produção de petróleo de modo a reduzir os custos com energia elétrica e aumentar a rentabilidade do negócio de produção terrestre de petróleo.

³ Período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta (ANEEL, 2000).

1.1.2. **Objetivos secundários**

- Identificar a configuração, o funcionamento e os limites operacionais das instalações de bombeio de fluidos na produção terrestre de petróleo do Oeste Potiguar;
- Identificar as técnicas de automação aplicadas atualmente no processo de bombeio de fluidos na produção terrestre de petróleo do Oeste Potiguar;
- Identificar a normalização que rege a tarifação de energia e embasar os cálculos para custo com a energia elétrica;
- Analisar uma ferramenta computacional de modelagem de escoamento de fluidos e identificar por meio da mesma as melhores lógicas de automação visando melhorar o desempenho do sistema.
- Avaliar trabalhos correlatos e, com base nas dificuldades de implantação dos mesmos propor uma metodologia de automação simplificada e alternativa baseada em automação por Controladores Lógicos Programáveis (CLP).

1.1.3. **Metodologia e estrutura da dissertação**

A metodologia adotada na execução deste estudo seguiu uma seqüência lógica de análise, partindo dos dados disponíveis para se atingir o objetivo esperado. Para tanto, a ordem dos estudos que foram desenvolvidos correspondeu a cada Capítulo do trabalho, estruturado da seguinte maneira:

No Capítulo 2 é feita a revisão da literatura, em que é apresentada a origem do trabalho, discutindo e comentando as informações já publicadas sobre o tema da dissertação assim como as ferramentas computacionais desenvolvidas nesses estudos. No Capítulo 2 são apresentados dois aplicativos desenvolvidos em outros trabalhos com o objetivo de simular a operação de redes de escoamento de fluidos.

No Capítulo 3 apresenta-se a configuração, o funcionamento e os limites operacionais das instalações de bombeio de fluidos na produção terrestre de petróleo do

Oeste Potiguar. Essa configuração é analisada de forma a expor os princípios básicos de funcionamento de cada equipamento, assim como os limites que devem ser observados de forma a se evitar o desgaste prematuro ou a destruição dos mesmos. Ainda no Capítulo 3 , apresentam-se as técnicas de automação aplicadas atualmente no processo de bombeio de fluidos na produção terrestre de petróleo do Oeste Potiguar e analisam-se as possibilidades de aprimoramento das mesmas de forma a maximizar a rentabilidade do negócio.

No Capítulo 4 apresentam-se os componentes do custo de energia elétrica a suas origens. Nesse Capítulo são identificadas as tarifas de energia elétrica aplicáveis à instalações em estudo de forma a estimar os ganhos com energia obtidos com a implementação das lógicas de automação apontadas por este trabalho. Ainda no Capítulo 4 é apresentada a participação do consumo de energia elétrica da indústria de petróleo no Oeste Potiguar e no Rio Grande do Norte, assim como a relevância do petróleo como fonte de energia no Brasil.

No Capítulo 5 é apresentada a ferramenta de modelagem de escoamento de fluidos utilizada para obtenção dos resultados, e a partir dos resultados obtidos com o uso desta para simulação de diferentes lógicas de automação é realizada a análise dos mesmos com relação às particularidades de processo.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões baseadas nos resultados obtidos no Capítulo 5, avaliada a proposta de lógica de automação escopo do presente trabalho, apresentando as principais dificuldades encontradas no desenvolvimento do trabalho e elencando sugestões para trabalhos futuros.

2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

No presente Capítulo é exposto um breve histórico da exploração de petróleo, e dentro desse contexto é feita uma explanação sobre a estrutura da indústria de exploração terrestre de petróleo no que tange ao consumo de energia e estrutura das instalações. Com base nestas informações, são abordados alguns programas de incentivo ao uso eficiente de energia no Brasil e as técnicas expostas por estes que melhor se aplicam à indústria de produção terrestre de petróleo⁴. Como grande parte do consumo de energia nesse tipo de indústria é realizado através do bombeio de fluidos por bombas de fluxo acionadas por motores elétricos trifásicos de indução, também serão expostas as medidas de eficiência energética no uso de motores trifásicos de indução e de bombas de fluxos, bem como a redução do consumo de energia elétrica por meio de diferentes lógicas de automação.

Devido ao fato da produção terrestre de petróleo consistir, em grande parte, de transferência de fluidos, são apresentados, na última seção, além de trabalhos voltados para a indústria de petróleo, trabalhos de automação de transferência de fluidos em malhas urbanas de distribuição de água. Ao final desta última seção, são expostas análises e algumas ressalvas oriundas das diferenças entre os sistemas de produção de petróleo e de distribuição de água.

⁴ Como as instalações em questão são existentes, não serão consideradas as medidas de eficiência energética típicas de projetos como capacidade de tancagem, estrutura de malha de dutos, diâmetros rugosidade entre outros.

2.1. A INDÚSTRIA DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

A exploração de petróleo no Brasil foi iniciada em 1938, no campo terrestre da cidade de Lobato/BA. Na década de 70, quando os primeiros campos do recôncavo baiano entravam em maturidade, foi descoberta a província petrolífera marítima da Bacia de Campos, através do campo marítimo de Garoupa (THOMAS, 2004).

Com o passar do tempo e avanço da tecnologia, a exploração de petróleo avançou para maiores profundidades no mar, e hoje a maior reserva petrolífera do país (o pré-sal) se encontra sob uma lâmina de água de 4000 m (THOMAS, 2004, p. 4). Nesse aspecto, os campos terrestres, com vazões cada vez menores e custo unitário de extração maior, se tornaram um investimento menos interessante que os campos marítimos.

Enquanto os campos recém-descobertos se apresentam no ápice de sua produção, os campos terrestres se encontram maduros, e, por esse motivo apresentam tendência acentuada de decréscimo da produção, e conseqüentemente da rentabilidade. De forma a compensar essa tendência, os campos maduros demandam investimentos em métodos de elevação cada vez mais avançados. Esses métodos apresentam, geralmente, consumos de energia mais expressivos que os métodos anteriores.

O estado do Rio Grande do Norte se tornou na década de 1980 a segunda maior área produtora de petróleo do país. Esses campos são maduros e são responsáveis por cerca de 16% do consumo total de energia elétrica dessa microrregião (AZEVEDO, 2011). Em uma indústria desse tipo, claramente eletrointensiva, o consumo de energia elétrica corresponde a uma parcela significativa dos custos operacionais da empresa. Dessa forma, o uso eficiente de energia corresponde a uma lógica com potencial expressivo de aumento da rentabilidade e da competitividade do negócio.

Nos campos de produção de petróleo do Oeste Potiguar, a malha de escoamento de petróleo é essencialmente formada por milhares de poços interligados por redes de centenas de quilômetros de dutos e dezenas de estações coletoras. Nestas estações, o óleo é armazenado em estações coletoras e destas é bombeado através da rede de dutos até as estações de tratamento. Nestas estações, parte da água produzida é separada do óleo e tratada para posterior reinjeção na formação rochosa de forma a aumentar a pressão no reservatório melhorando a recuperação de petróleo. Nesse sistema, tanto nos poços, quanto nas estações coletoras, nas estações de transferência e nas estações de

injeção são utilizadas bombas de fluxo acionadas por motores elétricos trifásicos de indução para movimentar os fluidos (MACHADO, 2006). Nesta configuração, o bombeio de fluidos corresponde à maior parcela do consumo de energia elétrica e consequentemente a uma das maiores parcelas do custo de produção. A Figura 1 mostra um sistema simplificado dessa estrutura.

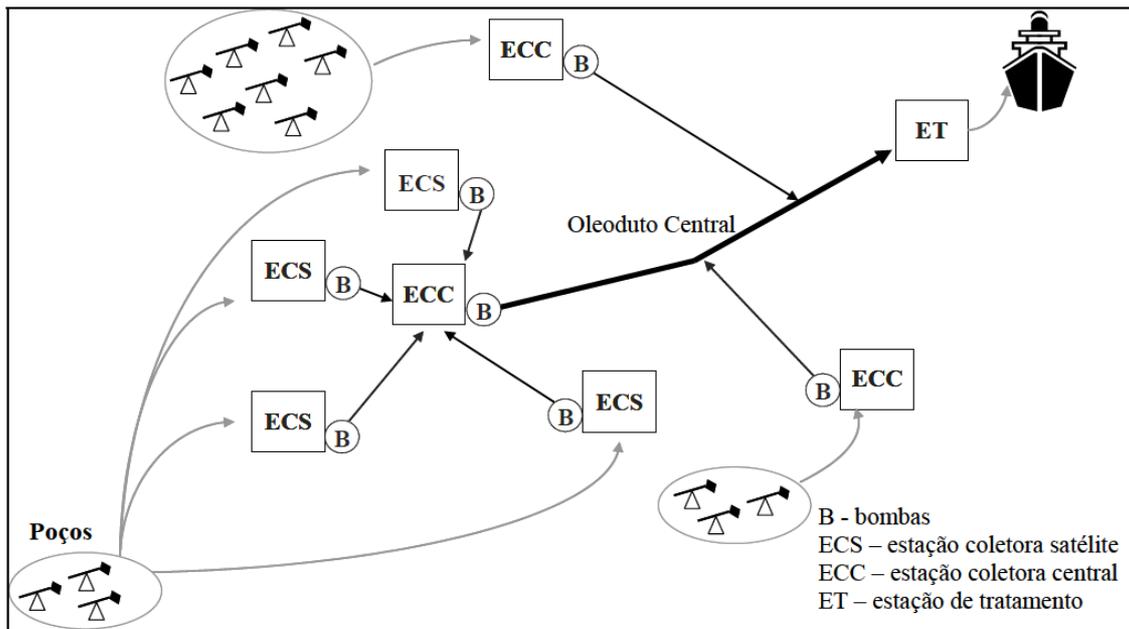


Figura 1 - Rede típica de escoamento de petróleo

Fonte: Brasileiro, 2005, p. 5.

A Figura 1 mostra a estrutura das instalações de produção terrestre de petróleo do Oeste Potiguar. Essa configuração possui poços que bombeiam o óleo para estações coletoras satélites (ECS) que por sua vez transferem essa produção para estações coletoras centrais (ECC). Estas estações enviam o óleo através de um oleoduto central para uma estação de tratamento. Todos os acionamentos, com raríssimas exceções, são realizados por motores trifásicos de indução.

2.2. AÇÕES ENVOLVENDO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Nesta seção serão expostos os principais programas de incentivo à eficiência energética e as técnicas que melhor se adequam à realidade da indústria de produção terrestre de petróleo.

2.2.1. Programas de incentivo à eficiência energética

Dentre os programas de incentivo à eficiência energética, os mais relevantes, dentro do escopo do presente trabalho, são o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), devido às diversas publicações contendo técnicas de eficiência energética, a Lei de eficiência energética para motores elétricos de indução, e o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE).

2.2.1.1. Programa nacional de conservação de energia elétrica

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) foi criado em dezembro de 1985 pelos Ministérios de Minas e Energia e da Indústria e Comércio, e gerido por uma Secretaria-Executiva subordinada à empresa Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRAS). Em 18 de julho de 1991, o PROCEL foi transformado em programa de governo, tendo sua abrangência e suas responsabilidades ampliadas. Seu objetivo é promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica, para que se eliminem os desperdícios e se reduzam os custos e os investimentos setoriais.

Nesse contexto, a ELETROBRAS/PROCEL implementou o Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética (PROCEL INFO). Esse projeto faz parte de um programa de eficiência energética (Projeto BRA/01/001) desenvolvido com recursos doados pelo *Global Environment Facility* (GEF) ao governo brasileiro, por intermédio do Banco Mundial (BIRD), com o apoio do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) (ELETROBRAS, 2013). Os objetivos do PROCEL são:

- a. Facilitar a integração e a colaboração entre os agentes que atuam na área de eficiência energética, sejam eles do Brasil ou de outros países.
- b. Criar e manter uma base de conhecimento dinâmica sobre eficiência energética, a partir de informações produzidas no Brasil e no exterior, e disseminá-la para os públicos interessados pelo tema.

Essa base de conhecimento dispõe de diversas publicações voltadas para o tema de eficiência energética dentre as quais algumas foram elencadas por serem pertinentes ao processo de Produção Terrestre de Petróleo no Oeste Potiguar.

2.2.1.2. Lei de eficiência energética

A Lei N° 10.295/2011 de 17 de outubro de 2011 estabelece a metodologia para a implementação da lei de eficiência energética e delega ao poder executivo o estabelecimento de níveis máximos de consumo de energia para máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados e comercializados no país.

A Portaria Interministerial N° 553 da Consultoria Jurídica do Ministério de Minas e Energia estabelece os níveis máximos de consumo específico de energia, ou os níveis mínimos de eficiência energética para motores elétricos trifásicos de indução com rotor gaiola de esquilo. No dia 12 de dezembro de 2009 entrou em vigor a Portaria N° 553, implicando na obrigatoriedade do atendimento dos novos níveis de rendimentos estabelecidos para motores elétricos trifásicos de 1 a 250 cv (cavalo vapor). Os limites mínimos se tornaram obrigatórios a partir de 12 de dezembro de 2009, não sendo mais permitida a fabricação no País ou a importação de máquinas motrizes de uso final, cujos motores elétricos não atendam aos novos níveis de rendimentos especificados na Portaria supracitada (BRASIL, 2005).

2.2.1.3. Programa brasileiro de etiquetagem

O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) foi criado em 1984 pelo INMETRO com o objetivo de prestar informações sobre eficiência energética dos equipamentos disponíveis no mercado nacional. Composto por 38 Programas de Avaliação da Conformidade que utilizam a Etiqueta Nacional de Conservação da Energia para prestar

informações sobre o desempenho dos produtos no que diz respeito à sua eficiência energética. Esses programas contemplam, inclusive, bombas centrífugas de até 25 cv e motores elétricos de indução trifásicos de até 250 cv. Esses equipamentos correspondem a uma parcela significativa do consumo industrial de energia elétrica (INMETRO, 2012).

O PROCEL e PBE contribuem para o cumprimento da Lei de Eficiência Energética, já que estimulam o desenvolvimento tecnológico dos equipamentos com o objetivo de atingir melhores índices de eficiência energética (BRASIL, 2012).

2.2.2. Eficiência no uso de motores elétricos trifásicos de indução

Criado a mais de cem anos (Sens, 2001 *apud* Silva *et al*, 2010), o motor de indução trifásico de indução ganhou, nos anos 80, com o desenvolvimento dos conversores estáticos de frequência em escala industrial, o mercado dos motores de corrente contínua e motores síncronos devido à facilidade do controle do conjugado e velocidade com relação a estes.

Os motores elétricos constituem boas oportunidades de aplicação de técnicas de eficiência energética tanto pela frequência de aplicação ineficiente dos mesmos quanto pela contribuição dos mesmos para o consumo de energia na indústria e no Brasil (MARQUES *et al* 2006). A Figura 2 mostra a relevância do consumo de energia elétrica dos motores com relação ao Brasil.

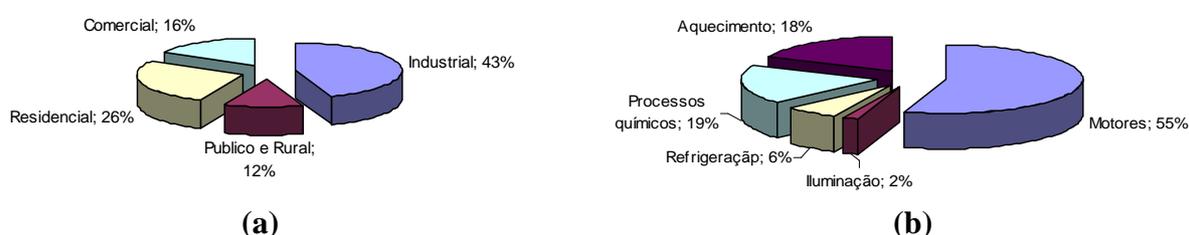


Figura 2 - Consumo de energia no Brasil e na indústria

Fonte: Marques, 2006, p. 397.

A Figura 2a mostra que a indústria correspondia a 43% do consumo nacional de energia em 2006, e a Figura 2b mostra que os motores elétricos correspondiam a 55% do consumo nacional de energia (MARQUES, 2006, p. 397).

A participação dos motores de indução no consumo industrial é expressivo (COPEL, 2005), sendo os do tipo trifásico de indução os mais significativos, seja em número, ou em consumo de energia elétrica.

2.2.2.1. Dimensionamento de motores elétricos trifásicos de indução

Os motores trifásicos de indução apresentam perdas fixas, como as perdas no ferro e as perdas devido à ventilação e ao atrito e perdas variáveis com o carregamento do motor, como as perdas no cobre, que crescem com o quadrado da corrente de carga. Sendo assim, com pequenas cargas, em relação a sua potência nominal, o rendimento do motor é baixo, tendo em vista serem grandes as perdas fixas em comparação com a potência fornecida. Quando o carregamento do motor cresce, o rendimento se eleva até alcançar o seu valor máximo, que ocorre quando as perdas em vazio e as perdas devido à corrente de carga se equivalem. Além desse ponto, as perdas no cobre se tornam elevadas em relação às perdas em vazio, fazendo com que o rendimento diminua, conforme mostra a Figura 3.

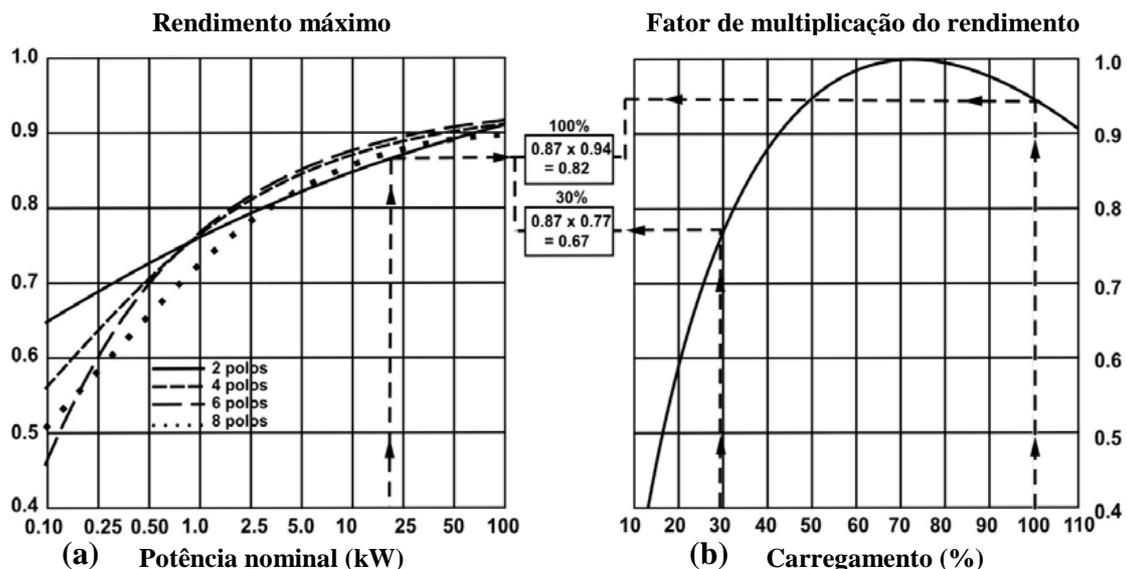


Figura 3 - Rendimento e carregamento de motor com potência

Fonte: COPEL, 2005, p. 33.

A Figura 3b mostra a curva de rendimento de um motor de indução típico em função do carregamento percentual. É possível observar nesta curva que o ponto de rendimento máximo ocorre a cerca de 75% do carregamento nominal e este cai acentuadamente quando operando com carregamento inferior a 50%. Desta forma, sob o ponto de vista da conservação de energia elétrica, o principal parâmetro a ser observado quando do dimensionamento é a potência nominal do motor, que deve ser a adequada para o serviço a que se destine. Potências nominais muito superiores à realmente necessária resultam em desperdícios de energia, elevação da potência solicitada, redução do fator de potência da instalação elétrica da indústria e maiores perdas nas redes de distribuição de energia e nos transformadores. Deve-se, sempre que possível, escolher o motor de modo que seu carregamento seja no mínimo superior a 50%, dando preferência a que ele seja maior que 75% (COPEL, 2005).

Até mesmo os motores de alto rendimento podem constituir oportunidades de economia de energia elétrica. É comum que estes equipamentos estejam sobredimensionados principalmente em projetos envolvendo vários projetistas, pois cada um tende a incluir fatores de segurança resultando em equipamentos muito maiores que o necessário. Vários instrumentos podem ser utilizados para verificar se um motor se encontra sobredimensionado, como mostra a Figura 4.



Figura 4 - Instrumentos para análise de carregamento

Fonte: Marques, 2006, p. 408.

Como exemplo, pode ser mostrada a situação em que um motor de 100 cv, IV pólos, em 440 V (volt), operando com uma corrente de 150 A (ampère). Com essas

informações e a partir das curvas do motor em questão, como mostra a Figura 5, (MARQUES et al 2006, p. 409), obtém-se o rendimento de 93%.

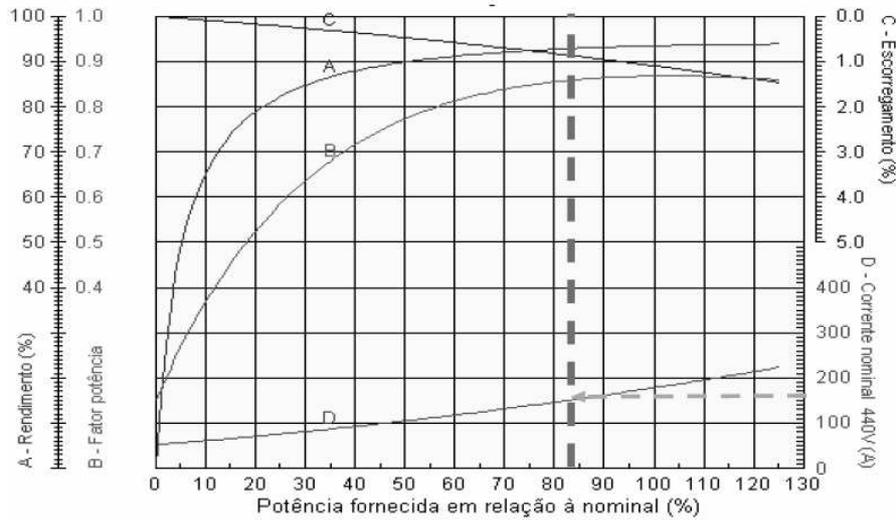


Figura 5 - Curvas características de motor de 100 cv

Fonte: Marques, 2006, p. 409.

Ainda analisando as informações da Figura 5, percebe-se que como a potência utilizada é de 85 cv, é possível utilizar um motor de 90 cv. Das curvas características desse novo equipamento é possível depreender que este irá trabalhar com um rendimento de 95% e uma corrente de 140 A. Além da economia de energia associada ao aumento de rendimento, a diminuição da corrente irá diminuir as perdas elétricas no sistema (MARQUES et al 2006). A Figura 6 mostra as curvas características de um motor de 90 cv.

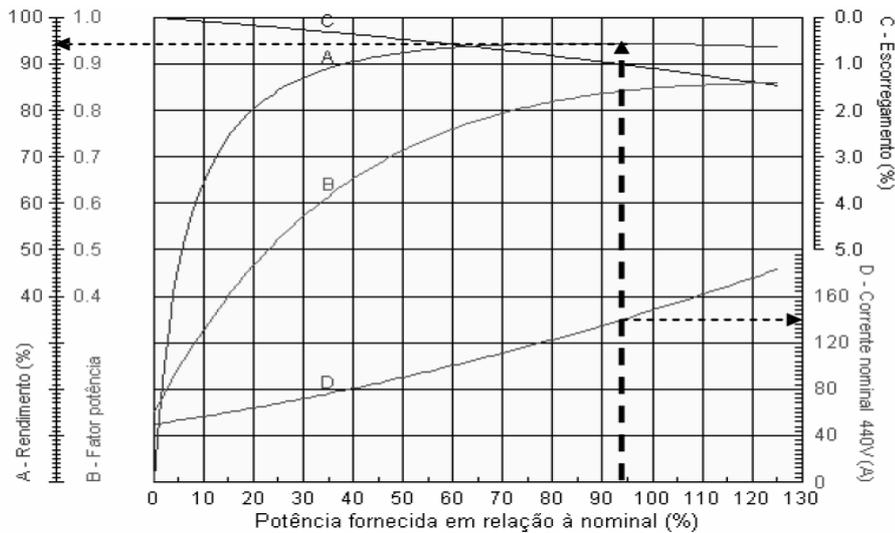


Figura 6 - Curvas características de motor de 90 cv

Fonte: Marques, 2006, p. 409.

2.2.2.2. Substituição de motores elétricos trifásicos de indução

Um motor de indução em uma indústria com um ciclo de vida de 12 a 20 anos pode ter um custo de energia anual de 5 a 10 vezes seu custo de aquisição. Durante sua vida útil, um motor de indução pode custar, em gastos com energia elétrica, de 60 a 200 vezes seu custo de aquisição (Almeida, 2006 *apud* Silva *et al*, 2010). Neste horizonte, o custo de aquisição de um equipamento novo possui pequena relevância com relação ao custo com o equipamento durante seu ciclo de vida (Holmquist, 2006 *apud* Silva, 2010), conforme pode ser observado na Figura 7.

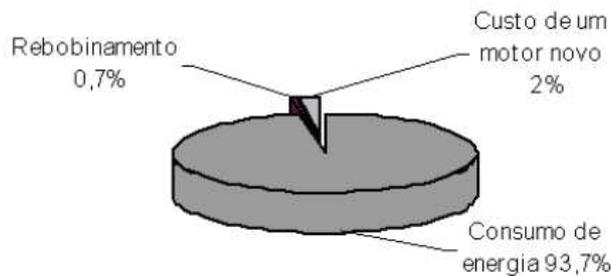


Figura 7 - Custos durante a vida útil de um motor de indução

Fonte: Silva *et al*, 2010.

Na Figura 7 é possível observar que os gastos com energia correspondem ao maior dos custos ao longo da vida útil de um motor de indução. Em algumas situações, a economia com energia elétrica ao longo do tempo justifica a substituição de um motor antigo por um motor de alto rendimento. Essa substituição se tornou mais interessante a partir do advento da lei de eficiência energética. Como a fabricação desses equipamentos se tornou compulsória, a produção em massa barateou o material favorecendo a substituição dos equipamentos.

2.2.3. Eficiência energética no uso de bombas de fluxo

As cargas centrífugas (bombas e ventiladores) correspondem a mais de 60% das aplicações de motores na indústria (MARQUES et al, 2006). Essa realidade não é diferente da realidade da indústria de produção terrestre de petróleo do Oeste Potiguar. Bombas de fluxo são máquinas em que a movimentação do líquido é produzida por forças que se desenvolvem na massa líquida, em consequência da rotação do rotor com um determinado número de pás especiais.

É comum na indústria a utilização de bombas em rotação fixa fazendo-se a variação da vazão no processo, principalmente em sua diminuição, através da utilização de válvulas que estrangulam o fluxo aumentando a pressão na bomba e as perdas de energia no sistema (MARQUES et al, 2006). Esse tipo de controle se encontra ilustrado na Figura 8.

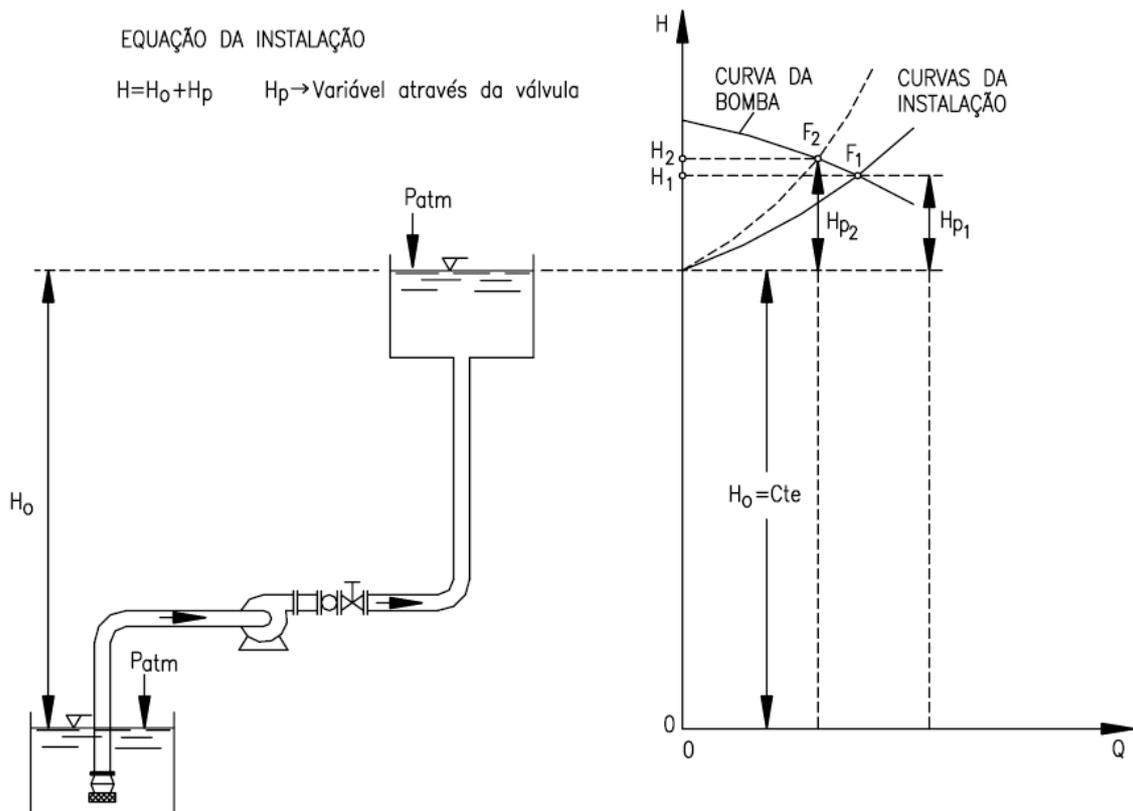


Figura 8 - Variação da vazão por restrição da descarga

Fonte: Marques, 2006, p. 272.

Na configuração exibida na Figura 8, o sistema é forçado a deixar de trabalhar no ponto F_2 ao invés do ponto F_1 por meio da inclusão de uma restrição na tubulação de descarga da bomba.

Outra forma de controle de vazão em uma bomba sem variação de velocidade de rotação da bomba é a instalação de *bypass*, conforme mostra a Figura 9 (MARQUES et al, 2006).

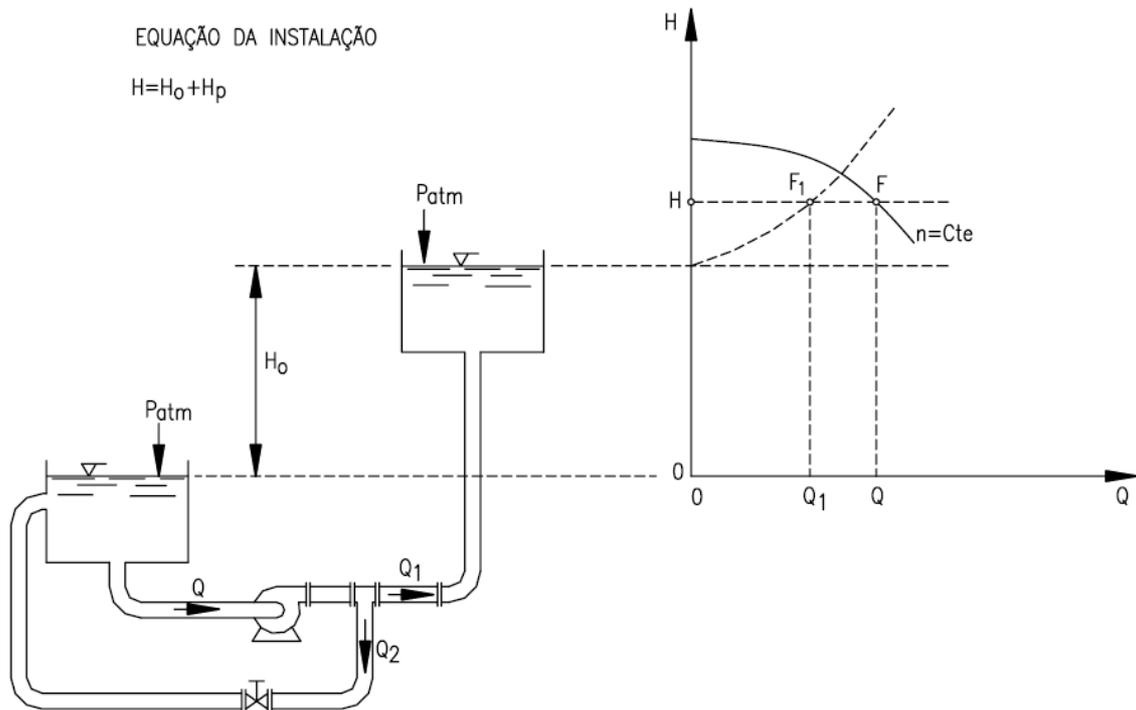


Figura 9 - Variação da vazão por *bypass*

Fonte: Marques, 2006, 272.

A configuração mostrada na Figura 9 implica no desperdício de energia e é prejudicial ao funcionamento da bomba (MARQUES et al, 2006)

Um método de variação de vazão que tem se tornado mais interessante, com o avanço da tecnologia de semicondutores, é o controle por variação de velocidade. A Figura 10 mostra uma comparação entre os três métodos ilustrados. O controle de vazão por restrição da descarga é exibido na Figura 10a onde o sistema que operava no ponto $F_1 (Q_1, H_1)$ foi levado a operar no ponto $F_2 (Q_2, H_2)$. Essa mesma redução de vazão pode ser obtida através da redução de n para n' , o que levaria o sistema ao ponto de funcionamento $F_3 (Q_2, H_3)$ (MARQUES et al, 2006).

A configuração em *bypass* mostrada na Figura 10b mantém a rotação constante e reduz a vazão do sistema levando o sistema a operar no ponto de operação $F(Q, H)$. Essa configuração também apresenta um consumo de energia maior com relação ao controle por variação de velocidade, situação na qual o sistema seria levado a operar no ponto $F_1 (Q_1, H)$ (MARQUES et al, 2006).

È possível observar na Figura 10a que com a redução da rotação da bomba centrífuga de n para n' , é possível reduzir a vazão de bombeio de Q_1 para Q_2 por meio

da alteração da curva $Q \times H$ da bomba. Essa opção de operação evita o desperdício de energia presente nas outras soluções, diminuindo o consumo de energia e os gastos com energia elétrica (MARQUES et al, 2006, p. 273).

Apesar das vantagens técnicas do controle de vazão por variação da velocidade das bombas centrífugas, esta solução possui a desvantagem de utilizar um acionador mais caro. De forma a definir a viabilidade de utilização de cada método, devem ser levantados os tempos e pontos de operação desejados para o sistema e o valor presente do custo com energia deve ser comparado ao custo de investimento de um acionador com velocidade variável (MARQUES et al, 2006).

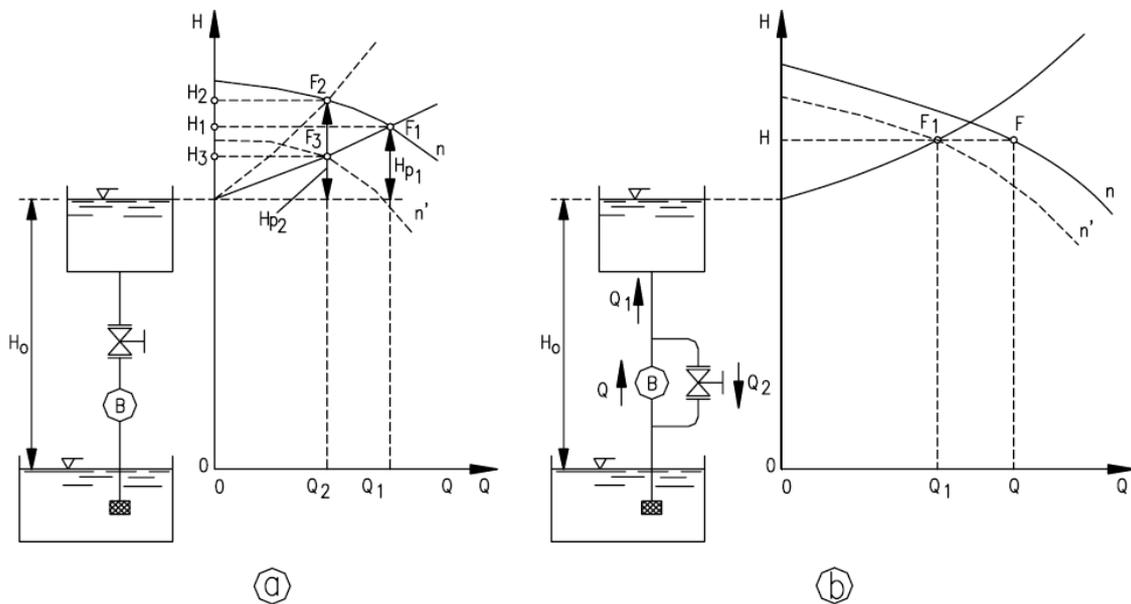


Figura 10 - Métodos de variação de vazão

Fonte: Marques, 2006, p. 273.

2.2.4. Automação do acionamento de bombas

Em sistemas de transferência de fluidos como os da indústria de produção terrestre de petróleo, o consumo de energia é fortemente influenciado pela forma como as bombas são acionadas ao longo do período de operação. É possível, por exemplo, armazenar a produção proveniente dos poços nas estações satélites ou coletoras durante

o horário de ponta⁵ e acionar as bombas no horário fora de ponta⁶, quando a energia é mais barata. Esta forma de operação pode ser realizada de forma automática pelos controladores existentes nestas instalações.

Os custos com energia elétrica podem ser reduzidos através da redução da demanda contratada. O primeiro passo para a redução da demanda é a implantação de um controlador de demanda e o estabelecimento de uma programação de cargas elétricas. Por programação de cargas elétricas entende-se um planejamento rígido de funcionamento das máquinas elétricas de uma indústria, procurando escalonar o seu funcionamento ao longo da jornada de trabalho (COPEL,2005).

Uma programação da produção bem elaborada significa, automaticamente, economia de energia elétrica, pois as máquinas operatrizes e os sistemas de utilidade são mais bem aproveitados, os picos produtivos, atenuados, etc. Por isso, ela deve ser aprimorada de tal maneira que as máquinas e os equipamentos elétricos operem o mais próximo possível de sua capacidade nominal; sua produção seja, dentro das possibilidades, contínua; e as operações que mais requeiram energia elétrica ocorram nos períodos de tarifas mais baixas (COPEL, 2005).

Diversos trabalhos de automação por agendamento da produção já foram desenvolvidos com esse tema em aplicações tanto em sistemas de produção terrestre de petróleo como em sistemas de distribuição de água.

2.2.4.1. Aplicação em sistemas de produção terrestre de petróleo

Almeida (2001) apresenta uma avaliação da técnica de minimização de energia modificada associada à otimização multiobjetivo por meio de algoritmos evolutivos. Seu trabalho, apresenta uma aplicação de agendamento de bombeio na refinaria

⁵ Período definido pela concessionária e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, "Corpus Christi", dia de finados e os demais feriados definidos por lei federal, considerando as características do seu sistema elétrico. Concessionário considerando as características do seu sistema elétrico (ANEEL, 2001).

⁶ Período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta (ANEEL, 2000).

Henrique Lage (REFAP) da PETROBRAS localizada em São José dos Campos. De acordo com esse trabalho, a maior das dificuldades no problema de otimização multiobjetivo é a avaliação simultânea do desempenho dos objetivos. As técnicas convencionais como a de agregação linear escalar (FONSECA *and* FLEMING, 1995 *apud* ALMEIDA, 2001) e a técnica de distância ao objetivo (HORN, 1997 *apud* ALMEIDA, 2001) utilizam pesos fixos para associar os diversos resultados. A técnica de minimização de energia (ZEBULUM *et al*, 1998 *apud* ALMEIDA, 2001) é capaz de alterar esses pesos de forma a otimizar o desempenho do algoritmo evolutivo.

Brasileiro (2005) e Machado (2006) desenvolveram aplicativos com o objetivo de otimizar o agendamento de bombas. Esses programas são capazes de modelar as pressões e vazões de fluido transportado, além dos consumos de energia elétrica em todo o sistema para diversas condições operacionais. O aplicativo desenvolvido por Brasileiro (2005) simula as diversas condições operacionais no sistema e consumo de energia para diversas combinações de chaveamento de bombas. As soluções de chaveamento de bombas que apresentam os melhores resultados são selecionadas e utilizadas para gerar outras soluções que são novamente avaliadas utilizando a técnica de algoritmos evolutivos. Estes trabalhos culminaram no desenvolvimento do aplicativo *SmartPumping*.

No caso especificamente do trabalho desenvolvido por Brasileiro (2005), os tempos de processamento necessários para a simulação de redes de escoamento de petróleo do porte da existente no Oeste Potiguar, se mostraram inviáveis de acordo com o autor (BRASILEIRO, 2005).

Já a metodologia apresentada por Machado (2006) consiste em um aprimoramento do trabalho de Brasileiro (2005). Em Machado (2006), são utilizadas técnicas aprimoradas de programação com o objetivo de reduzir os tempos de processamento e adquirir soluções viáveis para o escalonamento de bombas em tempos viáveis. Apesar do aprimoramento da técnica, algumas lacunas ainda existem nesses trabalhos, pois não são simuladas, por exemplo, as variações de rendimento dos motores elétricos ou do bombeador com a variação do ponto de operação. Outro aspecto não considerado nesses trabalhos é a quantidade de chaveamentos ao longo do dia. A maioria das soluções apresentadas por Brasileiro (2005) e Machado (2006), força o sistema a uma grande quantidade de operação das bombas ao longo do dia. Esse tipo de operação tende a reduzir a vida útil dos equipamentos implicando em um custo com reparo ou aquisição

que não é contabilizado nos programas. Os resultados gerados pelo programa, pela própria característica da programação utilizando algoritmos evolutivos não são intuitivos; não são completamente previsíveis; e não agregam nenhum conhecimento aos operadores. Esse tipo de funcionamento gerou rejeição por parte dos operadores do sistema, o que acabou por desacreditar a aplicação baseada em algoritmos evolutivos e fazer com que a mesma caísse em desuso⁷.

Além desses fatores, ambos os métodos assumem que a automação será realizada por um único computador, o que demandaria um investimento considerável em capacidade de processamento em um equipamento sem redundância do qual dependeria todo o funcionamento de um sistema. Outro obstáculo à aplicação dessa metodologia é que, devido à centralização da tomada de decisão, a automação de todo o sistema dependeria do funcionamento da rede de comunicação, que é passível de falha e está sujeita a condições atmosféricas adversas ou danos físicos aos componentes do sistema.

No que tange à abordagem, o agendamento de bombas com tempos definidos gera um número grande de busca, o que implica em aumento exponencial da complexidade do problema e consequentemente do tempo de processamento.

Um trabalho similar foi desenvolvido na Unidade de Operações do Rio Grande do Norte e Ceará da PETROBRAS (UO-RNCE) em 2011. Tal trabalho visava regular o escoamento de forma a evitar a ultrapassagem dos limites operacionais dos dutos. Esse trabalho utilizou a implementação de lógicas de automação nos próprios controladores das estações de transferência de petróleo para diminuir o número de chaveamentos. Este trabalho, além de obter sucesso na redução do número de chaveamentos, ocasionou a redução do número médio de motores ligados.

⁷Entrevista realizada com o Eng. Vicente Delgado Moreira sobre resultados da aplicação do trabalho de Machado (2005) por ter integrado a banca examinadora da dissertação de mestrado.

2.2.4.2. Aplicação em sistemas de distribuição de água

Um dos aplicativos disponibilizados no PROCEL INFO⁸ é o EPANET⁹, que foi idealizado por um dos laboratórios da *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA), com o intuito de desenvolver e implementar tecnologias ambientais inovadoras e economicamente viáveis. Uma vez que o EPA disponibiliza o EPANET livremente com seu código fonte, este pode ser adaptado para outras versões no mundo.

A versão do programa EPANET para o português foi uma iniciativa do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS), pertencente ao Departamento de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) através de um convênio de cooperação técnico-financeira de 2006 com a ELETROBRAS.

Dentre as funções do EPANET, uma das que pode ser aplicada à indústria de produção terrestre de petróleo do Oeste Potiguar é realização de cálculos do efeito de ações que diminuem o consumo de energia elétrica em um sistema de bombeio e armazenagem de água ou outros fluidos, uma vez que o aplicativo permite ajustar as características do fluido como densidade e viscosidade. Nesse sentido, o programa possui a capacidade de realizar simulações dinâmicas da operação das instalações de bombeamento verificando o consumo de energia para várias lógicas de automação ou agendamento de bombas.

Barán (2005) apresenta uma nova abordagem de agendamento de transferência por meio de otimização multiobjetivo de bombas por algoritmos evolutivos. Ainda segundo Barán (2005), devido às conhecidas dificuldades associadas à definição de

⁸ O PROCEL INFO é o Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética implementado pelo Eletrobras/Procel para disseminar informações qualificadas sobre o uso racional e eficiente de energia em diferentes segmentos da sociedade, com vistas a estabelecer um mercado auto-sustentável e autônomo de eficiência energética no Brasil

⁹ O nome EPANET é uma combinação da sigla do nome em inglês da agência de proteção ao meio ambiente norte americana (*U.S. Environmental Protection Agency*-EPA), que desenvolveu o código original, com a palavra inglesa “net”, cujo significado em português é “rede”, como uma alusão à capacidade do programa de simular o comportamento de redes de escoamento de fluidos ao longo do tempo.

pesos, necessária à associação dos diversos desempenhos dos objetivos de forma a obter o custo combinado, é realizada a minimização simultânea e independente de todos os objetivos.

Além de buscar a minimização dos custos com energia elétrica, Barán (2005) traça como objetivos a minimização dos custos com manutenção de bombas (LANSEY *et al*, 1994 *apud* BARÁN, 2005), a obediência aos níveis máximo e mínimo dos reservatórios e a obediência aos limites de demanda contratada de energia.

A forma de minimização do custo de manutenção é buscada pela redução do número de chaveamento de uma mesma bomba. A minimização dos custos com energia elétrica é obtida por meio do acionamento do número mínimo de bombas no horário de ponta. Os limites mínimos dos reservatórios não podem ser violados, pois é necessário manter uma pressão mínima nos dutos. Os limites máximos não podem ser ultrapassados de forma a evitar danos aos dutos e transbordamento dos tanques.

A abordagem de agendamento de bombas por algoritmos evolutivos apresenta dificuldades inerentes ao processo principalmente advindas da dificuldade de definição de pesos para compor o custo combinado. Além dessa dificuldade, essa abordagem pressupõe que a programação resultante dos cálculos será comandada por um único dispositivo centralizado, o que difere do sistema de automação existente nas instalações de produção de petróleo do Oeste Potiguar. Nessas instalações, cada poço e estação de transferência dispõe de um controlador capaz de automatizar a operação com base em grandezas medidas. Ao contrário dos sistemas de abastecimento de água, as fontes do petróleo (poços e estações) se encontram dispersos e, em sua grande maioria possuem dispositivos com capacidade para controlar o funcionamento de cada uma das bombas.

Nesse sentido, a própria característica do sistema torna mais racional, ao invés de uma automação centralizada baseada em cálculos não verificáveis, o aprimoramento das lógicas de automação de cada um dos dispositivos considerando o todo que cada dispositivo possa executar de forma autônoma com regras claras e técnicas de programação correntes.

A lógica proposta nesta dissertação não utiliza a abordagem de otimização multiobjetivo devido principalmente à dificuldade associada à avaliação simultânea do desempenho dos objetivos e da subjetividade associada à composição de uma função objetivo a partir de grandezas distintas (ALMEIDA, 2001). Será mostrado nesta

dissertação que os objetivos de redução de número de chaveamentos, pressão nos dutos e consumo de energia não são conflitantes e podem, em certa medida, serem alcançados a partir da utilização de lógicas simples de automação implementadas em dispositivos existentes. Essa abordagem, além de evitar investimentos em equipamentos novos, possui maior confiabilidade que a automação centralizada e menor probabilidade de gerar rejeição por parte dos operadores conforme ocorrido com a lógica apresentada por Machado (2006). Ainda com relação a este último trabalho, não será utilizada a técnica de algoritmos evolutivos devido à inviabilidade de automação em tempo real para malhas de escoamento de petróleo do porte das existentes no Oeste Potiguar (MACHADO, 2006). Não será utilizada também a lógica de agendamento de bombas (*scheduling*), pois esta implica em perda considerável da confiabilidade devido à centralização da automação.

Da mesma forma que Brasileiro (2005) e Machado (2006) será objetivada a redução de custos de energia elétrica e a obediência aos limites operacionais dos equipamentos. Adicionalmente a estes trabalhos, será objetivada a redução do número de chaveamento de bombas de forma a reduzir os custos associados à manutenção de forma similar ao realizado por Barán (2005) e Lansey *et al* (1994 *apud* BARÁN, 2005). Ainda como este trabalho será objetivado a obediência aos níveis mínimo e máximo dos tanques.

Diferente do trabalho desenvolvido na UO-RNCE, será buscada a redução dos custos com energia elétrica considerando a variação dos custos de energia ao longo do dia.

Como produto desta dissertação, serão selecionadas lógicas de automação baseadas em nível de tanques, horário do dia e estado das bombas que evitam a violação dos limites operacionais dos equipamentos e reduzem o custo de energia por unidade de fluido transferido.

Para avaliar a eficácia das técnicas e validar a lógica proposta será utilizado o aplicativo EPANET. Este aplicativo tem a capacidade de simular o comportamento de um sistema de escoamento de fluidos controlado por lógicas simples que podem ser modeladas em CLPs existentes nas instalações. Este aplicativo também possui a capacidade de calcular os custos com energia elétrica para diferentes tarifas de energia elétrica ao longo do dia. Como as características do fluido são variáveis de entrada do

EPANET, este pode ser utilizado para modelar o comportamento de uma rede de escoamento de petróleo apesar de ter sido originalmente desenvolvido para sistemas de distribuição de água.

No Capítulo 3 serão expostas as características de um sistema real de produção terrestre de petróleo e será desenvolvida a metodologia proposta para automação utilizando como base os trabalhos já desenvolvidos e os conceitos expostos neste Capítulo.

3. REDES DE ESCOAMENTO DE PETRÓLEO

De forma a definir a melhor lógica de automação, é necessário simular o comportamento de uma rede real de produção terrestre de petróleo. No presente Capítulo será mostrada a configuração de uma rede real existente no Oeste Potiguar com seus limites de operação. Por fim, serão expostas as lógicas de automação aplicadas a estas instalações assim como a lógica proposta pelo presente trabalho.

3.1. OPERAÇÃO DE REDES DE ESCOAMENTO DE PETRÓLEO

Como foi explicitado no Capítulo 2, o ponto de trabalho de uma bomba hidráulica é definido pela interseção entre a curva característica HxQ da bomba utilizada e a curva HxQ do sistema. Um fato notável é que o acionamento de uma bomba em um sistema típico onde as descargas das bombas estão ligadas ao mesmo duto, irá modificar a curva do sistema para todas as outras bombas. Outro aspecto do processo de produção terrestre de petróleo é o sistema de tratamento de água que, para ser eficaz, depende da regularidade da vazão. Devido a isso, o desligamento intuitivo das bombas no início do horário de ponta irá gerar também o acionamento simultâneo de todas as bombas ao final do horário de ponta, aumentando a pressão nas linhas e, conseqüentemente, a contrapressão em todas as bombas do sistema, diminuindo, dessa forma, o rendimento do bombeio e afetando a especificação do produto podendo ocasionar sanções de órgãos reguladores.

O tempo de serviço deteriora o desempenho de um bombeador e a única forma segura de verificar o desempenho de uma bomba após determinado tempo de serviço é

através de um teste de desempenho para levantamento das curvas características. Esse fato pesa contra a automação de bombas baseada em modelagem do sistema, pois os cálculos são realizados com base em uma representação estática do sistema que devem ser atualizados com base em testes periódicos sob pena de operar o sistema de forma diferente do simulado (MATTOS E. E.; FALCO R., 1998, p. 162). Esse argumento favorece a automação baseada em regras simples criadas a partir da análise do comportamento típico do sistema, que não se altera ao longo do tempo.

No que tange às bombas centrífugas, existe uma vazão mínima permissível uma vez que em baixas velocidades o sistema de equilíbrio é comprometido gerando esforços axiais que irão prejudicar os mancais da bomba. Além disso, uma vazão pequena significa um maior aquecimento (MATTOS E. E.; FALCO R., 1998, p. 165).

Uma breve análise dimensional do conceito de altura manométrica (H) permite perceber que essa grandeza expressa a quantidade de energia por unidade de massa. Nesse sentido, em um sistema de transferência de fluidos eficiente deve ser buscada a redução do valor da altura manométrica demandada pela bomba (MATTOS E. E.; FALCO R., 1998, p. 135).

Um dos fatores que afeta a curva de altura manométrica do sistema em função da vazão ($H \times Q$) é a forma de escoamento. Idealmente no escoamento de um fluido, todos os filetes líquidos são paralelos entre si e as velocidades em cada ponto são invariáveis em direção e magnitude. Este escoamento é dito laminar. A existência de dois tipos distintos de escoamento foi demonstrada experimentalmente por Osborne Reynolds (REYNOLDS, 1883) pela injeção de uma pequena quantidade de líquido colorido na entrada de uma tubulação de vidro cuja vazão podia ser controlada. Em baixas velocidades, o líquido colorido assumiu uma forma alongada e retilínea enquanto que para um aumento gradual de vazão, a partir de uma determinada velocidade, o regime muda e a linha de líquido colorido se torna ondulada e forma vórtices difundindo-se na água. Este regime é conhecido como turbulento. Resultados experimentais e modelagem matemática mostram que no regime laminar, a perda de carga cresce linearmente com a velocidade do fluido, enquanto que para regime turbulento a perda de carga é proporcional ao quadrado da velocidade do fluido (MATTOS E. E.; FALCO R., 1998, p. 46).

Como a perda de carga no sistema aumenta com o aumento da vazão, existe uma determinada vazão para a qual a perda de carga no sistema antes da bomba faz com que a altura manométrica seja a mínima necessária para que não haja cavitação. Esta altura manométrica é conhecida pela sigla NPSH derivada de expressão em inglês *Net Positive Suction Head* (NPSH). A vazão para a qual a perda de carga no sistema antes da bomba proporciona esta altura manométrica, é vazão máxima permissível para esta bomba neste sistema. (MATTOS E. E.; FALCO R., 1998, p. 181).

Existem outras limitações inerentes ao sistema e aos equipamentos dentre os quais o mais notório é o problema da cavitação (MATTOS, 1998).

3.1.1. Cavitação

A cavitação é um dos problemas operacionais mais notórios em sistemas de bombeio. Em uma abordagem simplificada, a cavitação ocorre quando a pressão absoluta em qualquer ponto de um sistema atinge um valor igual à pressão de vapor do líquido na temperatura de bombeamento (tipicamente imediatamente antes do impelidor da bomba), o que faz com que parte deste líquido se vaporize. As bolhas de gás continuam em movimento com o líquido bombeado e entram em uma região onde a pressão absoluta é novamente maior que a pressão de vapor do líquido na temperatura de bombeamento e a bolha colapsa e retorna à fase líquida. Esse colapso gera ondas de choque que em último caso podem ocasionar a destruição da bomba. Durante este fenômeno, ocorre a formação de diversas bolhas que têm ciclos entre crescimento e colapso da ordem de poucos milésimos de segundo podendo alcançar a ordem de 25.000 ciclos por segundo, e desenvolvem pressões da ordem de 1.000 atm (atmosfera) conforme estudos teóricos experimentais. Isso resulta em um aquecimento local na superfície metálica ou mesmo em perda de material do impelidor (MATTOS E. E.; FALCO R., 1998, p. 167).

Estudos mostraram que o fenômeno de cavitação não é tão simples, pois, para que haja a formação de bolhas é necessário que, além da diminuição da pressão absoluta abaixo da pressão de vapor do líquido na temperatura de bombeamento, haja a ruptura do líquido e essa ação depende da resistência à tensão, correlacionada à tensão superficial do líquido à temperatura de operação. Essa resistência na prática é reduzida

devido à existência de impurezas no líquido. Como o equacionamento desse fenômeno é extremamente complexo e baseado em hipóteses simplificadoras e demanda o levantamento de diversos fatores empíricos, na prática é considerada como pressão crítica para cavitação a pressão de vapor do líquido adicionada de um fator de segurança de 2 mca (metro de coluna de água). Essa margem de segurança deve ser reavaliada em condições em que o nível de impurezas no fluido é elevado (MATTOS E. E.; FALCO R., 1998, p. 174).

3.2. CONFIGURAÇÃO DA REDE PILOTO

Para avaliação e validação das soluções propostas, será utilizada a modelagem da rede piloto da UO-RNCE apresentada por Machado (2006). Essa rede de escoamento de petróleo é composta pelas estações coletoras Lorena (LOR), Riacho da Forquilha (RFQ) e Leste de Poço Xavier (LPX) da PETROBRAS, que bombeiam sua produção para a Estação Coletora Central Upanema (UPN). Na Figura 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) (MACHADO, 2006).

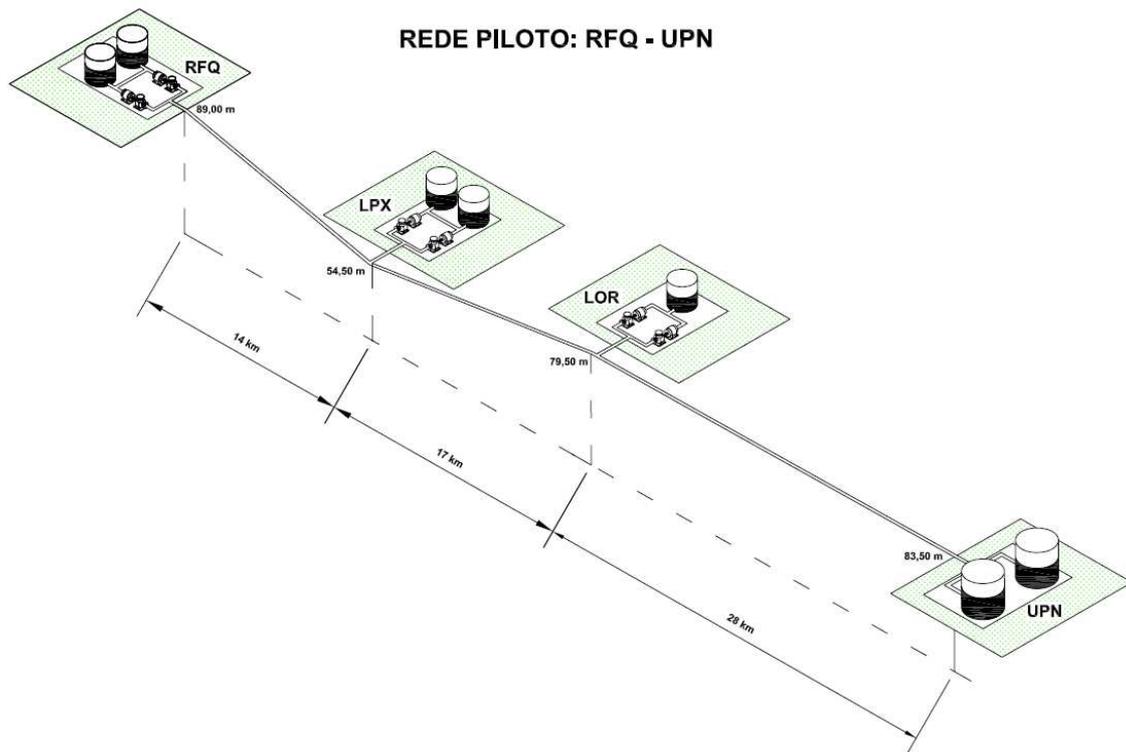


Figura 11 - Esquema da rede piloto da UO-RNCE

Fonte: Machado, 2006, p. 11.

As estações de RFQ, LPX e UPN contêm dois tanques de armazenamento cada. Ao contrário de LPX, os tanques de RFQ e UPN não são equalizados. Todas as seis bombas do sistema são do tipo volumétrico rotativo. Nesse tipo de bomba, o fluido é movido por ser forçado a executar o mesmo movimento do impulsor. Estas podem operar 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) (MACHADO, 2006).

As bombas rotativas são também conhecidas como de deslocamento positivo ou volumétricas. Nelas, a vazão teórica é igual ao produto do deslocamento volumétrico pela rotação. Na prática, isso não ocorre exatamente devido às fugas internas de líquido que crescem com o aumento da diferença entre a pressão manométrica de saída e a pressão manométrica de entrada. Dentre as vantagens das bombas rotativas, para a aplicação em questão se destacam a alta eficiência (LIMA, E. P. C., 2003, p. 499).

As bombas de parafuso são um tipo de bomba rotativa e são assim chamadas pois utilizam parafusos como elementos bombeadores. O giro do parafuso helicoidal simples dentro de um estator de elastômero vulcanizado com perfil de rosca interna helicoidal

de dupla entrada ocasiona o movimento das cavidades existentes entre estes no sentido do fluxo (da sucção para a descarga). Devido a esse princípio, as bombas rotativas de um parafuso são mais conhecidas como bombas de cavidades progressivas (BCP) e têm sido utilizadas na PETROBRAS desde a década de 70 em muitos casos substituindo com vantagens as unidades de bombeio ou “cavalos-de-pau” (LIMA, E. P. C., 2003, p. 515).

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 via única. Bombas volumétricas rotativas são adequadas para aplicação em altas pressões, com fluidos viscosos e de baixa pressão de vapor (MACINTYRE, 1997 *apud* MACHADO, 2006).

3.3. CONFIGURAÇÃO DOS DUTOS DA REDE PILOTO

O primeiro trecho da rede, entre RFQ e LPX possui diâmetro interno do duto de 154,00 mm (milímetro); já os demais trechos possuem diâmetro interno de 261,88 mm. O oleoduto que sai de RFQ passa pela estação LPX, o que significa que o trecho entre LPX e LOR deve ser capaz de transferir, além da produção de LPX, a produção de RFQ, e assim por diante. As Tabelas 1, 2 e 3, mostram respectivamente os dados físicos dos tanques, dutos e bombas fornecidos para a rede piloto (MACHADO,2006).

Tabela 1 - Dados físicos dos tanques da rede piloto

Estação	Altura (m)	Diâmetro (m)	Cota da base (m)
RFQ	7,612	7,673	89,00
	7,612	7,673	89,00
LPX	8,200	5,000	54,50
	8,200	5,000	54,50
LOR	7,300	7,637	79,50
UPN	9,112	11,000	83,50
	9,112	11,000	83,50

Fonte: Machado, 2006, p. 12.

Dos dados contidos na Tabela 1 é possível observar que os tanques da estação de Riacho da Forquilha se encontram mais altos que os demais seguidos dos tanques da estação de Upanema, Lorena e Leste de Poço Xavier respectivamente. Estas informações são oriundas da topologia da região e dos locais onde as estações foram construídas. É possível observar também que os tanques da estação de Upanema possuem as maiores altura e diâmetro. Essa informação é justificada pelo fato de esta estação receber a produção de todas as demais, conforme pode ser observado na Figura 11.

Tabela 2 - Dados físicos das bombas da rede piloto

Estação	Fabricante	Modelo
RFQ	NETZCH	8NE100A
	NETZCH	8NE100A
LPX	NETZCH	8NE100A
	NETZCH	8NE100A
LOR	NETZCH	2NE89A
	NETZCH	2NE89A
UPN	NETZCH	NE80A
	WORTHINGTON	4HO124

Fonte: Machado, 2006, p. 12.

As aquisições destes equipamentos foram realizadas por licitações de menor preço. Como estas licitações não são direcionadas a um determinado fabricante ou modelo de equipamento, não existe um padrão único para as bombas contidas na Tabela 2

A Tabela 3 contém as informações dos dados físicos da rede piloto como cotas inicial e final e comprimento dos dutos (dependentes da localização das estações de origem e destino de cada duto) e diâmetro de cada duto (definido no projeto do mesmo).

Tabela 3 - Dados físicos dos dutos da rede piloto

Estação	Cota inicial (m)	Cota final (m)	Comprimento (m)	Diâmetro interno (mm)
RFQ/LPX	89,00	54,50	14.000	154,00
LPX/LOR	54,50	79,50	17.000	261,88
LOR/UPN	79,50	83,50	28.000	261,88

Fonte: Machado, 2006, p. 12.

Os comprimentos dos dutos contidos na Tabela 3 correspondem à distância entre os locais selecionados para as estações em questão e o diâmetro corresponde ao dimensionado para as vazões previstas em projeto. É possível perceber que o duto RFQ/LPX possui diâmetro inferior aos demais, isso é justificado pelo fato de este duto, ao contrário dos demais, transferir a produção de apenas uma estação (no caso a produção de Riacho da Forquilha).

A Tabela 4, 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 (MACHADO, 2006).

Tabela 4 - Propriedades dos fluidos da rede piloto

Estação	BS&W (%)	Densidade	Viscosidade cinemática (cP)	
			40°C	60°C
RFQ	≤1,00	~0,841	~8,00	~4,00
LPX	≤6,00	~0,825	~6,00	~4,00
LOR	≤23,00	~0,834	~6,00	~4,00

Fonte: Machado, 2006, p. 12.

É possível observar através dos dados contidos na Tabela 4, que o teor de água e sedimentos de fundo (*Bottom Water and Sediments* - BS&W) aumenta da estação de Riacho da Forquilha para a estação de Lorena.

3.4. LIMITES OPERACIONAIS

Nesta seção serão apresentadas, de forma qualitativa, as justificativas para as limitações impostas à operação de redes de escoamento de petróleo e serão apresentadas, de forma quantitativa, as limitações da rede de escoamento piloto.

3.4.1. **Objetivos do aprimoramento**

Este trabalho objetiva uma lógica de acionamento de bombas de transferência minimizando os custos de energia e reduzindo o desgaste das bombas. Os principais custos com energia elétrica são os associados ao bombeamento dos poços para as estações coletoras e ao bombeamento das estações coletoras para a estação de tratamento.

Existem diversas lógicas de automação que podem ser aplicadas aos poços, porém para efeito deste trabalho será considerado o funcionamento contínuo uma vez que para a rede real, essa é a condição da maioria dos poços.

Neste trabalho será contemplada a automação das bombas de transferência das estações coletoras e das estações centrais, pois constituem as melhores oportunidades de redução de consumo por meio da diminuição ou interrupção do bombeamento em horários de pico de energia elétrica quando as tarifas são mais caras (MACHADO, 2006). 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, pois escalonamentos com um alto número de chaveamentos aceleram o desgaste dos conjuntos de motor e bomba e diminuem suas vidas úteis (MACHADO, 2006).

O processo de tratamento de óleo na Estação de Tratamento de Óleo (ETO) é influenciado pela variação das características do fluido recebido nesta estação, de maneira que se faz necessário minimizar a variação daquelas características até para que se aperfeiçoe o processo. Como o processo de separação entre água e óleo é em grande parte gravitacional, é necessário determinado tempo para que esta separação ocorra. Caso todas as bombas sejam desligadas no início do horário de ponta, ao final destes, o nível dos tanques nas estações coletoras estará elevado e um grande número de bombas precisará ser ligado. Isso tanto causa problemas nos dutos por ocasionar um aumento de pressão e velocidade quanto na ETO por diminuir o tempo de permanência do fluido na estação, comprometendo, dessa forma, o processo de separação entre óleo e água e conseqüentemente a especificação do produto.

No caso dos dutos é necessário garantir que não sejam ultrapassadas a pressão ou a velocidade máxima de operação e é interessante evitar vazões muito baixas já que

estas favorecem o depósito de sedimentos com a conseqüente obstrução do duto. 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 teor de água e sedimentos (BS&W) do fluido recebido na ETO.

O BS&W na saída da ETO, nos pontos de medição, é limitado a 1% conforme a portaria conjunta ANP/INMETRO N° 1 de 19 de junho de 2000.

Por um lado, se a porcentagem de água que chega nessa estação está abaixo dos limites estabelecidos, o volume de produtos químicos utilizados tornar-se-á sobredimensionado, causando desperdício 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 *apud* Machado (1999, 2006), 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, por exemplo, devido a um aumento expressivo da produção, os gastos envolvidos no redimensionamento das redes podem ser inviáveis devido à grande extensão de redes existentes e às perdas de produção associadas às paradas de produção necessárias à substituição. Dessa forma, a operação eficiente de um sistema pode, normalmente, postergar uma intervenção no sistema e seus inconvenientes.

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, de que forma as bombas devem operar de modo a atingir os objetivos definidos.

3.4.2. Estudo de caso

Assim como em Machado (2006), os níveis admissíveis para os tanques foram adotados em 15% da altura total para nível mínimo e 85% para o nível máximo. Adotou-se como pressões máximas de operação, respectivamente, 42 kgf/cm² (quilograma força por centímetro quadrado) para o duto RFQ/LPX e de 20 kgf/cm² para o duto LPX/LOR/UPN. A pressão mínima do sistema foi estimada em 5% da pressão máxima. Para as restrições de velocidade nos dutos, utilizou-se o valor extremo máximo da vazão de projeto, que correspondem, respectivamente a 90,0 m³/h para o duto RFQ/LPX e a 225,0 m³/h para o duto LPX/LOR/UPN. Estas informações se encontram compiladas na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados de projeto e de operação da rede piloto

Duto		RFQ/LPX	LPX/LOR/UPN
Projeto	Temperatura (°C)	40,00	30,00
	Pressão máxima (kgf/cm ²)	72,80	30,00
	Vazão (m ³ /h)	45,00 a 90,00	200,00 a 225,00
Operação	Pressão máxima (kgf/cm ²)	42,00	20,00
	Temperatura (°C)	15,00 a 45,00	18,0 a 45,00

Fonte: Machado, 2006, p. 12.

Tendo disponíveis os diâmetros de cada duto, foram avaliadas as respectivas velocidades máximas admissíveis. A velocidade mínima foi estimada em 5% da velocidade máxima.

Na Figura 12, está representada a rede piloto modelada no aplicativo *SmartPumping*, e na sequência, nas Tabelas 6, 7, 8, 9 e 10 estão descritos os dados físicos, de previsão de produção de fluido, as restrições operacionais utilizadas nessa modelagem (MACHADO,2006).

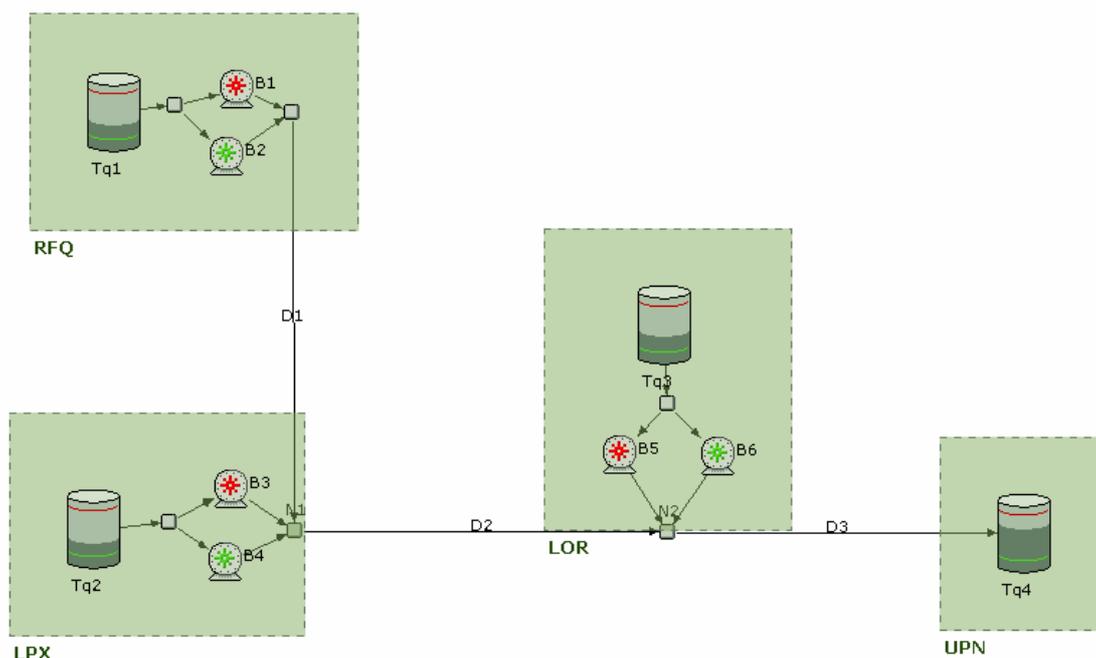


Figura 12 - Rede piloto modelada no aplicativo *SmartPumping*

Fonte: Machado, 2006, p.64.

A configuração utilizada nas estações da rede piloto, mostrada na Figura 12, possui bombas em paralelo. Esta configuração é aplicada quando a vazão exigida é muito grande ou quando a vazão do sistema varia de forma definida. Uma vantagem desse sistema é a continuidade operacional uma vez que no caso de falha ou manutenção de uma das bombas haverá apenas uma diminuição da vazão e não o colapso do sistema como ocorreria no caso de uma única bomba. Outra vantagem desta configuração é flexibilidade operacional associada à maior eficiência já que as bombas podem operar mais próximas de seu carregamento nominal enquanto se existisse uma única bomba esta seria forçada a trabalhar em regiões de baixa eficiência de forma a variar a vazão do sistema. Uma desvantagem dessa configuração é o aumento de possibilidade de cavitação já que para bombas associadas em paralelo, o NPSH disponível é menor, devido à maior vazão (MATTOS E. E.; FALCO R., 1998, p. 363).

Tabela 6 - Características físicas das bombas

Estação	Bomba	Cota (m)	Rendimento do motor (%)	Rendimento da bomba (%)	Curva característica Q - l/s, Hman (m)
RFQ	B1	89	90	90	Hman=-19,19Q+375,6
	B2	89	90	90	Hman=-19,19Q+375,6
LPX	B3	54,5	90	90	Hman=-19,19Q+375,6
	B4	54,5	90	90	Hman=-19,19Q+375,6
LOR	B5	79,5	90	90	Hman=-41,879Q+507,02
	B6	79,5	90	90	Hman=-41,879Q+507,02

Fonte: Machado, 2006, p. 64.

Tabela 7 - Características físicas dos oleodutos

Duto	Diâmetro interno (mm)	Comprimento (m)	Pressão admissível (mcf)		Velocidade admissível (m/s)		Cota de montante (m)	Cota de jusante (m)
			Máxima	Mínima	Máxima	Mínima		
D1	154,00	14.000	350,00	17,50	1,34	0,07	89,00	54,50
D2	261,88	17.000	167,00	8,35	1,16	0,06	54,50	79,50
D3	261,88	28.000	167,00	8,35	1,16	0,06	79,50	83,50

Fonte: Machado, 2006, p. 64.

Tabela 8 - Características físicas dos tanques

Estação	Tanque	Cota de fundo(m)	Altura (m)	Nível máximo (m)	Nível mínimo (m)	Área da base (m ²)
RFQ	T1	89,00	7,61	6,47	1,14	45,81
LPX	T2	54,50	8,20	6,97	1,23	39,27
LOR	T3	79,50	7,31	6,21	1,10	45,81
UPN	T4	83,50	9,11	7,75	1,37	95,03

Fonte: Machado, 2006, p. 64.

Tabela 9 - Previsão da produção da rede piloto

Estação	Coeficientes da equação de viscosidade		Vazão de entrada (m ³ /h)	Vazão de saída (m ³)	Massa específica (kg/m ³)	Temperatura (°C)
	<i>m</i>	<i>P</i>				
RFQ	-5,078	33,012	25,0	-	841,0	40,0
LPX	-3,107	20,372	40,0	-	825,8	40,0
LOR	-3,112	20,437	45,0	-	833,8	40,0
UPN	-	-	-	110,0	-	40,0

Fonte: Machado, 2006, p. 65.

Um recurso das instalações que não foi explorada nos trabalhos de Brasileiro (2005) e Machado (2006) é a estrutura de automação existente. Isto ocorre porque ambos os trabalhos prevêem a instalação de um sistema inteiramente novo onde a automação será centralizada. Como o presente trabalho pretende desenvolver lógicas que podem ser implementadas nos controladores existentes, os mesmos serão brevemente abordados na Seção 3.5.

3.5. CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS

Controladores Lógicos Programáveis (CLP) são aparelhos digitais que utilizam memória programável para armazenar instruções que implementam funções como: lógica, seqüenciamento, temporização, contagem e operações aritméticas, para controlar através de módulos de entrada e saída (digital e analógica) diversos tipos de máquinas (MAITELLI, 2003).

A programação desses dispositivos é comumente feita em diagramas de contatos ou diagramas LADDER. Esta linguagem gráfica é composta de símbolos que representam funções similares às de relés eletromecânicos em circuitos na composição de sentenças lógicas (MAITELLI, 2003).

O CLP utilizado na rede piloto é o SLC 500 da marca *Allen-Bradley*, da divisão *Rockwell Automation*. Esse dispositivo tem capacidade para endereçamento de até 4096 entradas e saídas digitais e 64 kB de memória para armazenagem de programa com suporte para funções de temporização, comparação, matemática, seqüenciamento, controle Proporcional Integral e Derivativo (PID) (MAITELLI, 2003).

Como o objetivo deste trabalho é de comparar lógicas de automação e não de avaliar o desempenho dos CLPs, a modelagem das lógicas será realizada no formato de lista de instruções (*Statement List*), compatível com o aplicativo a ser utilizado na modelagem do escoamento de fluidos. Desta forma este trabalho não abordará a transcrição das lógicas propostas para linguagem LADDER.

A seção 3.6 apresenta as lógicas de automação existentes e a lógica de automação proposta.

3.6. LÓGICAS DE AUTOMAÇÃO

Nesta seção será apresentada a lógicas de automação atualmente aplicada às bombas de transferência na indústria do petróleo, lógica proposta e os pontos de melhoria abstraídos das dificuldades de implementação destas propostas. Com base nestas informações será proposta uma nova lógica a ser aplicada nas instalações existentes.

3.6.1. Lógica convencional

Foi adotada como convencional a lógica de automação apresentada por Brasileiro (2005) como o comportamento de um operador da malha real. O operador deste sistema gerencia o bombeio da sua estação coletora sem levar em consideração o funcionamento das bombas das outras estações. O objetivo do operador é bombear toda a sua produção durante os horários de tarifas mais baixas, de forma que no início do período de ponta os tanques estejam no menor nível possível. A regra de operação, baseada na operação *ad-hoc* do sistema real, mantém todas as bombas ligadas até que o limite de nível mínimo do tanque seja atingido, quando as bombas são desligadas e só voltam a ser religadas quando o limite de nível máximo do tanque for atingido. Esta é a operação em todo o período, exceto ao se aproximar do horário de pico, quando os operadores ligam as bombas, para que os tanques estejam no seu menor nível no início do horário de ponta. O algoritmo está descrito na Figura 13 (BRASILEIRO, E. V., 2005).

```

intervaloAtual ← tempoInicialOtimizacao
tempoFinalOtimizacao ← intervaloAtual + horizonteOperacao
Para cada estação faça
    estaEsvaziando ← verdadeiro;
    cheioDentroHorarioPico ← falso;
    Enquanto intervaloAtual < tempoFinalOtimizacao faça
        Se tanque está seco
            Desligar bombas
            estaEsvaziando ← falso
            Se intervaloAtual dentro do horário de pico
                cheioDentroHorarioPico ← verdadeiro;
            fimSe
        fimSe
        Se tanque está cheio
            Ligar bombas
            estaEsvaziando ← verdadeiro
        fimSe
        Se (não está cheioDentroHorarioPico e
            intervaloAtual dentro do horário de pico)
            estaEsvaziando ← falso
            Deligar bombas
        Senão
            Se (intervaloAtual menor que tempoParaInicioHorarioPonta) e
            (tempoParaEsvaziarTanqueAntesHorarioPico maior que InicioHorarioPonta)
                estaEsvaziando ← verdadeiro
            fimSe
        fimSe
    fimEnquanto
    Armazenar escalonamento para o intervaloAtual
    AtualizarNiveisTanques

```

Figura 13 - Algoritmo de operação intuitivo da rede

Fonte: Brasileiro, 2005, P. 64

A lógica apresentada na Figura 13 prioriza a operação das bombas fora do horário de pico sem considerar a operação do restante do sistema. Este tipo de operação pode ocasionar a violação dos limites máximos e mínimos dos dutos além de ocasionar a operação das bombas em regiões de baixa eficiência devido ao aumento da pressão na descarga das bombas.

3.6.2. Lógica proposta

Foi realizado um trabalho de aprimoramento das lógicas de automação interno à PETROBRAS com o intuito de uniformizar a vazão de chegada na estação de tratamento¹⁰. Este trabalho elaborou um aplicativo utilizado para auxiliar os operadores. Com a uniformização das vazões se pretendeu atingir os seguintes objetivos:

- a. Facilitar o atendimento dos requisitos de tratamento do fluido que chega à estação de tratamento;
- b. Estabilizar as pressões nos dutos da malha terrestre de forma a evitar danos aos mesmos;
- c. Permitir que os sistemas de tratamento e transferência acomodem mais facilmente os aumentos previstos de vazão de fluidos.

Este aplicativo foi criado utilizando como base informações de níveis dos tanques, estados das bombas e vazão na saída das estações do sistema supervisorio (*Plant Information*). Nesse aplicativo, uma série de regras simples define qual das bombas será ligada ou desligada de forma a manter a vazão dos dutos constante sem ocasionar uma violação dos limites dos equipamentos. Com esta uniformização foi observado que, em média, um menor número de bombas permaneceu ligado. Esse fato é explicável, pois, com o acionamento simultâneo de diversas bombas, a pressão na rede tende a aumentar. Com uma maior contrapressão, a vazão unitária das bombas tende a diminuir e serão necessárias mais bombas para escoar a mesma quantidade de fluido.

Outro trabalho foi desenvolvido pela PETROBRAS com o objetivo de uniformizar a vazão de chegada às estações coletoras centrais de forma a simplificar o processo de separação de óleo e água. Este utilizou as informações de chaves de nível de forma a minimizar o número de chaveamentos nas bombas diminuindo a variação na vazão de saída das estações ao longo do tempo.

¹⁰ Entrevista realizada com o Eng. Vicente Delgado Moreira sobre resultados da aplicação do trabalho de Machado (2005) por ter integrado a banca examinadora da dissertação de mestrado e sobre o projeto “Operador Global”.

Os resultados desses trabalhos mostraram que os objetivos de uniformizar as vazões, minimizar o número de chaveamentos, minimizar a pressão de operação nos dutos e minimizar o consumo de energia (minimizando o número médio de bombas ligadas) não são concorrentes. Isso se deve ao fato que um menor número de chaveamentos ocasiona tanto a uniformização das vazões quanto a diminuição das pressões de operação dos dutos. As menores pressões de operação, por sua vez, levam à utilização de um menor número de bombas ligadas em média ao longo do tempo.

Da mesma forma que os trabalhos já implementados anteriormente nas instalações, o presente trabalho irá avaliar técnicas de automação aplicáveis às instalações existentes sem contemplar investimentos adicionais. Isto implica dizer que serão utilizadas lógicas de automação compatíveis com os CLPs utilizando como dados de entrada informações de nível de tanques, horário do dia e estado das bombas.

A utilização de técnicas simples de automação é coerente com a não utilização da abordagem de otimização multiobjetivo que possui a complexidade associada à avaliação simultânea do desempenho dos objetivos e a subjetividade associada à composição de uma função objetivo a partir de grandezas distintas (ALMEIDA, 2001). Uma abordagem simples possui, também, maior confiabilidade que a automação centralizada e menor probabilidade de gerar rejeição por parte dos operadores, conforme ocorrido com a lógica apresentada por Machado (2006).

Ainda com relação a este último trabalho, não será utilizada a técnica de algoritmos evolutivos devido à inviabilidade de automação em tempo real para malhas de escoamento de petróleo do porte das existentes no Oeste Potiguar (MACHADO, 2006). Não será utilizada também a lógica de agendamento de bombas (*scheduling*), pois esta implica em perda considerável da confiabilidade e baseia seus cálculos em uma previsão da produção que não necessariamente será verdadeira. A lógica desenvolvida neste trabalho será editada de forma a evitar a violação dos limites operacionais dos equipamentos e reduzir o custo médio de energia por unidade de fluido transferido (R\$/m³).

De forma a avaliar a eficácia das técnicas e validar a lógica proposta será utilizado o aplicativo EPANET, devido à capacidade do mesmo de simular o comportamento de um sistema de escoamento de fluidos controlado por lógicas simples. Esse aplicativo

também possui a capacidade de calcular os custos com energia elétrica para diferentes tarifas de energia elétrica ao longo do dia.

Com base nessas simulações será possível comparar os custos com energia por unidade de volume de fluido movimentado para cada uma das lógicas simuladas. Este aplicativo pode ser utilizado para modelar o comportamento de uma rede de escoamento de petróleo apesar de ter sido originalmente desenvolvido para sistemas de distribuição de água, pois possui como dados de entrada as características físicas do fluido transferido. Como referência para estas modelagens serão utilizadas as características apresentadas por Machado (2006).

No Capítulo 4 será detalhada a composição dos custos com energia elétrica na rede piloto, a importância do consumo de energia elétrica da indústria de petróleo do Oeste Potiguar com relação à microrregião e ao estado, além de expor a relevância do petróleo como parte da matriz energética do país.

4. A ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

No presente Capítulo é abordada a legislação que baseia o cálculo das tarifas de energia que serão utilizadas nas simulações de operação do sistema. Será abordada também a participação do consumo de energia da indústria de exploração de petróleo no Brasil, no Rio Grande do Norte e no Oeste Potiguar. Além disto, será ressaltada a relevância do petróleo como parte da matriz energética nacional.

4.1. ESTRUTURA DO SETOR ELÉTRICO

Entre as décadas de 70 e 90, era aplicada uma única tarifa de energia elétrica em todo o Brasil. Esse valor garantia a remuneração das concessionárias uma vez que as empresas não lucrativas eram mantidas por aquelas que geravam lucro e pelo Governo Federal. Essa modalidade não incentivava a eficiência uma vez que todo o custo era pago pelo consumidor¹¹ e acabou contribuindo para um cenário de inadimplência entre distribuidoras e geradoras, além da falta de capacidade econômico-financeira para realização de novos investimentos (ANEEL, 2008).

Neste contexto, surgiu a Lei nº 8.631/1993 que determinou que a tarifa passasse a ser fixada pela concessionária, de acordo com as peculiaridades de cada concessão. Em 1995

¹¹ Atualmente os consumidores de energia elétrica pagam um valor correspondente à quantidade de energia elétrica consumida, no mês anterior, estabelecida em kWh (quilowatt-hora) multiplicada por um valor unitário, denominado tarifa, medida em R\$/kWh (reais por quilowatt-hora), que corresponde ao preço de um quilowatt consumido em uma hora. As empresas de energia elétrica prestam este serviço por delegação da União na sua área de concessão, ou seja, na área em que lhe foi dada autorização para prestar o serviço público de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2005).

foi aprovada a Lei nº 8.987 com o objetivo de garantir o equilíbrio econômico-financeiro às concessões de energia elétrica. Com estas Leis, desde então, foi estabelecida uma tarifa por área de concessão para que as tarifas refletissem as peculiaridades de cada região, tais como número de consumidores, quilômetros de rede e tamanho do mercado (quantidade de energia atendida por uma determinada infra-estrutura), custo da energia comprada, tributos estaduais e outros (ANEEL, 2008).

A estrutura do setor elétrico tem a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) como responsável por estabelecer tarifas que assegurem ao consumidor o pagamento de uma tarifa justa, como também garantir o equilíbrio econômico-financeiro da concessionária de distribuição para que ela possa oferecer um serviço com a qualidade, confiabilidade e continuidade necessárias (ANEEL, 2012). Por meio das leis nº 10.847 e nº 10.848 de 2004, o Governo Federal implantou o "Novo Modelo do Setor Elétrico" mantendo o Poder Executivo como responsável pela formulação de políticas para o setor elétrico através do Ministério de Minas e Energia (MME) com assessoramento do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e do Congresso Nacional. Este modelo preservou a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) como responsáveis pela coordenação e supervisão da operação centralizada do sistema elétrico brasileiro (ANEEL, 2008).

Este novo modelo criou ainda novos atores, como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao MME, cuja função é realizar estudos para subsidiar o planejamento da expansão do sistema elétrico. Outro novo ator criado em 2004 foi a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) responsável pela negociação de energia no mercado livre (ANEEL, 2008).

Até 2004 as distribuidoras de energia elétrica podiam comprar livremente a energia a ser revendida, com limite de preço fixado pela ANEEL. A partir da Lei nº 10.848/2004, o valor da geração de energia comprada pelas distribuidoras passou a ser determinado em leilões públicos, no caso, realizados pela CCEE. Essa política foi implementada com o objetivo de garantir, além da transparência no custo da compra de energia, a competição e melhores preços (ANEEL, 2008).

O transporte da energia do ponto de geração até o consumidor final trata-se de um monopólio natural, pois a competição nesse segmento não traz benefícios econômicos. Por essa razão, a ANEEL atua para que as tarifas desse segmento sejam compostas pelos custos que efetivamente se relacionam com os serviços prestados. Adicionalmente

a esses custos, existem os encargos e os tributos, que não são criados pela ANEEL, mas por leis. Alguns deles incidem somente sobre o custo de distribuição, enquanto outros estão embutidos nos custos de geração e transmissão. Desta forma, o custo da energia elétrica para o consumidor final contempla a compra da energia (remuneração do gerador), a transmissão (custos da empresa transmissora, no caso do RN a Companhia Hidrelétrica do São Francisco - CHESF) e a distribuição (serviço prestado pela distribuidora, no caso do RN a Companhia Energética do Rio Grande do Norte (COSERN) (ANEEL, 2008).

As tarifas são definidas pela ANEEL por concessão e de acordo com a classificação de cada consumidor, conforme mostra a seção 4.2.

4.2. CLASSIFICAÇÃO DE CONSUMIDORES

Os consumidores são classificados em dois grupos de acordo com a tensão na qual são alimentados. Os consumidores alimentados em até 2.300 V são classificados no grupo B conforme a seguinte subdivisão:

- a. Subgrupo B1 - residencial;
- b. Subgrupo B2 - rural;
- c. Subgrupo B3 - demais classes;
- d. Subgrupo B4 - Iluminação Pública.

Os consumidores alimentados em tensões acima de 2.300 V são classificados no grupo A. Esse último grupo é subdividido de acordo com a tensão de atendimento de acordo com a classificação do inciso XXXIV do Artigo 2º do capítulo I (que trata das definições) da Resolução nº 414/2010 da ANEEL da seguinte forma:

- a. Subgrupo A1 - tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;
- b. Subgrupo A2 - tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV;
- c. Subgrupo A3 - tensão de fornecimento de 69 kV;
- d. Subgrupo A3a - tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV;
- e. Subgrupo A4 - tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV;

- f. Subgrupo AS - tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição.

As unidades consumidoras pertencentes à indústria de petróleo são em sua maior parte (maioria em potência) enquadradas no grupo A (com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 V) especificamente no subgrupo A3 (tensão de fornecimento de 69 kV).

Além de grupos e subgrupos, conforme a Resolução n° 414/2010 da ANEEL, no inciso I do Artigo 57° da seção III (que trata do enquadramento) do capítulo IV (que trata das modalidades tarifárias), os consumidores são enquadrados nas modalidades tarifárias convencional, horossazonal azul ou horossazonal verde, de acordo com os seguintes critérios:

- a. São enquadrados na modalidade tarifária horossazonal azul, os consumidores alimentados com tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV;
- b. Podem ser enquadrados na modalidade tarifária horossazonal azul ou verde, de acordo com a opção do consumidor, os consumidores alimentados com tensão de fornecimento inferior a 69 kV e demanda contratada igual ou superior a 300 kW; e
- c. Podem ser enquadrados na modalidade tarifária convencional, ou horossazonal azul ou verde, de acordo com a opção do consumidor, os consumidores alimentados com tensão de fornecimento inferior a 69 kV e demanda contratada inferior a 300 kW.

Conforme a classificação do subitem a do inciso XLVI do Artigo 2° do capítulo I (que trata das definições) da resolução n° 414/2010 da ANEEL, a modalidade convencional é caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica e demanda de potência, independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano.

Conforme a classificação do inciso XLVI do Artigo 2° do capítulo I (que trata das definições) da resolução n° 414/2010 da ANEEL, a modalidade azul é caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, assim como de tarifas diferenciadas de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia.

De acordo com a classificação inciso XLVI do Artigo 2º do capítulo I (que trata das definições) da resolução nº 414/2010 da ANEEL, a modalidade verde é caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, assim como de uma única tarifa de demanda de potência.

Para efeito do presente estudo, serão consideradas as cargas atendidas pelas subestações abaixadoras de 69 kV. Conforme a Resolução nº 414/2010 da ANEEL no inciso I do Artigo 57º da seção III (que trata do enquadramento) do capítulo IV (que trata das modalidades tarifárias), estas unidades consumidoras, por serem atendidas pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), devem ser enquadradas na modalidade tarifária horossazonal azul.

4.3. TARIFAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Conforme mencionado na seção 4.2, a ANEEL é responsável por definir as tarifas de energia elétrica no Brasil. A Resolução Homologatória Nº 1.413 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define as tarifas vigentes na Companhia Energética do Rio Grande do Norte (COSEERN) a partir do dia 22 de abril de 2013. Para efeito do presente trabalho, foram utilizadas as tarifas aplicáveis para os consumidores do subgrupo A3 do sistema tarifário horossazonal azul¹² (ANEEL, 2013). Os valores correspondentes às tarifas de demanda e consumo para os horários de ponta e fora de ponta nos períodos seco e úmido se encontram transcritos na Tabela 10.

¹² Segundo a ANEEL (2012), a tarifa horo-sazonal azul é a modalidade de fornecimento estruturada para a aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano, bem como de tarifas diferenciadas de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia. Ela é aplicável obrigatoriamente às unidades consumidoras atendidas pelo sistema elétrico interligado, e com tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV.

Tabela 10 - Tarifas de energia elétrica

Demanda (R\$/KW)		Consumo (R\$/MWh)			
		Ponta		Fora de Ponta	
Ponta	Fora de Ponta	Seca	Úmida	Seca	Úmida
18,44	5,69	210,81	188,93	124,65	111,96

Fonte: ANEEL, 2013.

A Tabela 10 mostra que a demanda contratada no horário de ponta corresponde a cerca de três vezes ao valor correspondente ao período fora de ponta. De forma similar, as tarifas aplicadas ao consumo para o período de ponta, tanto no período seco como no período úmido, são 60% superiores aos valores correspondentes ao horário fora de ponta. Essa diferença tarifária corresponde a um incentivo para que os consumidores submetidos a esse tipo de tarifação priorizem o consumo de energia elétrica no período fora de ponta. O objetivo desse incentivo é evitar que ocorram sobrecargas e desligamentos intempestivos (apagões) no sistema de transmissão de energia elétrica.

No caso específico do Oeste Potiguar a redução no consumo de energia da indústria de petróleo pode influenciar positivamente a transmissão de energia elétrica uma vez que aquela corresponde a uma parcela significativa desta, conforme será mostrado na seção 4.4.

4.4. PARTICIPAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO OESTE POTIGUAR

O consumo de energia elétrica da indústria terrestre de produção de petróleo é significativa com relação ao Oeste Potiguar. O objetivo desta seção é estimar a participação do consumo de energia elétrica no Oeste Potiguar com base na potência instalada de transformação nas subestações de 69/13.8 kV do regional Mossoró II (MSD) da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF).

A Tabela 11, apresenta a configuração da rede de distribuição da COSERN. A soma das potências nominais das subestações alimentadas pela subestação de 230 kV/69 kV da CHESF denominada “Mossoró II” (MSD) totaliza 278,3 MVA. As subestações da indústria do petróleo, as que possuem valores numéricos na coluna “Petróleo” da Tabela 11, totalizam 45 MVA. Com base nestes dados é possível afirmar que as

subestações de 69 kV/13.8 kV da indústria do petróleo representam cerca de 16 % da potência instalada de transformação do Oeste Potiguar (AZEVEDO, 2011).

Tabela 11 - Potências das unidades consumidoras alimentadas em 69 kV para o regional MSD da COSERN

Unidade Consumidora	Potência Instalada (MW)	
	Geral	Petróleo
MSA	17,5	-
GNR	6,3	-
GRS	6,3	-
SRV	12,5	-
BRO	26,6	-
BNF	5,0	5,0
MSU	25,0	-
CTA	25,0	25,0
MST	53,2	-
IPT	6,0	-
BRU	12,5	-
MZU	25,0	-
DSR	12,5	-
RFQ	15,0	15,0
APD	10,0	-
CRB	7,5	-
AAF	12,5	-
TOTAL	278,3	45,0

Fonte: Adaptado de Azevedo, 2011, p. 6.

Conforme os dados da Tabela 11, a indústria do petróleo possui 45 MVA em potência nominal das subestações enquanto o total de todas as subestações do oeste potiguar (incluindo a da própria COSERN) totaliza 278,3 MVA. Depois da própria concessionária de energia elétrica, a indústria de exploração de petróleo possui a maior parcela de potência nominal de subestações no oeste potiguar. Essa participação expressiva no consumo de energia denota um grande custo com a energia elétrica. Apesar deste custo expressivo, esta indústria se mantém devido à grande demanda comercial por seu produto que se justifica pela importância do mesmo na matriz energética nacional. Esta participação será detalhada na seção 4.5.

4.5. PARTICIPAÇÃO DO PETRÓLEO NA MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL

Apesar da participação expressiva do consumo de energia da indústria de exploração terrestre de petróleo no Oeste Potiguar (16% conforme seção 4.4), a grande maioria da exploração de petróleo se dá em alto mar. Nestas instalações a energia elétrica provém de geração própria a partir de geradores a gás. Esta energia não é referenciada nos estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e em nenhuma outra publicação oficial.

Esta seção será dedicada á avaliação da participação do petróleo como fonte primária de energia de forma a ressaltar a importância desta indústria e a expectativa de manutenção desta como uma das principais fontes de energia da matriz nacional.

Desta forma esta seção abordará a participação do petróleo como fonte primária de energia e não a participação do consumo de energia da indústria de petróleo a nível nacional.

Apesar do número cada vez maior de políticas de incentivo ao uso de fontes renováveis de energia, os derivados de petróleo correspondem e continuarão correspondendo a, médio e longo prazo, à maior parcela da matriz energética nacional (EPE, 2007, p.242). A Figura 14 mostra a estrutura de consumo de energia em 1970, em 2000 e a estimada para 2030, conforme o Plano Nacional de Energia 2030, editado em 2007 pela Empresa de Pesquisa Energética.

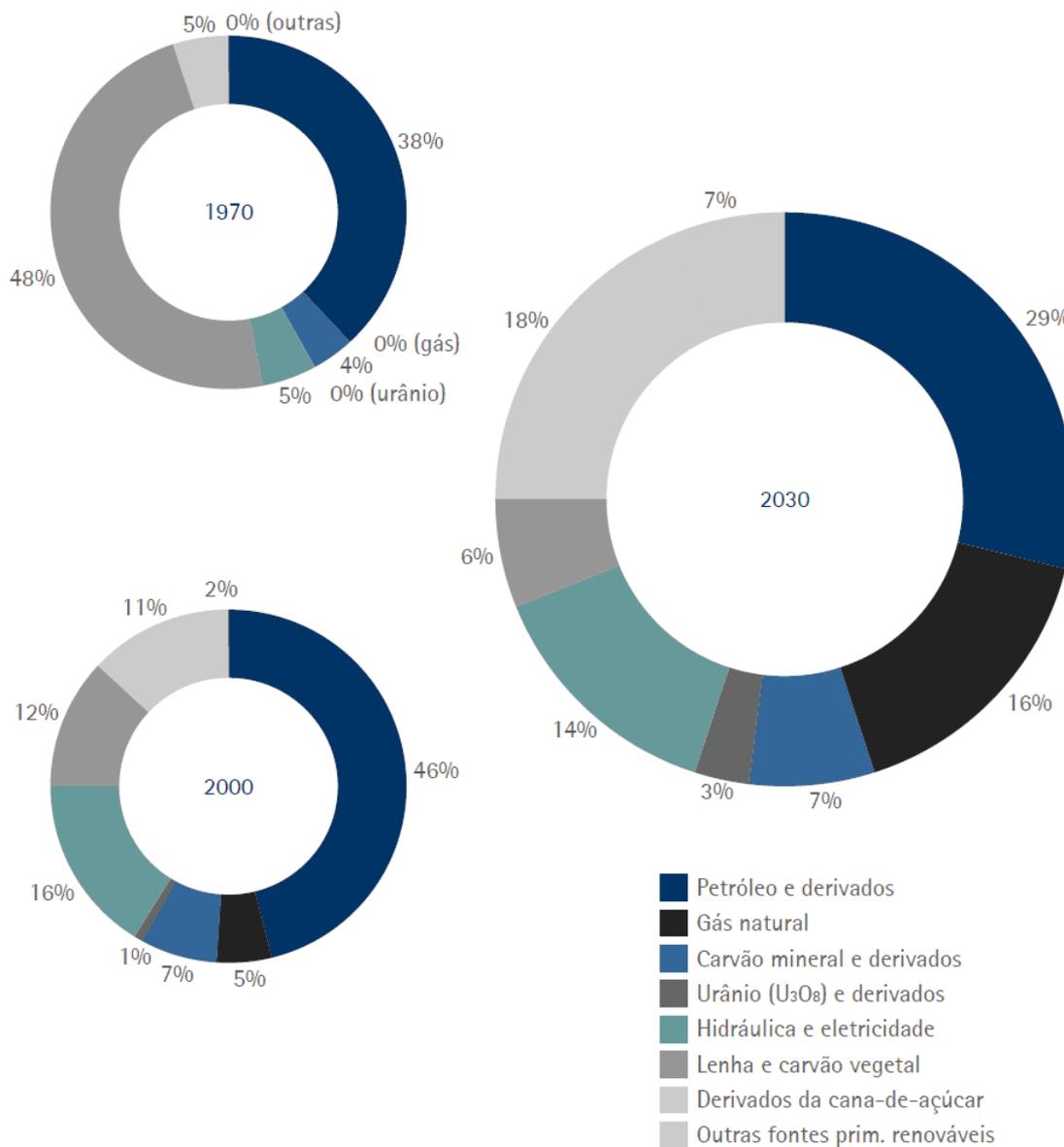


Figura 14 - Evolução da Estrutura da Oferta Interna de Energia

Fonte: EPE, 2007.

Conforme a Figura 14, desde a década de 1970 até a década de 2000, a oferta interna de gás natural, petróleo e derivados teve um acréscimo, passando de 38% a 51% correspondendo à maior parcela da oferta interna de energia no Brasil. Em 2030, essas fontes de energia ainda corresponderão a 45% da oferta interna de energia (apesar de editado em 2007 o Plano Nacional de Energia 2030 corresponde à projeção em longo prazo mais recente emitida pelo EPE). A partir desses números é possível observar que a indústria do petróleo corresponde e continuará correspondendo à maior parcela da oferta de energia no Brasil (THOMAS, 2004).

O consumo final de energia mostra a mesma tendência da oferta interna de energia até o ano de 2010 (dados mais recentes informados no Balanço Energético Nacional de 2012) (EPE, 2012). A Figura 15 mostra que os derivados de petróleo corresponderam historicamente, à maior parcela do consumo interno de energia no Brasil (EPE, 2012, p.24).

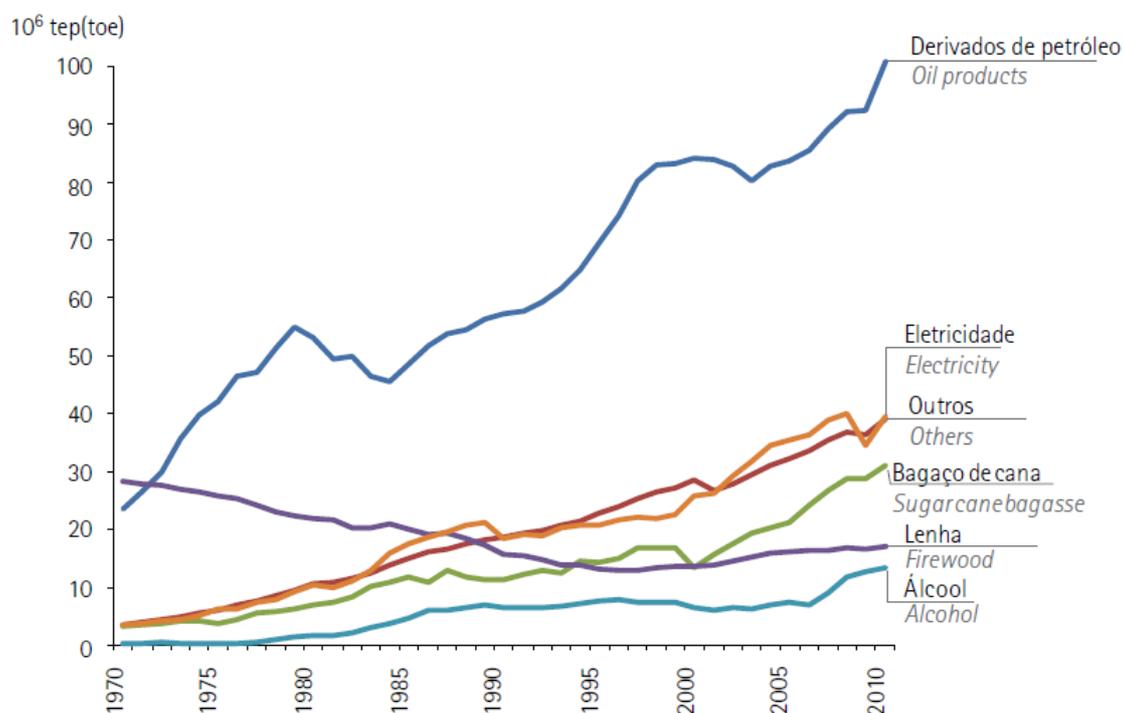


Figura 15 - Consumo final por fonte

Fonte: EPE, 2012. p.24.

Uma das justificativas para o fato de os derivados de petróleo corresponderem historicamente, à maior parcela do consumo interno de energia no Brasil é o fato da estrutura de transportes ser baseada no meio rodoviário. Essa informação pode ser abstraída da Figura 16.

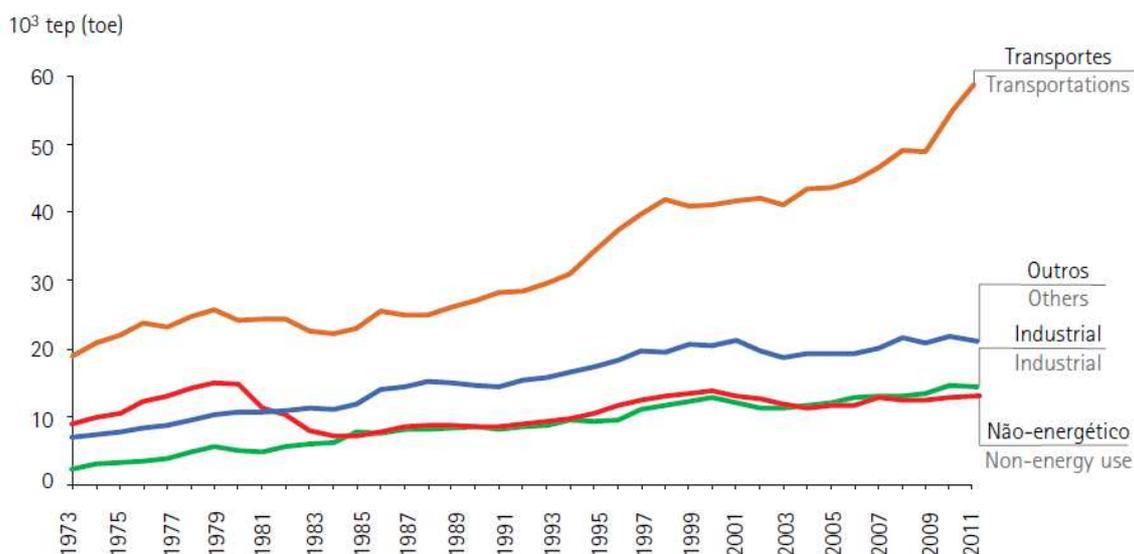


Figura 16 - Consumo total de derivados de petróleo e de gás natural

Fonte: EPE, 2012, p.53.

O fato da maior parcela do consumo de derivados de petróleo se dar no transporte rodoviário advém do fato da estrutura de transportes do Brasil ser baseada no meio rodoviário.

No Capítulo seguinte, ou seja, no Capítulo 5, será modelada a rede de escoamento piloto apresentada no Capítulo 3 com os custos de energia apresentados no Capítulo 4 de forma a modelar lógicas de automação baseadas nos trabalhos contemplados no Capítulo 2. Estas simulações serão realizadas utilizando o aplicativo EPANET, brevemente tratado no Capítulo 2.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Capítulo será apresentada a ferramenta utilizada na modelagem da rede piloto, assim como a comparação dos desempenhos das lógicas de automação avaliadas.

5.1. EPANET

O EPANET foi idealizado pelo *National Risk Management Research Laboratory*, um dos laboratórios da *U.S. Environmental Protection Agency (EPA)*, com o intuito de: desenvolver e implementar tecnologias ambientais inovadoras e economicamente viáveis; desenvolver informações científicas e de engenharia; fornecer suporte técnico e propiciar a transferência de informação que assegure a implementação eficaz de decisões e regulamentações ambientais (PROCEL, 2012).

A EPA é a agência estatal norte-americana encarregada pelo Congresso dos Estados Unidos da América de proteger os seus recursos naturais (terra, ar e recursos hídricos). De acordo com a legislação norte-americana em matéria ambiental, cabe a esta instituição conceber e implementar ações que conduzam a um balanço entre as atividades humanas e a capacidade dos sistemas naturais para suportar e garantir níveis ambientais aceitáveis. Para cumprir este objetivo, o programa de pesquisa da EPA fornece informação de base e suporte técnico para a resolução de problemas ambientais reais, que permitam construir uma base de conhecimento científico necessária a uma adequada gestão dos recursos ecológicos, e que também permitam ajudar a compreender o modo como os poluentes podem afetar a saúde pública, e prevenir ou minimizar futuros riscos ambientais (LEHNS, 2009).

O *National Risk Management Research Laboratory*, um dos laboratórios da EPA, constitui a unidade principal para a pesquisa de técnicas e metodologias de gestão que permita reduzir os riscos para a saúde humana e o ambiente. Os seus principais objetivos são desenvolver metodologias de prevenção e controle da poluição do ar, terras e recursos superficiais; proteger a qualidade da água em sistemas públicos de abastecimento; melhorar as condições ambientais de locais contaminados e de aquíferos subterrâneos; e prevenir e controlar a poluição do ar em recintos fechados. As principais funções desta unidade de pesquisa são desenvolver e implementar tecnologias ambientais inovadoras e economicamente viáveis; desenvolver informação científica e de engenharia, necessárias à EPA para apoio à decisão no âmbito de regulamentos e de políticas; e, ainda, fornecer suporte técnico e proporcionar a transferência de informação que assegure a implementação eficaz de decisões e regulamentações ambientais (LEHNS, 2009).

O EPANET é um programa de computador que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição pressurizada. Uma rede é constituída por tubulações, bombas, válvulas, reservatórios de nível fixo e/ou reservatórios de nível variável, e o EPANET permite obter os valores da vazão em cada tubulação, da pressão em cada nó, da altura de água em cada reservatório de nível variável, e da concentração de espécies químicas através da rede durante o período de simulação, subdividido em múltiplos intervalos de cálculo. Adicionalmente, além de espécies químicas, o modelo simula o cálculo da idade da água e o rastreio da origem de água em qualquer ponto da rede (LEHNS, 2012).

O EPANET é o programa de modelagem hidráulica e de qualidade de água mais empregado no mundo; possuindo diversas traduções, e se torna ainda mais atrativo devido ao fato de ser um programa disponibilizado gratuitamente (LEHNS, 2009).

Uma vez que o EPA disponibiliza o EPANET livremente com seu código fonte, este pôde ser adaptado para outras versões no mundo. A versão do programa EPANET para o português foi uma iniciativa do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS), pertencente ao Departamento de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), sendo que a sua edição foi possível por intermédio de um convênio de cooperação técnico-financeira de 2006 com a empresa Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRAS) no âmbito do programa PROCEL SANEAR que está investindo R\$ 150 mil na elaboração deste produto

(PROCEL, 2012). Para as simulações do presente trabalho foi utilizada a versão 2.0 do aplicativo conforme Figura 17 que representa a tela inicial do mesmo.



Figura 17 - Versão do aplicativo EPANET traduzida pelo LENHS UFPB utilizada nas simulações

Fonte: LENHS, 2012

Dentre as diversas capacidades do EPANET, as que se mostram mais promissoras para o objetivo deste trabalho são:

- a. Simular o comportamento hidráulico de um sistema pressurizado de bombeio de fluido ao longo do tempo;
- b. Avaliar possíveis ações que possam diminuir o consumo de energia elétrica, como, por exemplo, simulações dinâmicas da operação das instalações de bombeamento para verificar a possibilidades das bombas operarem em horário fora de ponta, visando à minimização do custo de energia elétrica dos sistemas de abastecimento de água;
- c. Obter valores de vazão em cada trecho, da pressão em cada nó, da altura de água em cada reservatório de nível variável e da concentração de elementos químicos na água através da rede de distribuição, durante o período de simulação.

Apesar de originalmente desenvolvido para aplicação em sistemas de distribuição de água, o EPANET possui o potencial de simular o escoamento de petróleo, pois nele é possível ajustar as propriedades do fluido bombeado. Apesar de largamente utilizado, não foi encontrado nenhum trabalho que utilize o EPANET para a modelagem do escoamento de petróleo na indústria de exploração e produção terrestre. Desta forma, esta aplicação pioneira é uma das contribuições desta dissertação.

Em ambiente Windows[®], o EPANET fornece uma interface integrada para editar dados de entrada da rede; executar simulações hidráulicas e de qualidade da água; e visualizar os resultados em vários formatos. Estes últimos incluem a possibilidade de visualizar mapas da rede com códigos de cores, tabelas de dados, gráficos de séries temporais e gráficos de isolinhas (PROCEL, 2012).

A rede piloto foi modelada no EPANET através da interface gráfica do mesmo e o mapa da rede obtido se encontra ilustrado na Figura 18.

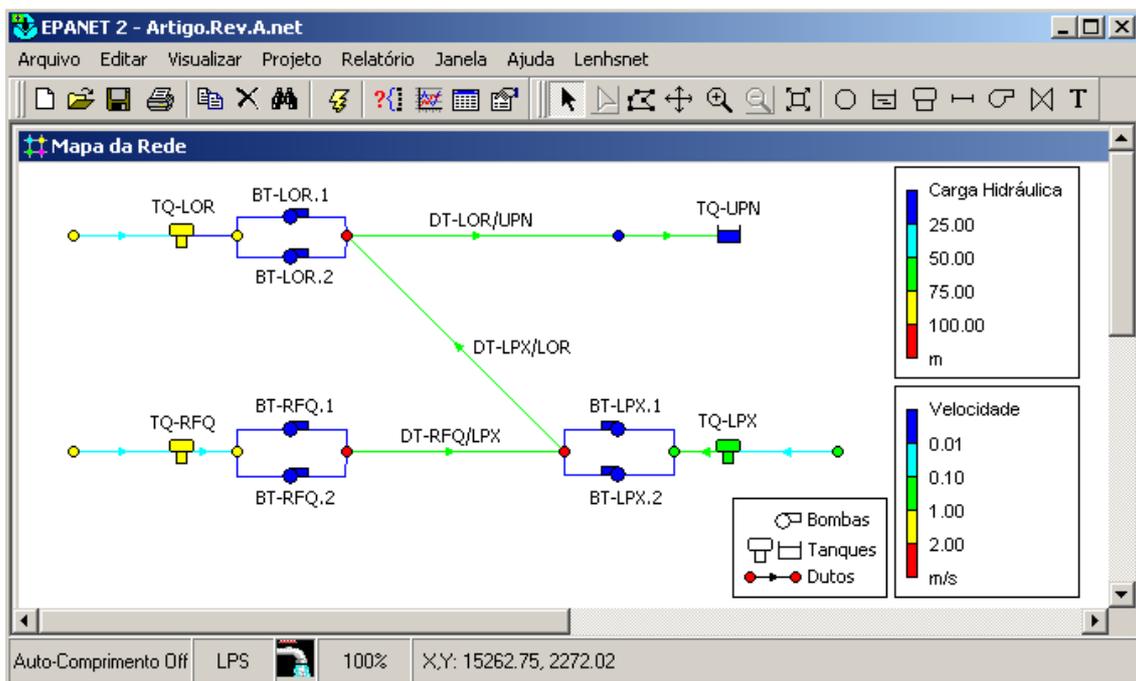


Figura 18 - Rede piloto modelada utilizando o aplicativo EPANET

Fonte: Elaboração própria

5.2. COMPARAÇÃO ENTRE LÓGICAS DE AUTOMAÇÃO

Nesta seção serão apresentadas e comparadas três diferentes lógicas de automação com a utilização do aplicativo EPANET, com o intuito de ilustrar os conceitos que serão aplicados.

5.2.1. Escopo da avaliação

De forma a ilustrar o aumento de pressão e custo associado ao acionamento simultâneo de bombas, será modelado o comportamento da pressão e do custo de escoamento por unidade de volume de fluido transferido para a estação de Riacho da Forquilha (RFQ). Esta estação está localizada a uma cota de 89 m acima do nível do mar e possui um tanque de produção com 7,6 m de altura e 7,7 m de diâmetro. A produção desta estação é transferida para a estação de Leste de Poço Xavier (situada à cota de 54,4 m acima do nível do mar) por duas bombas de fabricação NETZCH de modelo 8NE100A acionadas por motores de fabricação WEG de 110 kW através de um duto de aço carbono de 14 km de comprimento. O campo desta estação possui uma produção média estimada de 25 m³/dia.

Para avaliação dos custos com energia elétrica, serão utilizadas nas simulações as tarifas válidas na COSERN conforme a Resolução Homologatória N° 1.413 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para o sub-grupo A3 (69 kV) (ANEEL, 2013). O EPANET possui a capacidade de modelar as tarifas de energia conforme exibido na Figura 19.



Propriedade	Valor
Rendimento de Bombeamento (%)	81
Preço do kWh	0.21081
Padrão de Preço	Energia
Carga de Demanda	0

Figura 19 - Campos de opções de modelagem de energia no aplicativo EPANET

Fonte: Elaboração própria

O campo “Padrão de Preço”, mostrado na Figura 20, permite a associação de um padrão temporal para modelar a variação do custo de energia ao longo do dia. Para esta modelagem o dia foi dividido em 48 intervalos de 30 min e a cada um foi associado um fator multiplicativo a ser aplicado à tarifa de energia, vide Figura 20.

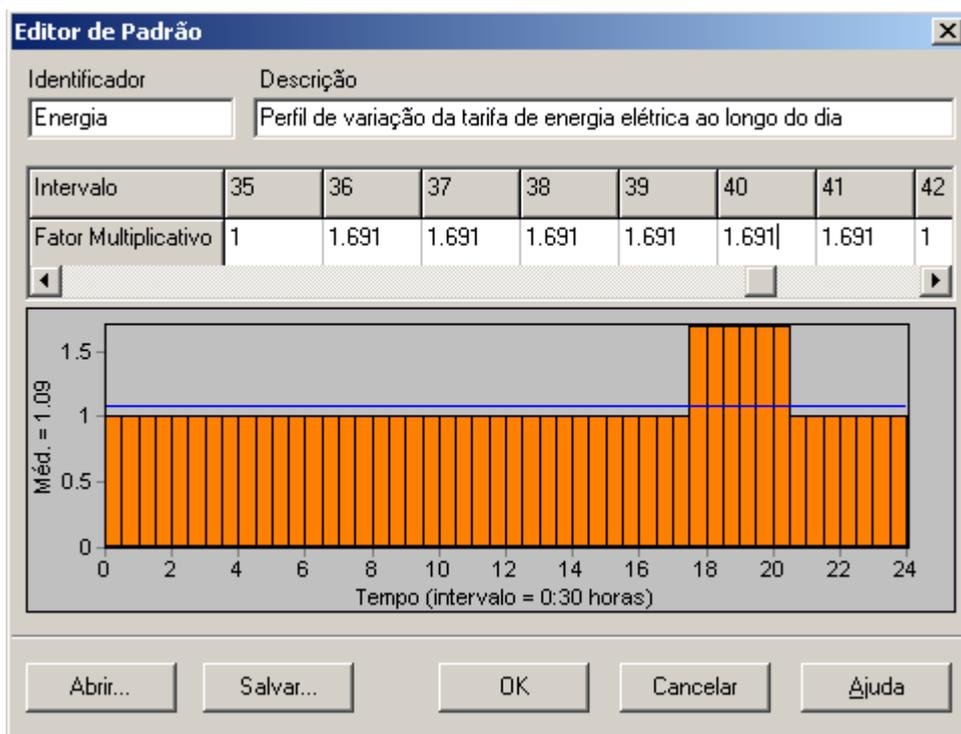


Figura 20 - Padrão temporal da variação do custo de energia ao longo do dia

Fonte: Elaboração própria

Este recurso, mostrado na Figura 20, permite modelar o aumento do custo da energia durante o horário de ponta onde, intuitivamente o consumo deve ser evitado quando se objetiva reduzir os custos com energia elétrica.

Todas as três lógicas de automação modeladas, que serão mostradas em detalhes nas Seções 5.2.3, 5.2.4 e 5.2.5, obedecem os limites máximo e mínimo utilizados por Machado (2006). Isto significa que em todas as lógicas ambas as bombas são acionadas quando o nível do tanque atinge 85% (de forma a evitar transbordamento) e ambas as bombas são desligadas quando nível do tanque atinge 15% (de forma a evitar cavitação). A definição da função objetivo para o aprimoramento das lógicas de automação e a

análise do comportamento do sistema em estudo com base nas funções que regem o seu funcionamento, seguem registradas na Seção 5.2.2.

5.2.2. Definição da função objetivo

A função objetivo proposta neste trabalho utilizada para a avaliação das lógicas de automação para fins de aprimoramento é a razão custo vazão, que consiste na relação entre o custo acumulado ao longo de um determinado período de tempo e o volume total escoado durante o mesmo período de tempo, conforme a Equação 1.

$$R_{CV} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} T_E(t) \cdot P(t) dt}{\int_{t_0}^{t_1} Q_E(t) dt} = \frac{C_E \Big|_{t_0}^{t_1}}{V \Big|_{t_0}^{t_1}} \left(\frac{R\$}{m^3} \right) \quad (1)$$

Onde:

R_{CV} = Relação entre custo de energia e vazão para um determinado período de tempo;

$T_E(t)$ = Tarifa de energia elétrica em função do tempo;

$P(t)$ = Potência elétrica consumida pelos motores que acionam as bombas em função do tempo;

$Q_E(t)$ = Vazão escoada em função do tempo;

C_E = Custo com energia elétrica para um determinado período de tempo;

V = Volume total de fluido transferido para um determinado período de tempo.

A tarifa de energia é definida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para cada concessionária em função do subgrupo em que o consumidor é enquadrado e da modalidade tarifária aplicada ao mesmo. Conforme exposto na seção 4.3, para efeito deste trabalho, serão consideradas as tarifas aplicadas aos consumidores enquadrados no subgrupo A3 da modalidade tarifária horossazonal azul na Companhia Energética do Rio Grande do Norte (COSERN). Estes valores para o período seco correspondem a R\$ 210,81 no horário de ponta (para a Companhia Energética do Rio Grande do Norte o período de 17 h 30 min a 20 h 30 min do mesmo dia) e R\$ 124,65 no horário fora de

ponta (para a Companhia Energética do Rio Grande do Norte o período de 20 h 30 min a 17 h 30 min do dia subsequente).

A tarifa de energia não pode ser facilmente alterada de acordo com a vontade do consumidor, porém o produto $T_E(t) \cdot P(t)$ pode ser reduzido de acordo com a forma de operação das bombas se o consumo de energia for priorizado no horário fora de ponta, quando a energia é mais barata. A redução deste produto é buscada com uma lógica de automação proposta a seguir.

A relação $P(t)/Q_E(t)$ também pode ser reduzida conforme a operação das bombas uma vez que o rendimento das bombas varia de acordo com o ponto de operação da mesma. Este comportamento é levantado de forma experimental pelo fornecedor do conjunto motor-bomba e não pode ser facilmente equacionado. A eficiência do bombeio também pode ser alterada com a variação da rotação dos motores e, conseqüentemente, das bombas, porém apesar do método de variação de frequência ser aplicável, este não será avaliado neste trabalho uma vez que o objetivo do mesmo é avaliar o comportamento dos custos com energia elétrica para a alteração das lógicas de automação em uma instalação da indústria de produção de petróleo do Oeste Potiguar, conforme avaliado por Machado (2006). Nestas instalações, os motores não possuem recursos para variação de rotação.

A vazão total da estação é uma função da lógica de automação utilizada, do nível do tanque, e das curvas características da bomba e dos dutos.

$$Q_E = f \left[LA, h_{TQ-RFQ.1}, Q_B(H)_{BT-RFQ.1/2}, H(Q_E)_{DT-RFQ/LPX} \right] \quad (2)$$

Onde:

Q_E = Vazão total da estação ao longo do tempo

LA - Lógica de automação utilizada

$h_{TQ-RFQ.1}$ = Nível do tanque da estação de Riacho da Forquilha (TQ-RFQ.1)

$Q_B(H)_{BT-RFQ.1/2}$ = Curva de vazão em função da carga hidráulica para cada uma das bombas da estação de Riacho da Forquilha (BT-RFQ.1 e BT-RFQ.2).

$H(Q)_{DT-RFQ/LPX}$ = Perda de carga do duto entre as estações de Riacho da Forquilha e a estação de Leste de Poço Xavier DT-RFQ/LPX em função da vazão escoada.

As lógicas de automação (LA) determinam a forma de operação das bombas de acordo com a hora do dia (t) e do nível do tanque da estação de Riacho da Forquilha - RFQ ($h_{TQ-RFQ.1}$).

O nível do tanque da estação de Riacho da Forquilha (RFQ) ($h_{TQ-RFQ.1}$), além de ser uma das variáveis que, de acordo com a lógica de automação aplicada, definem a operação das bombas, determina a carga hidráulica na sucção das bombas da estação em estudo. A vazão nas bombas depende da diferença de carga hidráulica entre a sucção e a descarga das bombas. Quanto menor esta diferença, maior será a vazão. De forma similar, para uma mesma pressão na descarga das bombas, quanto maior o nível dos tanques, maior será a pressão na sucção das bombas e maior será a vazão obtida.

Desta forma, quanto maior o nível no tanque, maior será a eficiência energética do bombeio, porém, esta variação não é apreciável uma vez que a variação da pressão de sucção é muito menor que a variação da pressão na descarga. Além disto, a operação com níveis deliberadamente mais altos nos tanques implica em que, no caso de um sinistro, o operador terá menos tempo para responder à contingência aumentando, desta forma, o risco de derramamento. Como os riscos de derramamento representam uma ameaça ao meio ambiente e à imagem da indústria de produção de petróleo, o presente trabalho não irá avaliar os efeitos do aumento do nível de operação dos tanques.

As curvas de vazão em função da carga hidráulica à rotação nominal ($Q_B(H)_{BT-RFQ.1/2}$) são levantadas experimentalmente para cada bombeador e são fornecidas junto com o equipamento. Estas curvas são válidas para um fluido específico (normalmente água), para uma rotação específica (tipicamente a rotação nominal do motor elétrico fornecido junto com a bomba) e para o estado do bombeador no momento do teste. Isso quer dizer que o comportamento da bomba muda de acordo com o fluido bombeado, a rotação utilizada e a idade do bombeador. Devido a esta complexidade, este comportamento não pode ser facilmente equacionado.

Via de regra, a perda de carga em um duto ($H(Q)_{DT-RFQ/LPX}$), para um mesmo fluido e um mesmo duto, pode ser aproximada como proporcional ao quadrado da vazão ou da velocidade do fluido (LIMA, 2003, p. 23). Desta forma, quando menor a vazão, menor será a perda de carga, menor será a energia “perdida” com escoamento turbulento e maior será a eficiência energética do bombeio. Desta forma, na busca de uma maior

eficiência energética devem ser buscadas as menores vazões e velocidades de fluido ao longo dos dutos.

As considerações oriundas da compreensão da forma de operação do sistema em estudo resultaram na proposta de lógica de automação 3. Para fins comparativos serão apresentadas três lógicas de automação. A primeira constitui a lógica intuitiva de operação anteriormente aplicada às instalações em estudo. A segunda lógica de automação é a lógica atualmente aplicada às instalações em estudo e constitui um aprimoramento da primeira. A terceira lógica de automação é uma proposta de aprimoramento da segunda e consiste na contribuição do presente trabalho.

5.2.3. Lógica de automação 1

A primeira das lógicas de automação a ser modelada, doravante denominada lógica 1, consiste no acionamento simultâneo de ambas as bombas ao atingir o nível máximo de operação do tanque, que para a estação de Riacho da Forquilha é de 6,47 m (85 % da altura total do tanque). Esta margem de segurança com relação à capacidade total do tanque é mantida de forma a reduzir a probabilidade de um derramamento uma vez que, caso ocorra um problema com as bombas de transferência, é necessário que o operador tenha tempo para redirecionar a produção ou mesmo desligar poços. Caso o nível máximo utilizado seja de 85%, como em Machado (2006), o operador terá o tempo correspondente a 15% da capacidade do tanque.

No caso da estação de RFQ, esta margem de segurança corresponde a cerca de 50 m³, o que, considerando a produção estimada de 25 m³, significa que, no caso de um problema com as bombas de transferência, o operador terá no mínimo 2 h para evitar um derramamento. Conforme esta lógica a desativação das bombas também ocorre ao mesmo tempo no momento em que o nível do tanque atinge o nível mínimo, considerado 15% da capacidade total do tanque. Esta margem com relação ao nível mínimo dos tanques é necessária de forma a evitar que a pressão na admissão das bombas seja baixa a ponto de provocar a vaporização do fluido no fenômeno conhecido como cavitação.

Esta lógica de automação pode ser modelada no EPANET com controles simples em formato de texto. A interface do aplicativo para a edição da lógica de automação 1 se encontra representada na Figura 21.

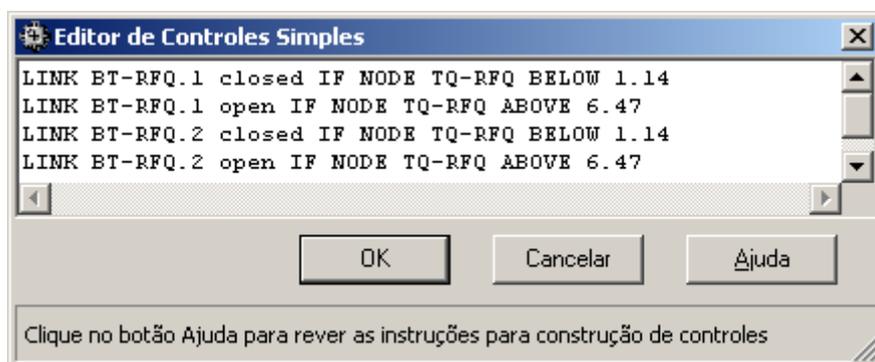


Figura 21 - Interface EPANET para edição da lógica de automação 1

Fonte: Elaboração própria

Conforme pode ser visto na Figura 21, na lógica de automação 1, cada uma das duas bombas possui uma linha de código para estabelecer o acionamento ou a desativação desta. A lógica de automação 2 consiste em um aprimoramento da lógica 1 e é apresentada na seção 5.2.4.

5.2.4. Lógica de automação 2

A lógica 2 é baseada em um trabalho desenvolvido internamente à indústria de produção de petróleo do Oeste Potiguar. Outro trabalho¹³ foi desenvolvido com o objetivo de uniformizar a vazão de chegada às estações coletoras centrais de forma a simplificar o processo de separação de óleo e água e aumentar a produção escoada em um mesmo duto minimizando a probabilidade de derramamento devido ao rompimento do duto, ocasionado pela operação acima de sua pressão máxima de operação. Essa

¹³ Entrevista realizada com o Eng. Vicente Delgado Moreira sobre resultados da aplicação do trabalho de Machado (2005) por ter integrado a banca examinadora da dissertação de mestrado e sobre o projeto “Operador Global”.

lógica de automação utilizou as informações de chaves de nível de forma a minimizar o número de chaveamentos nas bombas diminuindo a variação na vazão de saída das estações ao longo do tempo.

Outro objetivo deste aprimoramento é facilitar o atendimento dos requisitos de tratamento do fluido que chega à estação de tratamento e permitir que os sistemas de tratamento e transferência acomodassem mais facilmente os aumentos previstos de vazão de fluidos.

Esta lógica de automação utiliza como base as informações de nível dos tanques e dos estados das bombas para, utilizando uma série de regras simples, definir qual das bombas será ligada ou desligada de forma a minimizar a variação da vazão dos dutos. Com esta uniformização foi observado que, em média, um menor número de bombas permaneceu ligado. Esse fato é explicável, pois, com o acionamento simultâneo de diversas bombas, a pressão na rede tende a aumentar. Com uma maior contrapressão, a vazão unitária das bombas tende a diminuir e serão necessárias mais bombas para escoar a mesma quantidade de fluido.

A lógica de automação 2 utiliza limites diferenciados para cada uma das bombas, de forma a evitar o acionamento simultâneo de duas bombas em paralelo com o objetivo de aumentar o rendimento energético. Esta é a lógica atualmente aplicada às estações coletoras da Unidade de Operações do Rio Grande do Norte e Ceará da PETROBRAS (UO-RNCE). Esta unidade é a divisão da PETROBRAS responsável por explorar e produzir petróleo nas concessões da PETROBRAS nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará.

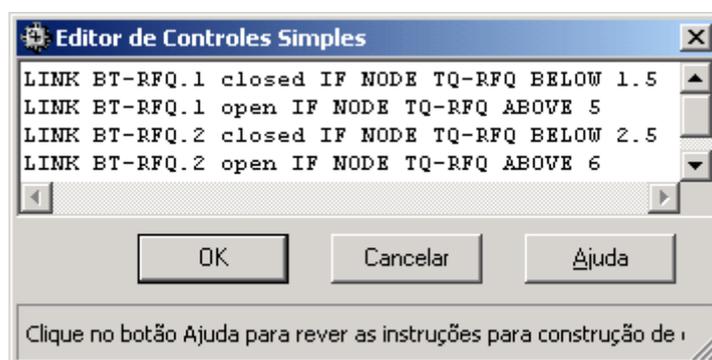


Figura 22 - Interface EPANET para edição da lógica de automação 2

Fonte: Elaboração própria

Conforme exibido na Figura 22, foram adotados para a lógica de automação 2 limites de nível mais conservativos que os da lógica de automação 1, tanto para o acionamento, no caso, o nível máximo para acionamento de ambas as bombas na lógica 2 é menor que o limite máximo para acionamento de ambas as bombas na lógica de automação 1.

No caso específico da estação de Riacho da Forquilha (RFQ), a bomba de transferência 1 (BT-RFQ.1) é acionada quando o nível de fluido no tanque da estação (TQ-RFQ) atinge 5 m e desativada quando esse mesmo nível atinge 1,5 m. A bomba de transferência 2 (BT-RFQ.2), por sua vez, é acionada quando o nível de fluido no tanque da estação (TQ-RFQ) atinge 6,0 m e desativada quando esse mesmo nível atinge 2,5 m.

Esta lógica de automação implica que, para uma vazão de entrada de fluidos constante e menor que a vazão de uma das bombas, apenas um das bombas será utilizada. Isto significa que, é priorizado o acionamento de apenas uma das bombas por vez, o que nunca ocorre no caso da utilização da lógica de automação 1.

Este modo de operação é energeticamente mais eficiente que o da lógica de automação 1, uma vez que a operação de duas bombas em paralelo implica em um aumento da contrapressão do sistema, o que altera o ponto de operação das bombas para uma região onde o rendimento é menor que o alcançado com a operação de apenas uma das bombas por vez.

Esta lógica de automação, conforme explicado, tende a gerar um menor consumo de energia elétrica do que a lógica de automação 1, e uma oportunidade de melhoria com relação a esta lógica, no que se refere à redução do desembolso com energia elétrica, é, além de reduzir o consumo de energia elétrica, priorizar o consumo no período em que o custo da energia elétrica é mais baixo. A lógica de automação 3 é uma proposta para este aprimoramento e segue descrita na seção 5.2.5.

5.2.5. Lógica de automação 3

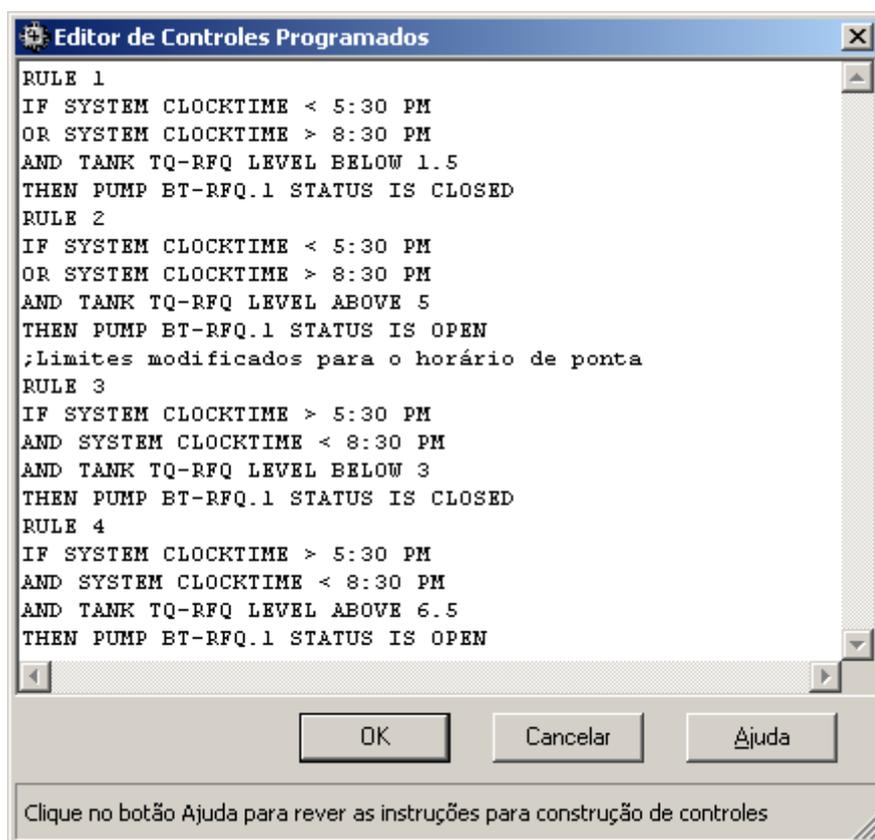
A lógica de automação 3 consiste na proposta deste trabalho e no sentido de aprimorar a lógica de automação 2 (lógica similar às aplicadas nas instalações da indústria de produção terrestre de petróleo no Oeste Potiguar) no que diz respeito a

priorizar o acionamento das bombas de transferência, e do consumo de energia elétrica, durante o horário fora de ponta, quando a energia é mais barata.

Para atingir este objetivo, esta lógica de automação aplica limites de acionamento e desativação diferentes para cada uma das bombas e também limites de acionamento e desativação para uma mesma bomba dependendo da hora do dia. Mais especificamente os limites para cada uma das bombas são aumentados durante o horário de ponta (entre as 17 h 30 min e as 20 h 30 min no caso da Companhia Energética do Rio Grande do Norte) de forma a priorizar o consumo de energia elétrica enquanto esta é mais barata.

O aprimoramento da “lógica de automação 3” com relação à “lógica de automação 2”, que possui limites de nível mais “tolerantes” durante o horário de ponta de forma a postergar o acionamento das bombas e o consumo de energia para o horário fora de ponta, quando a energia é mais barata.

Esta lógica de automação foi simulada utilizando o aplicativo EPANET, e a parte do código referente a uma das bombas segue transcrita no código contido na Figura 23.



```
Editor de Controles Programados
RULE 1
IF SYSTEM CLOCKTIME < 5:30 PM
OR SYSTEM CLOCKTIME > 8:30 PM
AND TANK TQ-RFQ LEVEL BELOW 1.5
THEN PUMP BT-RFQ.1 STATUS IS CLOSED
RULE 2
IF SYSTEM CLOCKTIME < 5:30 PM
OR SYSTEM CLOCKTIME > 8:30 PM
AND TANK TQ-RFQ LEVEL ABOVE 5
THEN PUMP BT-RFQ.1 STATUS IS OPEN
;Limites modificados para o horário de ponta
RULE 3
IF SYSTEM CLOCKTIME > 5:30 PM
AND SYSTEM CLOCKTIME < 8:30 PM
AND TANK TQ-RFQ LEVEL BELOW 3
THEN PUMP BT-RFQ.1 STATUS IS CLOSED
RULE 4
IF SYSTEM CLOCKTIME > 5:30 PM
AND SYSTEM CLOCKTIME < 8:30 PM
AND TANK TQ-RFQ LEVEL ABOVE 6.5
THEN PUMP BT-RFQ.1 STATUS IS OPEN
OK Cancelar Ajuda
Clique no botão Ajuda para rever as instruções para construção de controles
```

Figura 23 - Interface EPANET para edição da lógica de automação 3

Fonte: Elaboração própria

Conforme exibido na Figura 23, a lógica de automação 3 também utiliza limites de nível mais conservativos que os da lógica de automação 1, tanto para o acionamento, em que o nível máximo para acionamento de ambas as bombas na lógica 3 é menor que o limite máximo para acionamento de ambas as bombas na lógica de automação 1, quanto para a desativação (nível mínimo para desativação de ambas as bombas na lógica 3 maior que o limite mínimo para desativação de ambas as bombas na lógica de automação 1) da bombas de transferência.

No caso específico da estação de Riacho da Forquilha (RFQ), para o horário fora de ponta, a bomba de transferência 1 (BT-RFQ.1) é acionada quando essa variável no tanque da estação (TQ-RFQ) atinge 5 m e desativada quando esse mesmo nível atinge 1,5 m. Para o horário fora de ponta, esta mesma bomba (BT-RFQ.1) é acionada quando o nível de fluido no tanque da estação (TQ-RFQ) atinge 6,5 m e desativada quando esse mesmo nível atinge 3 m.

Esta diferença de 1,5 m entre os limites do horário de ponta e os limites do horário fora de ponta implica, para a estação de Riacho da Forquilha, em uma margem de cerca de 68 m³. Para a vazão considerada para o campo de Riacho da Forquilha, com a utilização da lógica de automação 3, durante o horário de ponta, o acionamento da primeira das bombas de transferência (BT-RFQ.1) é postergado em cerca de 2 h 45 min com relação ao que ocorreria caso o sistema fosse controlado pela lógica 2. Com esta modificação é esperado que, mesmo que ao custo de uma eficiência energética um pouco inferior que a da lógica de automação 2, seja gerado um menor desembolso por unidade de fluido transferido (R\$/m³).

Esta lógica de automação, conforme explicado, tende a concentrar o consumo de energia no horário fora de ponta, quando a energia elétrica é mais barata, o que não ocorre com as lógicas de automação 1 e 2

A avaliação dos resultados de simulação obtidos com o aplicativo EPANET para as três lógicas de automação expostas, se encontra detalhada na seção 5.2.6.

5.2.6. Resultados e análise

Nesta seção são apresentados os principais resultados de simulação obtidos a partir da modelagem das três lógicas de automação apresentadas previamente quando aplicadas à rede piloto, com o aplicativo EPANET.

De forma a avaliar os desempenhos das diferentes lógicas de automação, são comparados os comportamentos ao longo do tempo do nível do tanque da estação de Riacho da Forquilha (TQ-RFQ), a vazão das bombas da estação de Riacho da Forquilha (BT-RFQ.1 e BT-RFQ.2), e a diferença entre as cargas hidráulicas na sucção e no recalque destas mesmas bombas.

Além do comportamento destas grandezas com o passar do tempo, são comparados os consumos acumulados de energia elétrica e os custos de energia acumulados para o período de um dia. Como o nível do tanque da estação de Riacho da Forquilha (TQ-RFQ) é a principal grandeza da qual depende a automação das bombas de transferência, esta será a primeira a ser avaliada.

O comportamento do nível do tanque da estação de Riacho da Forquilha para as três lógicas de automação de bombas se encontra representado na Figura 24. A área azul no gráfico abaixo representa o horário de ponta.

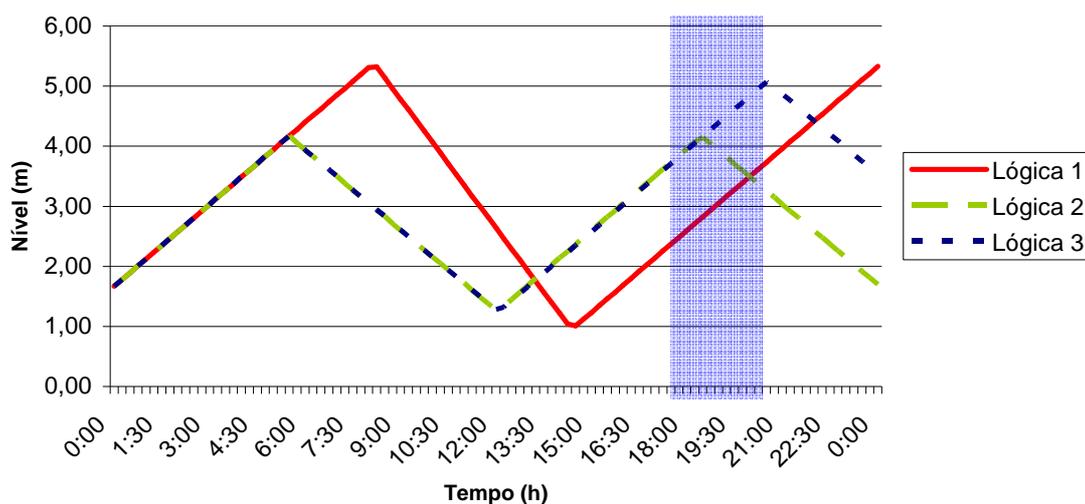


Figura 24 - Variação do nível do tanque da estação de Riacho da Forquilha (TQ-RFQ) ao longo do tempo para diferentes lógicas de automação

Fonte: Elaboração própria

É possível observar na Figura 24 que a inclinação na borda descendente da curva de comportamento de nível para a lógica de automação 1 é mais acentuada que nas demais. Isso é consequência do acionamento em paralelo de bombas, que combinadas promovem uma vazão maior que nas demais. É possível observar também, na Figura 24, que a lógica 3 resulta em um aumento mais acentuado do nível durante o horário de pico, se comparado com o da lógica 2, pois o acionamento das bombas é postergado, de forma a evitar o consumo nesse horário, quando a energia é mais cara. Em nenhum momento, porém, o nível do tanque para a lógica de automação 3 ultrapassa o nível máximo alcançado com a lógica de automação 1.

O nível do tanque depende da diferença entre a vazão de entrada (produção média do campo de Riacho da Forquilha, que foi considerada constante) e a vazão de saída (vazão das bombas, que depende da lógica de automação aplicada). Os comportamentos das vazões das bombas de transferência de óleo da estação de Riacho da Forquilha para as três lógicas de automação avaliadas se encontram representados na Figura 25. A área azul no gráfico abaixo representa o horário de ponta.

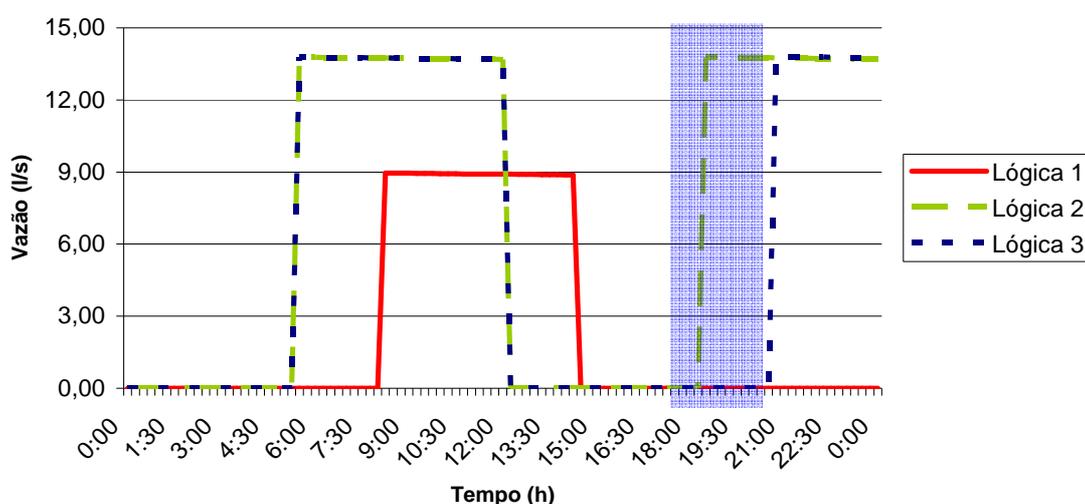


Figura 25 - Variação da vazão de fluido nas bombas de transferência da estação de Riacho da Forquilha para diferentes lógicas de automação

Fonte: Elaboração própria

É possível observar na Figura 25, de forma mais clara que na Figura 24, que o acionamento das bombas é postergado de forma a evitar o bombeamento durante o

horário de ponta. Para a lógica 1, as duas bombas são acionadas simultaneamente e, como estas são idênticas, a curva na Figura 25 representa o comportamento de ambas individualmente. Para as lógicas 2 e 3, os relatórios de simulação mostraram que apenas uma das duas bombas foi acionada durante as simulações. É possível observar ainda que a vazão para a lógica 1 é menor que para as demais. Isto é consequência do acionamento em paralelo de duas bombas. Tal fato ocasiona um aumento do consumo de energia elétrica, que se reflete em um maior custo com energia elétrica. Essa e outras informações da simulação para o período de 24 horas se encontram representadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Relatórios de simulação das diferentes lógicas de automação obtidas por meio do EPANET

Estratégia de automação	Bomba	Utilização (%)	Rendimento médio	kWh/m ³	kW médio	kW máximo	Custo dia (R\$)	Escoado (m ³)	Rcv (R\$/m ³)
Estratégia 1	BT-RFQ.1	25,78	52,08	0,89	28,60	28,62	37,31	-	-
	BT-RFQ.2	25,78	52,08	0,89	28,60	28,62	37,31	-	-
	Total	-	-	-	-	-	74,62	431,96	0,173
Estratégia 2	BT-RFQ.1	50,37	56,38	0,45	22,29	22,49	63,38	-	-
	BT-RFQ.2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
	Total	-	-	-	-	-	63,38	598,24	0,106
Estratégia 3	BT-RFQ.1	42,71	56,33	0,44	21,63	22,48	46,74	-	-
	BT-RFQ.2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
	Total	-	-	-	-	-	46,74	514,41	0,091

Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 12 é possível observar que a lógica de automação 1 resulta no menor rendimento, no maior consumo unitário (kWh/m³) (correspondente a praticamente o dobro dos demais) e no maior custo total. A lógica 2 resulta em um rendimento maior que as demais lógicas e possui um percentual de utilização das bombas menor que a lógica 1, consequência da maior vazão por bomba obtida com o acionamento de apenas uma das bombas por vez. Um fato notável referente à lógica 3 é que, apesar de possuir um rendimento menor que a lógica 2, ocasiona um custo total de energia menor que todas as demais. Isto é consequência direta do fato desta lógica evitar o acionamento das bombas no horário de ponta, quando a energia elétrica é mais cara.

O comportamento do valor da função objetivo, relação custo/vazão (R_{cv}), que se encontra representado na coluna “Rcv” da Tabela 12, está representado na Figura 26.

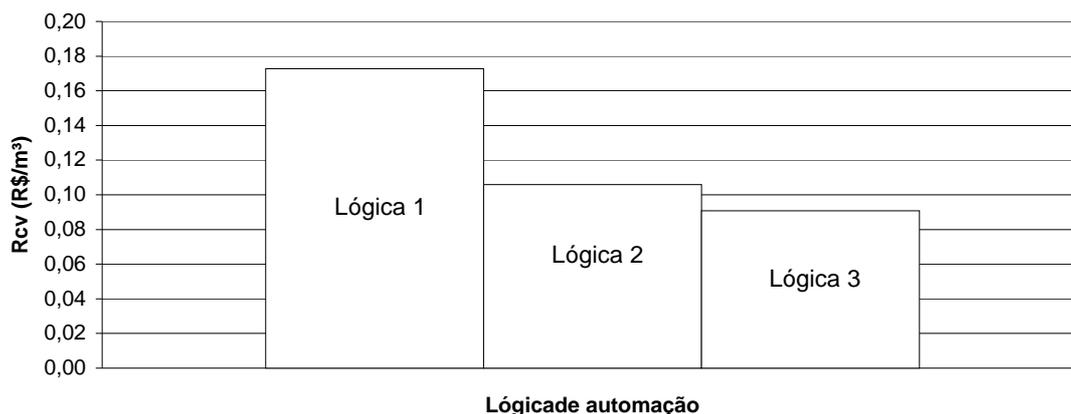


Figura 26 - Comportamento da Rcv (função objetivo) para as diferentes lógicas de automação

Fonte: Elaboração própria

Na Figura 26 é possível observar que o custo de energia por unidade de volume da lógica 3 é 47 % menor que o da lógica 1 e 14 % menor que o da lógica 2.

A justificativa para o menor rendimento quando o sistema é operado utilizando a lógica 1 refere-se ao fato de que o acionamento simultâneo das bombas gera uma vazão maior, que gera uma perda de carga maior que, por sua vez, gera uma maior diferença de carga hidráulica aplicada ao bombeador. Este comportamento pode ser observado na Figura 27, onde a área destacada em azul representa o horário de ponta.

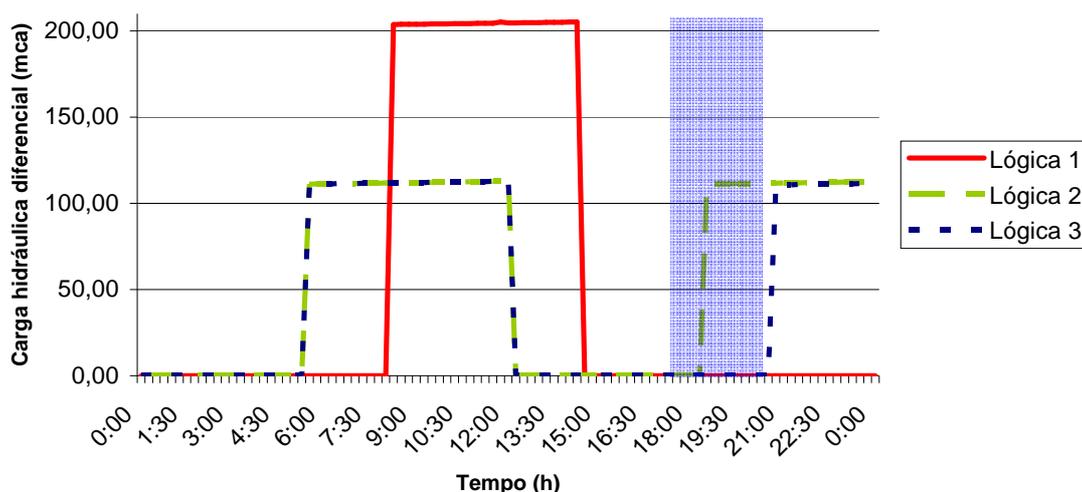


Figura 27 - Variação da carga hidráulica aplicada às bombas de transferência da estação de Riacho da Forquilha para diferentes lógicas de automação

Fonte: Elaboração própria

O fato de ocorrer um maior consumo de energia na lógica de automação 1 em relação as lógicas de automação 2 e 3 refere-se à maior vazão máxima provocada pela lógica de automação 1 no duto entre a estação de Riacho da Forquilha e a estação de Leste de Poço Xavier (DT-RFQ/LPX). Uma maior vazão ocasiona uma maior perda de carga e uma maior carga hidráulica aplicada às bombas de transferência. Uma breve análise dimensional do conceito de altura manométrica (H) permite perceber que essa grandeza expressa a quantidade de energia por unidade de massa. Nesse sentido, em um sistema de transferência de fluidos eficiente, deve ser buscada a redução do valor da altura manométrica demandada pela bomba (MATTOS E. E.; FALCO R., 1998). Como é possível observar na Figura 25, as vazões na bomba 1 da estação de Riacho da Forquilha (BT-RFQ.1) para as lógicas de automação 2 e 3 obtidas a partir da simulação no EPANET foram de cerca de 13,75 l/s enquanto que as vazões obtidas para cada uma das bombas da estação de Riacho da Forquilha (BT-RFQ.1 e BT-RFQ.2) foram de cerca de 8,91 l/s. Como ambas as bombas são acionadas simultaneamente quando as mesmas são controladas de acordo com a lógica de automação 1, a vazão no duto entre a estação de Riacho da Forquilha e a estação de Leste de Poço Xavier (DT-RFQ/LPX), para o sistema operando de acordo com a lógica de automação 1, é cerca de 17,82 l/s, ou seja, 29,6% superior às vazões neste mesmo trecho para as lógicas de automação 2 e 3.

Para as simulações realizadas, o EPANET foi configurado para calcular as perdas de carga nos dutos com base na fórmula de *Darci-Weisbach*. De acordo com esta fórmula, a perda de carga em um trecho reto de tubulação é proporcional ao quadrado da vazão, como pode ser observado nas equações abaixo (LIMA, 2003, p. 23).

$$H_f = f \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \text{ ou} \quad (3)$$

$$H_f = 0,0826 f \frac{L}{D^2} \cdot Q^2 \text{ (utilizando unidades do sistema métrico), em que:} \quad (4)$$

f = Coeficiente empírico que depende do número de Reynolds e da rugosidade do duto;

L = Comprimento do tubo;

D = Diâmetro interno do tubo;

v = Velocidade média do fluido;

g = Aceleração da gravidade;

Q = Vazão.

Como a vazão no duto entre as estações de Riacho da Forquilha e Leste de Poço Xavier (DT-RFQ/LPX), para a lógica de automação 1 é 29,6% superior à vazão deste mesmo duto para as lógicas de automação 2 e 3, conforme a fórmula de *Darcy-Weisbach*, a perda de carga no duto entre as estações de Riacho da Forquilha e Leste de Poço Xavier (DT-RFQ/LPX), para a lógica de automação 1 é 67,96% superior à perda de carga neste mesmo duto para as lógicas de automação 2 e 3. Este efeito justifica o fato de a carga hidráulica sobre as bombas da estação de Riacho da Forquilha ser cerca de 84% superior quando o sistema é operado de acordo com a lógica de automação 1 com relação à carga hidráulica nos mesmos pontos quando o sistema é operado de acordo com as lógicas de automação 2 e 3, vide Figura 27.

O aprimoramento da lógica 3 com relação à lógica 2 consiste na alteração dos limites de nível para acionamento das bombas durante o horário de ponta de forma a evitar a utilização das bombas neste período. A justificativa para esta alteração é o maior custo de energia neste intervalo o que, conforme mostram os resultados de simulação, representa uma oportunidade de economia significativa. Esta proposta de aprimoramento consiste na contribuição do presente trabalho.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostram que a o custo de transferência por unidade de volume (Rcv) obtidos das simulações da lógica de automação proposta (lógica 3) é cerca de 50 % inferior ao custo obtido das simulações da lógica de automação original (lógica 1) e 14 % inferior ao custo associado à lógica de automação atual (lógica 2). Estes resultados mostram que existe um grande potencial de economia de energia e redução de gastos nos sistemas em estudo. Essa economia pode ser obtida com a modificação das lógicas de automação aplicadas às bombas de transferência com equipamentos existentes sem necessidade de investimento em novos equipamentos.

Além de econômica, esta alternativa possui diversas vantagens práticas. Diversos trabalhos foram desenvolvidos no sentido de otimizar o bombeio de fluidos utilizando técnicas complexas como algoritmos evolutivos, porém nenhum dos trabalhos aplicados à indústria de produção terrestre de petróleo (Brasileiro, 2005 e Machado, 2006) resultou em aplicações viáveis. Outras vantagens da abordagem proposta referem-se ao fato de possuir maior confiabilidade do que a automação centralizada e ter menor probabilidade de gerar rejeição por parte dos operadores.

As próprias características do sistema em estudo tornam mais racional, ao invés de uma automação centralizada baseada em cálculos não verificáveis, o aprimoramento das lógicas de automação de cada um dos dispositivos de automação já existentes nas instalações em estudo. Além do menor investimento necessário à implementação, essa abordagem possui maior confiabilidade que o controle centralizado necessário a um sistema que utilize o agendamento de bombas por algoritmos evolutivos. Esta conclusão é uma das contribuições do presente trabalho.

O presente trabalho propõe uma lógica de automação com limites tão conservadores quanto a lógica atualmente aplicada às instalações em estudo. Isto foi comprovado pelo resultado das simulações que mostrou que a aplicação de nenhuma das lógicas implicou em violação dos limites operacionais dos equipamentos. Não foram encontrados registros de uso do aplicativo EPANET para modelagem de redes de escoamento de petróleo. Desta forma, essa aplicação pioneira é uma das contribuições do presente trabalho.

Dessa forma conclui-se que com base em alterações simples nas lógicas de automação de equipamentos existentes é possível reduzir de forma significativa os custos com energia elétrica nos sistemas de transferência da indústria de produção terrestre de petróleo sem necessidade de investimento em novos equipamentos e sem comprometer a segurança das instalações.

As principais dificuldades encontradas no presente trabalho foram oriundas das limitações do aplicativo EPANET, principalmente associadas ao detalhamento dos consumos de energia ao longo do tempo. Uma sugestão para trabalhos futuros é a de aplicar outras ferramentas computacionais e realizar a análise de comportamento do sistema para a operação de diversas estações por longos períodos de tempo.

Como sugestão para trabalhos futuros pode ser avaliada a possibilidade de aplicar técnicas de otimização para, com a implementação baseada em lógicas simples e controle distribuído, minimizar os custos com energia e os custos com manutenção associados ao número de chaveamento de bombas.

De forma a fornecer resultados mais precisos, pode ser avaliada também a possibilidade de aprimorar a ferramenta computacional utilizada nesta dissertação ou utilizar outra ferramenta computacional com capacidade de modelagem de escoamento de fluidos multifásicos e variação de viscosidade e densidade com a temperatura.

PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Como decorrência da produção científica contida nesta dissertação, foram originados dois artigos.

O artigo “Uso Eficiente de Energia na Indústria de Exploração Terrestre de Petróleo no Oeste Potiguar com a Modificação das Estratégias de Automação” foi aceito para apresentação no 7º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás (7º PDPETRO). A comunicação das correções será emitida em 29/07/2013. O parecer final será emitido em 09/08/2013

O artigo “Uso Eficiente de Energia na Indústria de Exploração Terrestre de Petróleo no Oeste Potiguar com a Modificação das Estratégias de Automação” foi aprovado para publicação na revista Petro & Química da Editora Valete. Esta revista é classificada com o conceito B5 na área de avaliação Engenharias IV Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M; HAMACHER, S.; PACHECO, M.; VELLASCO, M.. **The energy minimization method: a multiobjective fitness evaluation technique and its application to the production scheduling in a petroleum refinery.** Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation. Seul. 27 mai. 2001. p 560-567. 1 v
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Caderno Temático ANEEL Tarifas de Fornecimento de Energia Elétrica.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/caderno4capa.pdf>>. Brasília, DF, abr. 2005.
- _____. **Homologa as Tarifas de Energia - TEs e as Tarifas de Uso dos Sistemas de Distribuição - TUSDs e estabelece a revisão das receitas das instalações de conexão referentes à Companhia Energética do Rio Grande do Norte - Cosern e dá outras providências.** Resolução. n. 1413, de 24 de janeiro de 2013. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/reh20131413.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2013.
- _____. Resolução n° 456, de 29 de novembro 2000. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 nov. 2000, seção 1, p. 35.
- _____. Resolução n° 090, de 27 de março de 2001. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 28 mar. 2001, seção 1, p. 175.
- _____. **Por Dentro da Conta de Luz.** Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/cartilha_1p_atual.pdf>. Brasília, DF, out. 2008.
- _____. **Tarifas - Consumidores Finais.** Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?id_area=91>. Acesso em 3 dez. 2012.
- ANP. Portaria Conjunta No 01, DE 19 DE JUNHO DE 2000. **Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás.** Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC000652.pdf>>. Acesso em 13 ago. 2012.
- AZEVEDO, J. **Diagrama Simplificado de Linhas de Transmissão e Barras com Potência Instalada em MVA.** Disponível em:

- <www.ons.org.br/download/previsao_carga_par/04%20-%20Cosern.ppt>. Acesso em: 5 dezembro 2011.
- BARÁN, B.; LÜCKEN, C.; SOTELO, A. (2005). **Multi-objective pump scheduling optimisation using evolutionary strategies**. Advances in Engineering Software. volume 36, p. 39 - 47.
- BRASIL. **Portaria Interministerial N° 553**, Brasília, DF, 8 dez. 2005. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/conselhos_comite/cgiee/Portaria_Interministerial_nx_553_2005.pdf> acesso em 04 junho 2012
- BRASIL, **Procel Info**. Disponível em: <<http://www.eletrabras.com/pci/>>. Acesso em: 27 mai. 2012.
- _____, **Programa Nacional de Conservação de Energia elétrica**. Disponível em: <<http://www.eletrabras.com/elb/procel>>. Acesso em: 27 mai. 2012.
- BRASILEIRO, E. V. **Um Algoritmo Evolutivo para Otimização do Controle de Redes de Escoamento de Petróleo**. 2005. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação), Centro de Ciências e Tecnologia - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande,
- COPEL. **Manual de Eficiência Energética na Indústria**. Curitiba, PR. 2005. 155 p.
- ELETRABRAS. **Informações Institucionais**. Disponível em <<http://www.eletrabras.com/pci/main.asp?Team={63888157-B10C-4A4A-82B8-B694CFC53FCE}>>. Acesso em: 25 mai. 2013
- EPE. **Balanco Energético Nacional 2012**. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2013. Brasília, DF, 2012
- EPE. **Plano Nacional de Energia 2030**. Disponível em <http://www.epe.gov.br/PNE/20080111_1.pdf>. Acesso em: 14 jul 2013. Brasília, DF, 2007
- INMETRO. **Programa Brasileiro de Etiquetagem - PBE**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/qualidade/eficiencia.asp>>. Acesso em: 23 jun. 2012.
- LEHNS. **EPANET**. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page_id=32>. Acesso em 31 jul. 2012.
- _____. **Prefácio do Manual do Usuário - EPANET Brasil - LENHS UFPB**. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page_id=494>. Acesso em: 31 jul. 2012. João Pessoa, PB, 2009

- LIMA, E. P. C. **Mecânica das Bombas**. 2. Ed. Rio de Janeiro, RJ, Editora Interciência, 2003. 610 p.
- MACHADO, E. C. M. **Operação de redes de escoamento de petróleo utilizando algoritmo evolutivo multi-objetivo**. 2006. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Centro de Ciências e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande.
- MAITELLI A. L. **Controladores Lógicos Programáveis**. 2008. Natal, RN. Disponível em: <<http://www.dca.ufrn.br/~maitelli/FTP/clp/>>. Acesso em: 27 set. 2012.
- MARQUES, M; HADDAD, J.;MARTINS, A., PROCEL. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações**. Itajubá, MG. 2006. 621 p.
- MATTOS E. E.; FALCO R. **Bombas Industriais**. Rio de Janeiro, RJ, Editora Interciência, 1998. 474 p.
- PROCEL. **Software EPANET**. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp?TeamID={3301BB0A-445E-49FB-BE4B-9031B1FD6414}>>. Acesso em: 31 jul. 2012
- REYNOLDS, O. **An Experimental Investigation of Circumstances which Determine whether the Motion of Water shall Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels**. Proceedings of the Royal Society of London. 1883. p. 84 - 99. Disponível em: <<http://rspl.royalsocietypublishing.org/content/35/224-226/84.full.pdf>>. Acesso em: 8 ago. 2012.
- SILVA, M. A; GONZALEZ, M. L; SILVA, R.S; MARTINEZ, C. B. **Avaliação de Parâmetros Técnicos e Econômicos na Aquisição e Substituição de Motores de Indução Trifásicos de 1 cv a 10 cv**. Sistemas de Saneamento: Eficiência Energética. p 255-293. Disponível em < http://www.lenhs.ct.ufpb.br/wp-content/uploads/arquivos/Livro_Eficiencia_Energetica.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2013. João Pessoa, PB, 2010
- MARQUES, M; HADDAD, J.;MARTINS, A., PROCEL. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações**. Itajubá, MG. 2006. 621 p.
- THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2. Ed. Rio de Janeiro, RJ: PETROBRAS, 2004. 271 p.