



VALTER SOUZA BLANDE

**DETECÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO BRUTA DE ÓLEO EM POÇOS COM
ELEVAÇÃO ARTIFICIAL GLI**

**CAMPINAS
2012**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**

VALTER SOUZA BLANDE

**DETECÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO BRUTA DE ÓLEO EM POÇOS COM
ELEVAÇÃO ARTIFICIAL GLI**

Orientador: Prof. Dr. Takaaki Ohishi

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de Energia Elétrica.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO VALTER SOUZA BLANDE
E ORIENTADO PELO PROF. DR. TAKAAKI OHISHI

Assinatura do Orientador

**CAMPINAS
2012**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

B61d Blande, Valter Souza
Detecção e otimização da produção bruta de óleo em poços com elevação artificial gli / Valter Souza Blande. -
-Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Takaaki Ohishi.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Petróleo. 2. Otimização. 3. Sensor . 4. Poços. I. Ohishi, Takaaki, 1955-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Impedance sensor for oil production detection and optimization in intermittent gas lift wells

Palavras-chave em Inglês: Oil , Optimization, Sensor, Wells

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Takaaki Ohishi, Akebo Yamakami, Niederauer Mastelari, Secundino Soares Filho

Data da defesa: 27-11-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Valter Souza Blande

Data da Defesa: 27 de novembro de 2012

Título da Tese: "Detecção e Otimização da Produção Bruta de Óleo em Poços com Elevação Artificial GLI"

Prof. Dr. Secundino Soares Filho (Presidente):

Secundino Soares F

Prof. Dr. Niederauer Mastelari:

Niederauer Mastelari

Prof. Dr. Akebo Yamakami:

Akebo Yamakami

Resumo

Esta dissertação apresenta um sensor e um estudo teórico para otimização e monitoramento em tempo real da produção bruta de poços de petróleo operados com o sistema artificial de elevação GLI (Gás Lift Intermitente). O trabalho aborda desde a conceituação do ambiente de pesquisa até o desenvolvimento de instrumentação para instalação em poços de petróleo, começando com a modelagem teórica e levantamento da função de produção de um poço terrestre operado com GLI, propondo em seguida um modelo de cálculo de produção estimada em tempo real através do uso de instrumentação especialmente desenvolvida para este modelo e, finalmente, apresenta o projeto de hardware de um sensor capacitivo que viabiliza a aplicação do modelo de cálculo de produção estimada em poços terrestres operados com GLI através da medição da impedância no tempo de tubulações onde há escoamento de óleo, água e gás.

Palavras-chave: *Produção de petróleo, Otimização, Sensor de impedância.*

Abstract

This thesis presents a sensor and a theoretical study to monitor and optimize the oil wells production with artificial lifting IGL (intermittent gas lift). The work begins with an introduction to oil well production concepts and the sensor development motivation. A theoretic model for IGL wells production is proposed in order to get an IGL well production curve. Then an estimated calculus for the oil well production measurement in real time is presented with the capacitive sensor which measures the flow impedance at time, especially designed for this purpose. Finally, the impedance sensor is presented as a measurement instrument for oil flow applications related to the flow impedance measurement at time in two phase flow.

Keywords: *Oil well production, Optimization, Impedance sensor.*

Dedico este trabalho aos meus familiares e aos colegas de trabalho.

Agradecimentos

O apoio de diversas pessoas e instituições convergiu na conclusão deste trabalho. A estas pessoas e instituições presto minha homenagem:

- Ao Professor Takaaki Ohishi (DENSIS-FEEC-UNICAMP) pela paciência e competência no direcionamento deste trabalho.

- Aos colegas do laboratório de pesquisa Two Phase Flow Group (2PFG) pela valiosa ajuda na construção de protótipos e testes.

- Ao Professor Eugênio Spanó Rosa (DE-FEM-UNICAMP) pela paciência e valioso apoio técnico.

- A Petrobras por acreditar neste trabalho e apoiar financeiramente o desenvolvimento do sensor e por ceder seu campo de produção (UOBA) para o levantamento de dados e realização dos testes com o sensor.

“Significa que posso não ter muito conhecimento e/ou experiência, porém desconfio de como as coisas sucedem já que possuo imaginação. (Riobaldo - Grande Sertão: Veredas)”

Guimarães Rosa

Sumário

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO.....	2
1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	3
CAPÍTULO 2	5
MÉTODO DE ELEVAÇÃO POR INJEÇÃO DE GÁS INTERMITENTE	5
2.1 O SISTEMA DE “GAS-LIFT”	5
2.2 “GAS-LIFT” INTERMITENTE	7
2.2.1 Ciclagem do poço	8
2.2.2 Ciclo de Intermitência	8
2.2.3 Curvas de pressão do GLI	10
2.2.3.1 Pressão de fluxo no fundo do poço.....	10
2.2.3.2 Pressão no revestimento e no tubo (PR e PT).....	11
2.2.4 Produtividade do poço	13
2.3 SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE POÇOS GLI.....	13
2.4 ENVELHECIMENTO DOS POÇOS.....	14
2.5 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO EM POÇOS GLI.....	15
CAPÍTULO 3	17
MODELO TEÓRICO DA CURVA DE PRODUÇÃO	17
3.1 MODELO DA PRODUÇÃO BRUTA	17
3.1.1 Modelo teórico com “ <i>fall back</i> ”	20

3.1.2	Tempo de acumulação no ciclo do GLI.....	21
3.1.3	Estimativa da produção diária.....	21
3.2	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CURVA DE PRODUÇÃO.....	23
3.2.1	Determinação da altura da coluna estática (He).....	23
3.2.2	Determinação da constante de tempo da curva de produção	23
3.2.3	Dados experimentais com poços reais.....	24
3.3	CURVA DE PRODUÇÃO DE UM POÇO REAL.....	25
3.4	IMPACTO NA PRODUÇÃO OPERANDO NO PONTO ÓTIMO.....	26
	CAPÍTULO 4.....	29
	ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO BRUTA DE PETRÓLEO EM TEMPO REAL	29
4.1	MODELO PARA CÁLCULO DE PRODUÇÃO ESTIMADA POR GOLFADA.....	30
4.1.1	Parâmetros e variáveis do modelo.....	30
4.1.1.1	Física de elevação da golfada	31
4.1.2	Cálculo da estimativa de produção bruta em tempo real.....	32
4.1.3	Teste de campo e validação do modelo de cálculo da produção estimado	35
4.1.3.1	Instalação do sensor de impedância e sinais	35
4.1.3.2	Considerações sobre o teste de campo	38
4.1.3.3	Análise de resultados do teste de campo	39
4.1.4	Conclusões sobre o modelo de estimativa de produção	40
	CAPÍTULO 5.....	41
	OTIMIZAÇÃO E MONITORAMENTO DA PRODUÇÃO DE UM POÇO ISOLADO.....	41
5.1	DETECÇÃO DA GOLFADA E CÁLCULO DA PRODUÇÃO ESTIMADA ATRAVÉS DO SENSOR DE IMPEDÂNCIA.....	42
5.2	BUSCA DO PONTO ÓTIMO DE PRODUÇÃO	43
5.2.1	Estratégia de passo fixo.....	43
5.2.2	Estratégia com uso da função de produção teórica.....	44
5.3	DISTRIBUIÇÃO DA PRODUÇÃO COM TEMPO DE CICLO FIXO	44
	CAPÍTULO 6.....	47
	DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE IMPEDÂNCIA.....	47
6.1	CONSTRUÇÃO DO TRANSDUTOR.....	48

6.2	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO TRANSDUTOR/FLUIDO	50
6.3	CIRCUITO ELETRÔNICO DO SENSOR	52
6.3.1	Características gerais do sensor de impedância	52
6.3.2	Descrição geral do hardware.....	53
6.3.2.1	Visão Geral.....	53
6.3.2.2	Leitura do transdutor e compensação de parasitas.....	55
6.3.3	Placa de circuito impresso do sensor	56
6.3.4	Descrição geral do firmware	59
6.4	COMUNICAÇÃO DIGITAL.....	60
6.4.1	Padrão físico de comunicação	61
6.4.2	Protocolo de comunicação ModBus.....	62
6.4.2.1	Comunicação mestre-escravo	62
6.4.2.2	Frame de comunicação do modbus	63
6.4.3	Interface entre sensor e computador remoto ou CLP	64
6.5	INSTALAÇÃO EM ÁREAS CLASSIFICADAS	66
6.5.1	Zonas de classificação.....	66
6.5.2	Tipos de proteção do sensor de impedância	67
6.5.2.1	Invólucro à prova de explosão	68
6.5.2.2	Circuito de segurança intrínseca	68
6.6	SINAL DO MÓDULO DA IMPEDÂNCIA NO TEMPO.....	70
CAPÍTULO 7.....		75
CONCLUSÃO		75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		77

Lista de Figuras

Figura 2-1- Sistema de “Gas-Lift”	6
Figura 2-2 - Processo de elevação da coluna por “Gas-Lift” intermitente	7
Figura 2-3 – Ciclo de Intermitência	9
Figura 2-4 – Pontos de medida de pressão	10
Figura 2-5 – Pressão de fundo do GLI	11
Figura 2-6 – Pressão no revestimento e pressão no tubo com o tempo	12
Figura 2-7 - Arquitetura do sistema de supervisão.....	14
Figura 3-1 - Esboço da função de acumulação na coluna de produção.....	19
Figura 3-2 - Tempo de acumulação	21
Figura 3-3 - Curva de produção do poço de número 11	26
Figura 3-4 - Comparação entre a produção ótima e atual	27
Figura 4-1 - Representação da produção de uma golfada	30
Figura 4-2 - Tempo de aceleração da golfada	31
Figura 4-3 – Foto do poço e instalação do sensor de impedância para teste de campo.....	35
Figura 4-4 - Representação do sinal de pressão do revestimento do poço e do sensor de impedância	36
Figura 4-5 - Sinais dos sensores de golfada vertical e horizontal e de pressão no tubo e no revestimento.....	37
Figura 4-6 - Sinais coletados dos sensores de golfada e pressão para vários ciclos.....	38
Figura 4-7 – Volume Estimado x Volume Medido	40
Figura 5-1 – Função de produção e ponto de produção máxima.....	42
Figura 5-2 – Comunicação entre sensor de impedância e CLP	43
Figura 5-3 – Estratégia de passo fixo na busca do ponto ótimo de produção	43
Figura 5-4 – Histograma da produção com TC fixo.....	45
Figura 5-5 - Intervalo de confiança supondo uma distribuição do tipo $N(\mu,\sigma)$	46
Figura 6-1 – Diagrama de construção do transdutor capacitivo	48
Figura 6-2 – Foto de perfil frontal do transdutor e do alojamento do circuito eletrônico	49
Figura 6-3 – Foto de perfil lateral do transdutor e do alojamento do circuito eletrônico	50
Figura 6-4 - Função de distribuição acumulada para o BSW encontrado nos poços do teste de campo	51
Figura 6-5 - Representação elétrica da impedância do transdutor em função do fluido	52
Figura 6-6 – Idéia geral para leitura da impedância do transdutor	53
Figura 6-7 – Diagrama em blocos do circuito eletrônico	54
Figura 6-8 – Circuito para leitura do transdutor e compensação de parasitas	55
Figura 6-9 - Foto da placa eletrônica do sensor golfada com vista superior	57
Figura 6-10 - Foto da placa eletrônica do sensor golfada com vista inferior	57
Figura 6-11 – Placa eletrônica instalada no invólucro à prova de explosão.....	58
Figura 6-12 – Placa eletrônica em operação em laboratório	58
Figura 6-13 – Diagrama em blocos do Firmware do microcontrolador	60
Figura 6-14 – Drives de comunicação RS485.....	61
Figura 6-15 - Comunicação Mestre-Escravo do ModBus.....	62
Figura 6-16 – Frame de comunicação do protocolo ModBus	63
Figura 6-17 – Comunicação entre sensor de impedância e computador ou CLP	64
Figura 6-18 - Elementos básicos para combustão	66
Figura 6-19 – Invólucro à prova de explosão.....	68
Figura 6-20 – Barreira zener do tipo linear	69
Figura 6-21 – Corrente de saída x tensão de saída da barreira zener linear	69

Figura 6-22 – Padrões de escoamento do fluido: (a) – bolhas, (b) – capa esférica, (c) – slug estável, (d) – slug instável, (e) – semi-anular e (f) – anular	70
Figura 6-23 – Sinal de impedância no tempo para padrão de tubo cheio	71
Figura 6-24 – Sinal de impedância no tempo para padrão de bolhas	71
Figura 6-25 - Sinal de impedância no tempo para padrão de capa esférica	72
Figura 6-26 - Sinal de impedância no tempo para padrão de slug estável	72
Figura 6-27 - Sinal de impedância no tempo para padrão de slug instável	72
Figura 6-28 - Sinal de impedância no tempo para padrão de semi-anular	72
Figura 6-29 - Sinal de impedância no tempo para padrão de anular	73
Figura 6-30 - Sinal de impedância no tempo para padrão de vazio.....	73

Lista de Tabelas

Tabela 3-1 - Dados experimentais de poços reais	24
Tabela 4-1 – Ensaios de elevação de golfada com diferentes colunas de óleo.....	31
Tabela 4-2 – Dados dos testes realizados em campo na UOBA	39
Tabela 6-1 – Mapa de memória de operação do sensor de impedância	65

Lista de Abreviações

BSW – Bottom sediment and water

CLP – Controlador lógico programável

Dh – Distância entre a “cabeça” do poço e a instalação do sensor de impedância

EEPROM - Electrically-erasable programmable read-only memory

GLI – “Gas-Lift” intermitente

Hv – Profundidade de instalação da válvula de gás lift

Hac – Altura da coluna total produzida durante o tempo de acumulação

Hf – Altura da coluna de “fall back”

IP – Índice de produtividade

L – Altura ou comprimento total da coluna produzida que atinge a superfície

Modbus – Protocolo industrial de comunicação digital

Pe – Pressão estática

Pf – Pressão de fluxo

PR – Pressão do revestimento ou anular do poço

Ps – Pressão do separador

PT – Pressão no tubo (“cabeça” do poço)

Pw – Pressão de fluxo

RS485 – Padrão de comunicação física com sinais balanceados

Tac – Tempo de acumulação

TC – Tempo de ciclo

TG – Tempo de golfada

Ti – Tempo de injeção de gás no anular do poço

TI – Tempo de injeção de gás na coluna de produção

TV – Tempo de viagem

Capítulo 1

Introdução

Esta dissertação é um dos frutos de um projeto de pesquisa financiado pela Petrobras sob o contrato no. 0050.0022719.06.4 / FUNCAMP 4357 e trata do desenvolvimento e validação de um sensor capaz de detectar e estimar a produção bruta de poços de petróleo terrestres operados com tecnologia de elevação artificial tipo GLI (Gás Lift Intermitente). O sensor foi projetado em conformidade técnica para ser instalado em áreas classificadas seguindo a norma internacional IEC60079-11. O projeto de pesquisa culminou com o desenvolvimento de hardware e software deste sensor, referenciado como sensor de impedância ao longo desta dissertação. Esta dissertação se aprofunda no estudo da operação de poços operados com GLI e técnicas para otimizar a produção de um poço isolado utilizando o sensor desenvolvido.

1.1 Motivação

O controle individual da produção de petróleo de um poço em um campo de produção com centenas de poços se torna crucial para detectar falhas de operação no poço, medir a produção do poço e obter o melhor desempenho na produção global otimizando a produção individual. Na prática, em campos maduros com baixa produtividade, a medição do volume de

óleo produzido pode ser feita por equipamentos com custos elevados e inviáveis de serem instalados poço a poço. Desta forma, a medição da produção individual do poço é feita desviando-se a produção do poço para um reservatório de óleo por um ou dois dias, registrando assim seu volume produzido. Esta técnica é feita em intervalos de meses devido ao recurso humano e operacional que envolve.

Neste contexto, surge o interesse em um equipamento de baixo custo e compatível com os equipamentos de automação dos poços como o CLP (controlador lógico programável – usado no acionamento de atuadores como válvulas e leitura de sensores além de possuir capacidade de comunicação e processamento de dados) e que consiga medir ou estimar com razoável precisão, a produção em tempo real sem necessidade de interromper o curso produtivo do poço. Além disso, veremos que os resultados deste estudo de pesquisa aplicado em um campo real de produção de petróleo encorajam a introdução destas técnicas e equipamento na rotina de produção do campo.

1.2 Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho é o de projetar e validar um sensor para poços de petróleo terrestres operados com GLI de forma que este sensor viabilize o estudo e implementação de técnicas de otimização do poço em tempo real. O sensor deve ser capaz de operar em poços com características diversas quanto à composição da produção bruta, pois a composição do petróleo bruto pode variar significativamente de um poço para outro ou num mesmo poço ao longo do tempo.

O estudo e otimização dos poços resultam em algoritmos factíveis de serem introduzidos tanto internamente no sensor como também no programa supervisorio dos equipamentos de automação do poço.

Uma das características técnicas do sensor deve ser a compatibilidade com instrumentos de campo como CLPs, ou seja, deve ter protocolo de comunicação familiar aos equipamentos de controle dos poços, operar com a alimentação elétrica disponível no campo e poder ser instalado em qualquer região do parque de produção, principalmente em áreas classificadas.

1.3 Apresentação do trabalho

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. Este Capítulo de introdução apresenta a motivação do trabalho e seus objetivos.

No Capítulo 2 apresentamos os conceitos envolvidos na elevação artificial de petróleo em poços terrestres, dando ênfase em poços operados com GLI (Gás Lift Intermitente).

No Capítulo 3 apresentamos o modelo teórico da curva de produção de um poço operado com GLI e sua aplicação com dados extraídos de poços reais, permitindo um olhar qualitativo da curva de produção real e fornecendo subsídios para a otimização de um poço isolado.

No Capítulo 4 apresentamos o modelo matemático para o cálculo da produção estimada por golfada através do uso do sensor de impedância e sua validação em um teste de campo.

O Capítulo 5 apresenta a abordagem de otimização de um poço isolado usando o modelo de cálculo de produção estimada apresentado no Capítulo 4 e dados de testes realizados em campo.

No Capítulo 6 apresentamos o desenvolvimento do sensor de impedância e seu funcionamento e aplicações.

E por fim, no Capítulo 7, apresentamos as conclusões sobre este trabalho e sugestões para trabalhos futuros utilizando os resultados deste.

Capítulo 2

Método de Elevação por Injeção de Gás Intermitente

Quando a pressão do reservatório de um poço petróleo é insuficiente para produzir óleo na superfície de forma natural, técnicas de elevação artificial são aplicadas a fim de manter a vazão dentro de limites desejados.

O tipo de técnica de elevação artificial dependerá das diversas variáveis que governam a produção de um poço e são bem diversificadas para atender cada caso [9]. Neste estudo, discutiremos com mais detalhes o “Gas-Lift” Intermitente (GLI).

2.1 O sistema de “Gas-Lift”

O “Gas-Lift” é um método que utiliza a energia contida em um gás comprimido para elevar uma coluna de petróleo produzida até a planta de processo onde haverá a separação dos elementos presentes no fluido (óleo, água, gás etc) para que estes recebam seu devido tratamento. Se o gás for utilizado para gaseificar e reduzir a densidade da coluna de produção o método é chamado de “Gas-Lift” Contínuo (GLC) e recebe este nome pelo fato do gás ser

continuamente injetado. Se o gás for utilizado para o deslocamento do óleo então temos o “Gas-Lift” Intermitente, onde o gás é injetado na coluna por determinado tempo e em intervalos de tempo definidos.

No método de “Gas-Lift” contínuo o gás é injetado continuamente na base da coluna de produção. O efeito é a redução da densidade da coluna, permitindo assim sua elevação.

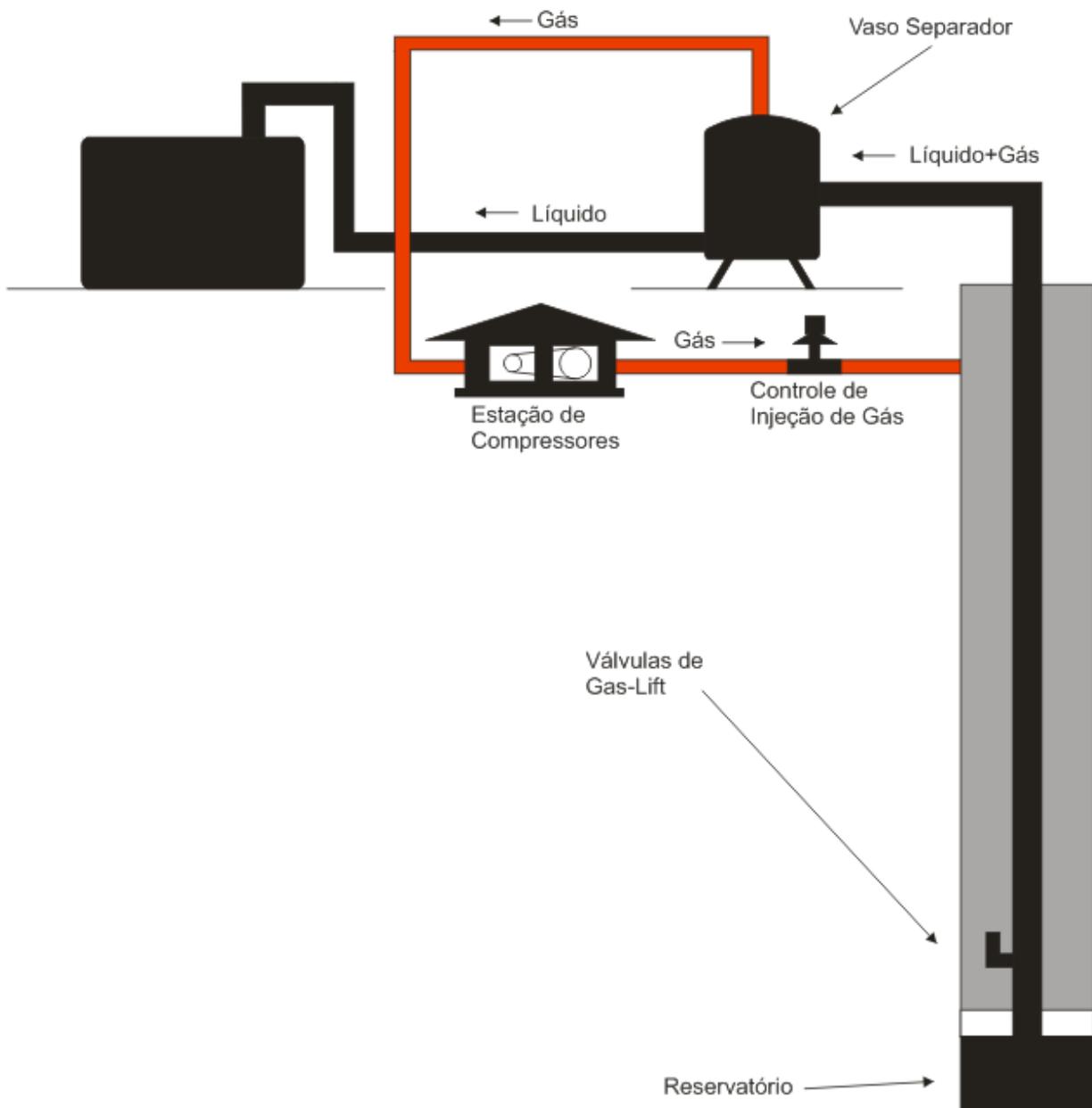


Figura 2-1- Sistema de “Gas-Lift”

Na Figura 2-1 temos esquemático do sistema de “Gas-Lift”. Independente da técnica de elevação (GLC ou GLI) uma estação de compressão fornece pressurização ao gás para injeção nos poços. O fluido extraído do poço chega a um separador gás-líquido, onde o gás retorna ao sistema de compressão enquanto o líquido vai para outro reservatório onde receberá o processamento adequado uma vez que o fluido é composto por uma mistura de componentes.

2.2 “Gas-Lift” Intermitente

O “Gas-Lift” Intermitente consiste no deslocamento de golfadas de óleo através da injeção em alta pressão na base da coluna, que empurra a coluna até a superfície. Esta injeção de gás é feita no revestimento do poço em intervalos de tempo bem definidos. O controle da injeção é feito por uma válvula instalada na “cabeça” do poço chamada de “válvula motora” ou “motor-valve”.

Na Figura 2-2 temos uma ilustração do processo de elevação de uma golfada de óleo pelo método de GLI que mostra os momentos antes e depois da válvula motora abrir.

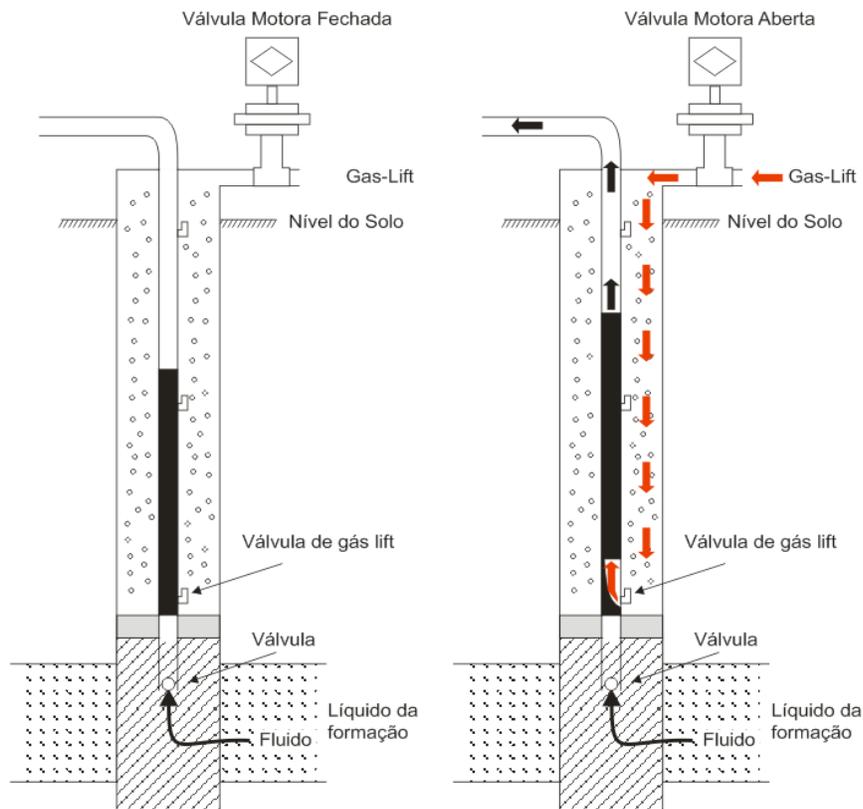


Figura 2-2 - Processo de elevação da coluna por “Gas-Lift” intermitente

Quando a válvula motora abre o “Gas-Lift” é injetado na coluna de revestimento do poço, aumentando a pressão no revestimento. A válvula de gás lift é ajustada para abrir em uma pressão pré-determinada. Em operação normal somente uma válvula deve abrir, como vemos na Figura 2-2. O “Gas-Lift” é então injetado na coluna, empurrando a golfada até a superfície. O gás é injetado a alta pressão para imprimir uma alta velocidade ascendente à golfada. Durante a elevação da golfada uma parte da coluna produzida ainda retorna ao fundo do poço enquanto a outra parte atinge a superfície. A parcela que retorna ao fundo do poço recebe a denominação de “fall back”.

Existem outras válvulas acima da válvula de gás lift que são utilizadas em operação de manutenção ou teste do poço. Um destes casos ocorre quando a coluna de óleo excede a altura máxima permitida para o poço. Neste caso, as válvulas superiores abrem em seqüência, de cima para baixo, para extrair o excesso de óleo e permitir que o poço volte a operar somente com a válvula de gás lift inferior.

2.2.1 CICLAGEM DO POÇO

Dois conceitos importantes para o GLI e que serão objeto deste estudo neste documento são o tempo de ciclo (TC) e o tempo de injeção (TI). O tempo de ciclo corresponde ao tempo definido entre dois inícios consecutivos de injeção de gás enquanto o tempo de injeção corresponde ao tempo em que a válvula motora fica aberta injetando gás na coluna de óleo e deve ser suficiente para elevar a coluna produzida até à superfície. A combinação destes dois tempos é conhecida com ciclagem do poço. O tempo de ciclo é normalmente definido em minutos e pode receber valores de alguns minutos até horas. Já o tempo de injeção é definido em segundos podendo variar de alguns segundos até alguns minutos. Por exemplo, um poço com ciclagem de 240'x120" possui um tempo de ciclo de duas horas e um tempo de injeção de dois minutos.

2.2.2 CICLO DE INTERMITÊNCIA

O ciclo de intermitência corresponde às fases que ocorrem para elevação de uma golfada até a superfície. O tempo de ciclo pode ser dividido em três períodos distintos:

- Período de alimentação;
- Período de elevação;
- Período de redução de pressão;

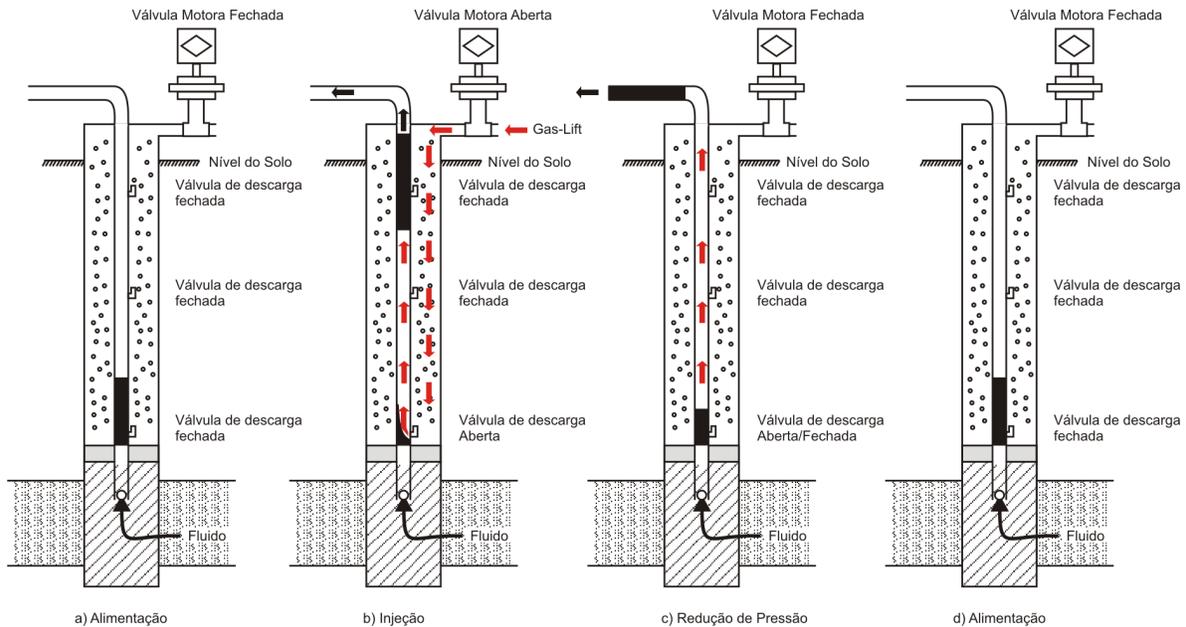


Figura 2-3 – Ciclo de Intermitência

Na Figura 2-3 temos em “a” o período de alimentação. Neste período, tanto a válvula de gás lift (acionada por pressão) quanto à válvula motora (acionada pelo CLP) estão fechadas e o fluido que vem do reservatório se acumula na coluna de produção.

Em “b” tanto a válvula motora quanto a válvula de gás lift se encontram abertas. O gás é injetado primeiramente no anular (revestimento) do poço até atingir a pressão de abertura da válvula operadora que abre em seguida, injetando gás na coluna de produção e fazendo a coluna se deslocar até a superfície. Neste período, a válvula de retenção que se encontra instalada abaixo da coluna de produção fica fechada devido à alta pressão que o gás exerce quando é injetado na coluna de produção (não há acumulação durante o período de injeção). Esta válvula evita que esta pressão atue contra o reservatório.

No período de redução de pressão representado pela letra “c” a válvula motora já está fechada, cessando a injeção de gás no anular do poço. A válvula de gás lift fecha devido à redução de pressão no anular do poço, o mesmo acontecendo com a válvula instalada no “pé” da coluna de produção. Em “d” o ciclo se reinicia com o período de alimentação.

2.2.3 CURVAS DE PRESSÃO DO GLI

O comportamento da pressão em diversos pontos do poço é, com frequência, monitorado. A seguir analisaremos três pontos de medida da pressão vistos na Figura 2-4.

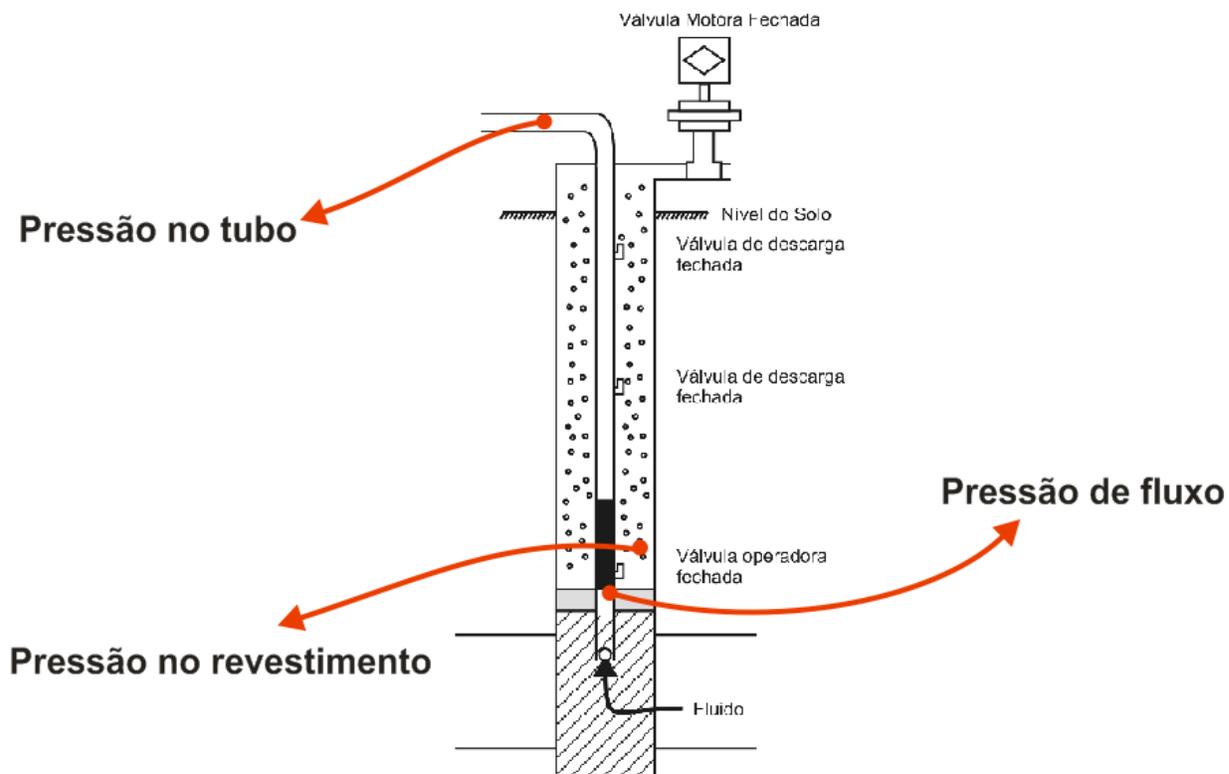


Figura 2-4 – Pontos de medida de pressão

2.2.3.1 Pressão de fluxo no fundo do poço

Se colocarmos um sensor de pressão no fundo do poço, abaixo da coluna de produção, poderemos medir o que é conhecido como pressão de fluxo (P_f) do poço. O comportamento da pressão de fluxo varia em função dos períodos do ciclo do GLI. Podemos ver na Figura 2-5 o comportamento cíclico da pressão de fluxo no fundo do poço. Até o ponto “A” estamos no período de alimentação ou acumulação. A partir do ponto “A” a válvula operadora abre,

injetando gás na coluna de produção. Devido à inércia da coluna haverá um aumento na pressão que atingirá seu ponto de máximo em “B” até que o deslocamento da golfada produz o efeito de redução da pressão até o ponto “D”. No ponto “C” registramos a pressão de fechamento da válvula de gás lift. O tempo de injeção (TI) corresponde ao intervalo entre T1 e T2. É importante ressaltar que o período de injeção não cessa com o fechamento da válvula motora que é acionada por tempo determinado pelo CLP (comando elétrico), mas sim com o fechamento da válvula operadora quando a redução da pressão permite atingir o ponto de fechamento desta válvula. A partir do ponto “D” o ciclo se repete. O tempo de ciclo (TC) corresponde ao intervalo entre T1 e T3.

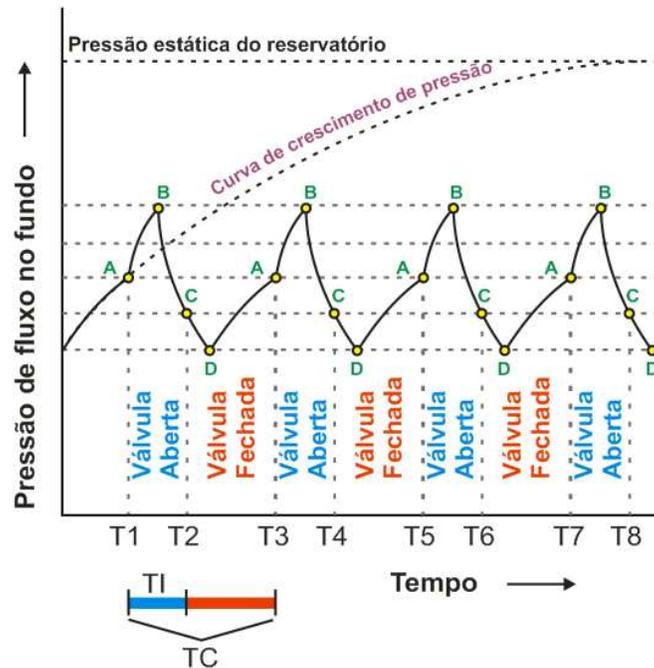


Figura 2-5 – Pressão de fundo do GLI

2.2.3.2 Pressão no revestimento e no tubo (PR e PT)

O comportamento da pressão no revestimento e no tubo (medida de pressão feita na cabeça do poço) é representado na Figura 2-6. O ponto “A” do gráfico que corresponde à pressão no revestimento (PR) no momento em que a válvula motora abre, injetando gás no revestimento e aumentando sua pressão. O ponto “B”, ainda no gráfico de PR, indica que a

válvula operadora (também conhecida como válvula de gás lift) abre e começa a injetar gás no interior da coluna de produção. Aqui temos o tempo de injeção de gás no revestimento “ T_i ” que será menor do que o tempo T_I visto na Figura 2-5. O primeiro corresponde ao tempo em que a válvula motora injeta gás no revestimento enquanto o segundo corresponde ao tempo em que o gás é injetado na coluna de produção. O tempo “ T_i ” é controlável, preciso e conhecido enquanto que o tempo “ T_I ” (Figura 2-5) depende do comportamento da pressão tanto no tubo de produção ou acumulação quanto no revestimento.

Ainda com respeito à Figura 2-6 temos um esboço do comportamento da pressão na cabeça do poço (PT). O aumento da pressão acontece com um deslocamento no tempo em relação à pressão no revestimento devido ao tempo que a golfada leva para atingir a superfície. Vemos que a pressão aumenta durante a chegada e reduz na medida em que a golfada deixa o sensor de pressão.

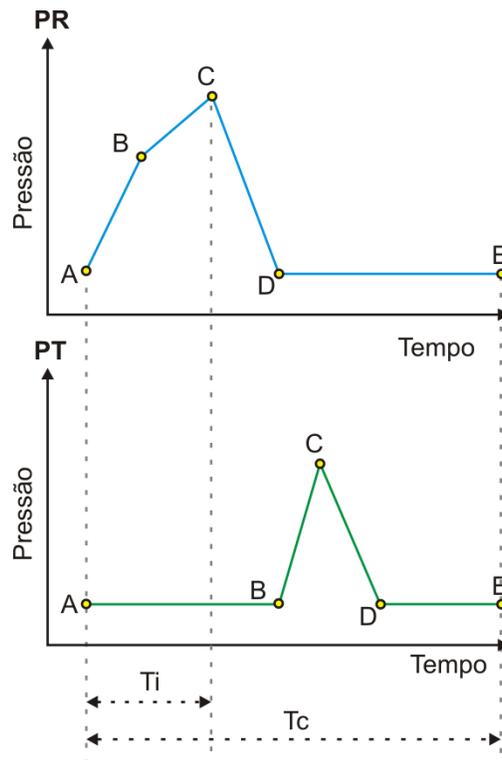


Figura 2-6 – Pressão no revestimento e pressão no tubo com o tempo

2.2.4 PRODUTIVIDADE DO POÇO

A produção do poço está relacionada com o índice de produção IP que pode ser calculado segundo a Equação 2-1.

$$2-1 \quad IP = \frac{Q}{P_e - P_f} \quad \text{Onde} \quad P_f = \rho g H + P_s$$

O índice de produção é diretamente proporcional a vazão “Q” e inversamente proporcional a diferença entre a pressão estática “Pe” que é uma resultante da pressão exercida pelo reservatório e a pressão de fluxo Pf que corresponde a pressão exercida pelo peso da coluna de óleo “H” acumulada além da pressão do separador (Ps). No capítulo 3 usaremos este modelo de produção para deduzir em função de parâmetros de operação do poço a produção bruta do poço em m³/dia.

2.3 Sistema de automação de poços GLI

Nos itens anteriores exploramos como é a dinâmica de funcionamento de um poço operado com GLI e suas características gerais. O controle de injeção de gás e o sensoriamento de diversas grandezas do poço são feitas através de um sistema de automação que será descrito de forma simplificada neste item.

A arquitetura do sistema de automação dos poços pode ser dividida em três etapas de supervisão como mostra a Figura 2-7. A primeira etapa consiste no controle feito por computadores instalados em um departamento de engenharia onde o usuário altera variáveis do sistema através de uma interface visual (sistema supervisorio). Os sinais de controles são então enviados a uma central de operações (segundo estágio de supervisão) que transmite os sinais por rádio frequência. No terceiro estágio de supervisão estão instaladas antenas receptoras/transmissoras e aparelhos de recepção que se comunicam com CLP's. Para cada poço temos um sistema completo com antena, aparelho receptor e CLP dedicado ao controle deste poço. O CLP pode atuar em diversos atuadores como válvulas e sensores, além de poder armazenar dados e trocar mensagens com a central de operações que normalmente está há alguns quilômetros de distância dos poços.

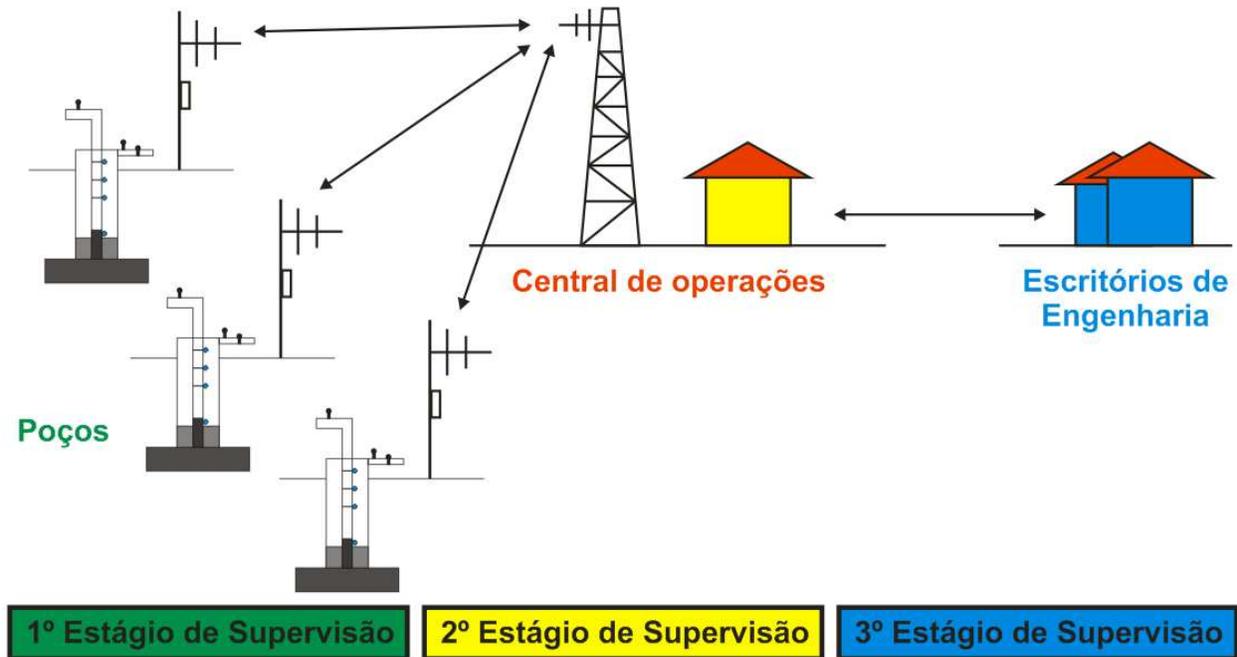


Figura 2-7 - Arquitetura do sistema de supervisão

2.4 Envelhecimento dos poços

Com o passar dos meses ou anos verifica-se um envelhecimento dos poços refletido diretamente na qualidade e quantidade do óleo produzido. O óleo produzido por um poço carrega em sua composição impurezas. Uma especificação técnica para as impurezas encontradas no óleo produzido é o BS&W (Basic Sediment and Water) ou simplesmente BSW. O valor do BSW varia de 0% (100% de óleo ou sem impurezas) até 99% (1% da produção é de óleo e 99% de impurezas).

Com o envelhecimento do poço seu BSW aumenta e o índice de produtividade (IP) diminui com a redução da pressão do reservatório. Há também intervenções no reservatório com a injeção de água ou CO₂ com o objetivo de aumentar a pressão do reservatório e que também contribuem para a alteração do BSW e do IP do poço.

Estes fatores fazem com que a produção bruta de um poço isolado varia em um período de meses ou anos, exigindo um monitoramento constante do poço.

A medição contínua da produção do poço possibilitará monitorar cada golfada, registrar um histórico da produção com maior precisão e viabilizar estratégias de maximização da produção.

2.5 Métodos de otimização em poços GLI

A otimização em poços de petróleo operados com gás “lift” pode ter foco na produção de óleo, maximizando a produção para um poço ou na minimização do consumo de gás para operar o poço. A aplicação da técnica correta para elevação artificial (GLC ou GLI) do poço deve ser criteriosa a fim de aplicar a técnica mais adequada para um poço específico. Para o GLI existem critérios que podemos utilizar para determinar sua escolha bem como qual tipo de GLI utilizar [3] e [9]. Em alguns casos, dependendo das restrições de operação do parque de produção como a limitação do volume diário de gás disponível para injeção ou a quantidade máxima de poços com injeções simultâneas, podemos utilizar técnicas para selecionar quais poços devem operar ou não [6] ou até minimizar o consumo de gás injetado no poço e garantir, simultaneamente, a melhor produção [4]. Todas essas técnicas prevêm o conhecimento de parâmetros do poço (índice de produção, gradiente de pressão em pontos distintos etc) e, conseqüentemente, a utilização de recursos operacionais e de equipamentos, tornando-se economicamente inviável para a aplicação em um grande número de poços. O uso do sensor de impedância desenvolvido neste trabalho dispensa o conhecimento desses parâmetros, pois estima, em tempo real, a produção de cada golfada de óleo, permitindo assim a otimização através da leitura da produção estimada via o rastreamento do ponto ótimo de produção ou através da função de produção do poço que pode ser determinada por um modelo teórico do poço simples de forma que possa ser implementado no próprio sensor.

Capítulo 3

Modelo Teórico da Curva de Produção

A obtenção da curva de produção de um poço operado com GLI é importante para uma análise qualitativa e quantitativa no processo de otimização da produção. A produção de um poço operado com GLI depende de fatores como o índice de produção, pressão de fluxo, tempo de ciclo dentre outros parâmetros. Neste capítulo usaremos um modelo de primeira ordem que se aproxima do comportamento real do poço e nos dará o subsídios que precisamos para a análise de otimização. O objetivo deste capítulo é propor, de forma analítica, uma curva de produção bruta do poço em função do tempo de ciclo e do tempo de injeção.

3.1 Modelo da produção bruta

A vazão volumétrica Q do poço é função do índice de produtividade IP , da pressão estática P_e e da pressão de fluxo P_f conforme mostra a Eq. 3-1.

$$3-1 \quad Q = IP \cdot (P_e - P_f)$$

A produção do reservatório é acumulada na coluna de produção do poço. A pressão estática é a resultante do reservatório enquanto que a pressão de fluxo (P_f) é resultado do peso da coluna acumulada somada à pressão exercida pela linha a qual o poço está conectado, denominada de pressão do separador (P_s). Portanto, a pressão de fluxo varia conforme a altura da coluna produzida (Eq. 3-2).

$$3-2 \quad P_f(t) = \rho g H(t) + P_s$$

Na Eq. 3-2 “ ρ ” é a densidade da mistura dentro da coluna, g é a aceleração da gravidade e $H(t)$ é a altura da coluna em função do tempo. Podemos relacionar a taxa com que a altura da coluna varia com a vazão produzida pelo reservatório como visto na Eq. 3-3, onde “ A ” corresponde a área transversal da coluna de produção.

$$3-3 \quad Q = A \frac{dH}{dt}$$

Substituindo as Equações 3-2 e 3-3 na Equação 3-1 chegamos a uma equação diferencial de primeira ordem para a variação da altura da coluna produzida conforme visto na Eq. 3-4.

$$3-4 \quad \frac{dH}{dt} = \frac{IP \cdot (P_e - P_s)}{A} - \frac{IP \cdot \rho g}{A} H(t)$$

Trocando as constantes da Eq. 3-4 por “ a ” e “ b ” e manipulando-a de forma mais conveniente temos a Eq. 3-5, onde H_0 corresponde a altura inicial da coluna no tempo $t=0$.

Resolvendo a Eq. 3-5 chegamos a Eq. 3-6 que nos fornece a altura da coluna produzida em função do tempo. Um esboço desta função pode ser visto na Figura 3-1.

$$3-5 \quad -\frac{1}{b} \int_{H_0}^H \frac{1}{a-bH} dH = \int_0^t dt \quad \text{onde} \quad \begin{cases} a = \frac{IP \cdot (P_e - P_s)}{A} \\ b = \frac{IP \cdot \rho g}{A} \end{cases}$$

$$3-6 \quad H(t) = \frac{a}{b} \left[1 - \left(1 - \frac{b}{a} H_0 \right) \cdot \exp(-bt) \right]$$

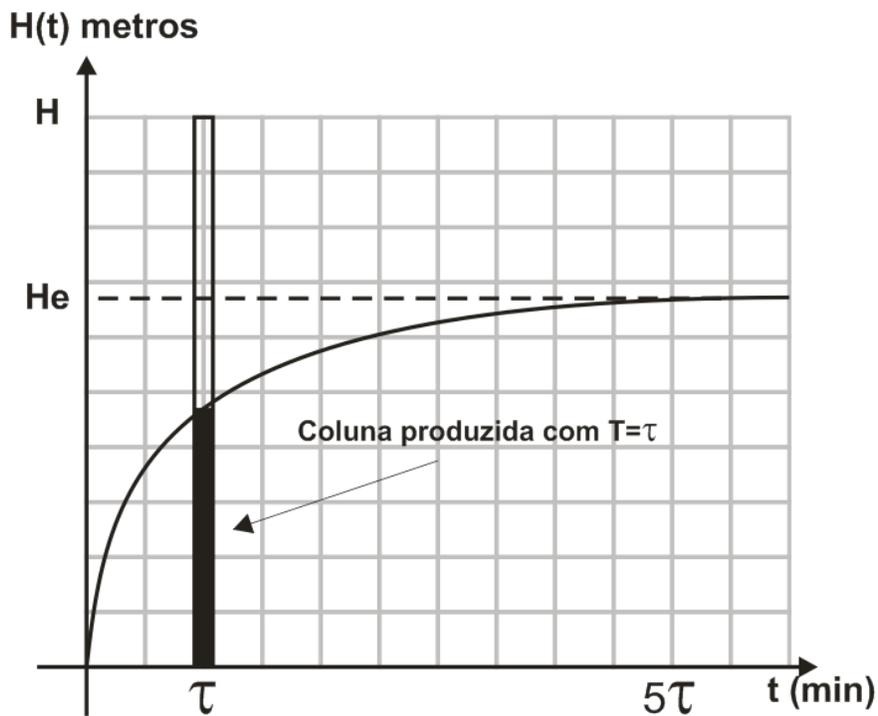


Figura 3-1 - Esboço da função de acumulação na coluna de produção

Na medida em que a coluna produzida cresce em altura, a pressão de fluxo aumenta (veja curva de crescimento de pressão na Figura 2-5) até se igualar à pressão estática. Neste ponto a coluna não aumenta mais, atingindo o que chamamos de altura estática (\$H_e\$). Isto pode

ser visto na Eq. 3-6, ou seja, quando o tempo tender para infinito a função tende a uma constante como visto na Eq. 3-7.

$$3-7 \quad H(\infty) = \frac{a}{b} = H_e$$

Definindo $\tau=1/b$ e $H_e=a/b$ podemos reescrever a função da Eq. 3-6 resultando na Eq. 3-8.

$$3-8 \quad \frac{H(t)}{H_e} = 1 - \left[\left(1 - \frac{H_0}{H_e} \right) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

3.1.1 MODELO TEÓRICO COM “FALL BACK”

Até agora temos a uma expressão geral da função da altura da coluna produzida com o tempo. A coluna produzida inicia-se com uma altura inicial H_0 que chamaremos de coluna de “fall back” ou H_f . O “fall back” é formado devido ao fato de na elevação da coluna produzida uma parte retornar ao fundo do poço. Desta forma, podemos dividir a altura total em duas parcelas (Eq. 3-9), onde L é a coluna ou comprimento da golfada produzida que atinge a superfície e H_f é a coluna de “fall back” e H_{ac} é a coluna acumulada durante o tempo de acumulação (T_{ac}), ou seja, no instante de tempo em que a injeção de gás começa.

$$3-9 \quad H(T_{ac}) = H_{ac} = L + H_f \quad \text{onde} \quad H_0 = H_f$$

O “fall back” pode ser estimado em função de L utilizando-se do modelo de Brown [1] como mostra a Eq.3-10. A coluna de “fall back” (H_f) corresponderá a uma porcentagem da coluna produzida que é definida como 7% para cada mil pés da profundidade da instalação da válvula de injeção do poço (H_v), ou seja, para um poço com a válvula instalada em uma profundidade de 1000 pés (304,8 metros) teremos um “fall back” de 7% da coluna produzida. O

valor de 304,8 da Eq. 3-10 se deve a normalização em mil pés pelo fato da profundidade da instalação da válvula operadora ser expressa em metros.

$$3-10 \quad H_f = \kappa L \quad \text{onde} \quad \kappa = \frac{7}{100} \cdot \frac{H_v}{304,8}$$

3.1.2 TEMPO DE ACUMULAÇÃO NO CICLO DO GLI

O tempo de acumulação é o tempo em que o poço produz a coluna de óleo. A coluna produzida sempre será menor do que a profundidade do poço, pois o reservatório não tem pressão suficiente para produzir uma coluna maior pelo fato de ser um poço maduro e a coluna para de crescer, razão pela qual se utiliza a elevação artificial GLI. Durante o tempo de injeção a pressão aumenta no fundo do poço, fechando a válvula do fundo do poço que tem por finalidade proteger o reservatório, portanto, não teremos produção durante o tempo de injeção de forma que o tempo de acumulação é definido conforme a Eq. 3-11 e ilustrado na Figura 3-2. O tempo total de acumulação corresponde ao tempo de ciclo subtraído do tempo de injeção.

$$3-11 \quad T_{ac} = T_c - T_i$$

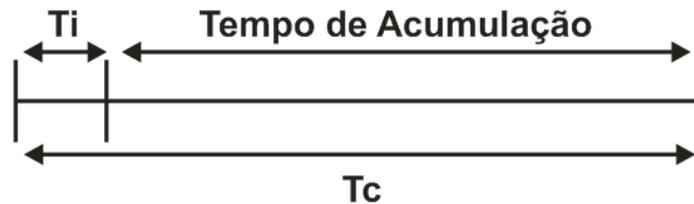


Figura 3-2 - Tempo de acumulação

3.1.3 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DIÁRIA

Nossa variável de interesse é L e substituindo as Equações 3-9 e 3-10 na Eq. 3-8 chegamos a expressão da Eq. 3-12.

$$3-12 \quad \frac{L}{He} = \left(\frac{1}{1 - \exp(-t/\tau)} + \kappa \right)^{-1}$$

Inserindo o tempo de acumulação definido na Eq.3-11, a Eq. 3-12 torna-se agora função dos tempos de ciclo e injeção como mostra a Eq. 3-13.

$$3-13 \quad \frac{L}{He} = \left([1 - \exp(-Tc/\tau) \exp(Ti/\tau)]^{-1} + \kappa \right)^{-1}$$

Se multiplicarmos a Eq.3-13 pela área transversal da coluna teremos o volume produzido em função do tempo de ciclo e tempo de injeção. Na 3-14 V_p é o volume produzido em função do tempo de ciclo e de injeção.

$$3-14 \quad V_p = L \cdot A = \frac{He \cdot A}{\left([1 - \exp(-Tc/\tau) \exp(Ti/\tau)]^{-1} + \kappa \right)}$$

Neste ponto, estamos interessados em saber qual será a produção bruta feita em um dia, ou seja, a vazão produzida em 24 horas. Considerando que os valores de T_c e de T_i são dados em minutos e que a Eq. 3-14 fornece o volume produzido para um dado T_c e T_i , então o volume produzido durante um dia (1440 minutos) é resultado de quantos ciclos serão realizados em 24 horas ou 1440 minutos. Na Eq. 3-15 temos a expressão para a vazão diária em função dos seguintes termos: tempos de ciclo e injeção, altura da coluna estática, constante de tempo τ e da constante κ do modelo de Brown para o “fall back”.

$$3-15 \quad Q_p = \frac{1440}{T_c} \cdot \frac{He \cdot A}{\left[1 - \exp(-Tc/\tau) \cdot \exp(Ti/\tau) \right]^{-1} + \kappa}$$

3.2 Determinação dos parâmetros da curva de produção

Encontramos até agora a expressão da curva de produção em função de alguns parâmetros que iremos determinar nos parágrafos seguintes. Alguns parâmetros são fáceis de serem obtidos como a área transversal da coluna de produção. Os outros parâmetros serão determinados através das definições do modelo teórico assumidas nas linhas anteriores. Usaremos dados de campo para calcular a coluna estática H_e e a constante de tempo τ . Estes dados são atualizados com intervalo de meses entre uma medição e outra e podem não refletir a atual situação do poço, mas fornecerão subsídios importantes na abordagem de otimização.

3.2.1 DETERMINAÇÃO DA ALTURA DA COLUNA ESTÁTICA (H_e)

A altura da coluna estática corresponde à altura de coluna produzida onde a pressão do separador (P_s) somada à pressão de fluxo (P_f) se igualam à pressão estática exercida pelo reservatório no fundo do poço. Na Eq. 3-7 temos a expressão da coluna estática em função das constantes “a” e “b”, definidas na Eq.3-5. Substituindo as constantes “a” e “b” por suas respectivas expressões teremos a expressão para calcular a altura da coluna estática vista na Eq. 3-16.

$$3-16 \quad H_e \equiv \frac{a}{b} = \frac{(P_e - P_s)}{\rho g}$$

3.2.2 DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE TEMPO DA CURVA DE PRODUÇÃO

Na Eq.3-6 temos que a constante de tempo é dada por $\tau=1/b$. Substituindo a constante “b” por sua expressão dada na Eq. 3-5 chegamos a Eq.3-17 que depende do índice de produção IP, da densidade da mistura ρ , da aceleração da gravidade g e da área transversal da coluna de produção A .

$$3-17 \quad \tau \equiv \frac{1}{b} = \frac{A}{IP \cdot \rho g}$$

3.2.3 DADOS EXPERIMENTAIS COM POÇOS REAIS

Temos na Tabela 3-1 valores coletados e valores calculados para trinta poços operados com GLI.

Tabela 3-1 - Dados experimentais de poços reais

Poço	He (m)	Qp (m ³ /dia)	Tc (min)	Ti (min)	Dados computados				
					κ	τ (min)	Tc* (min)	Qp* (m ³ /dia)	Aum. Prod.
Média	350	16	35	1	0,284	166	18	20	20%
Desv. Padrão	306	16	31	0,58	0,081	213	13	20	40%
1	160	9,0	35	1,00	0,23	53	11	10,5	17%
2	340	8,1	150	1,00	0,23	62	11	19,2	137%
3	168	27,7	5	1,17	0,21	17	7	28,4	3%
4	551	48,6	8	1,00	0,26	37	9	48,6	0%
5	127	8,1	45	1,17	0,21	37	10	11,3	40%
6	265	43,4	12	1,17	0,29	16	7	46,6	7%
7	262	3,5	50	1,00	0,26	282	23	3,6	3%
8	87	1,6	80	1,00	0,23	188	20	1,8	13%
9	170	22,4	30	1,00	0,22	8	5	57,1	154%
10	477	22,5	25	1,17	0,22	70	12	23,7	5%
11	246	59,5	10	2,00	0,23	9	7	62,2	5%
12	1575	6,8	60	3,33	0,54	875	61	6,8	0%
13	321	29,0	5	1,00	0,32	35	9	30,2	4%
14	127	33,2	12	1,00	0,25	8	5	42,9	29%
15	198	6,6	20	1,67	0,32	106	19	6,6	0%
16	134	4,2	40	1,00	0,47	109	15	4,5	7%
17	391	2,0	20	1,67	0,44	746	47	2,1	3%
18	784	32,6	10	2,00	0,24	76	17	33,8	4%
19	774	13,5	20	2,83	0,29	196	31	13,7	2%
20	435	21,5	30	1,33	0,22	63	13	23,4	9%
21	187	1,7	40	1,33	0,28	422	33	1,7	0%
22	401	12,8	20	2,33	0,29	106	22	12,8	0%
23	263	33,0	30	1,33	0,28	10	6	67,9	106%
24	120	2,6	40	1,50	0,39	168	23	2,6	2%
25	191	4,3	50	1,83	0,26	153	24	4,5	5%
26	104	14,8	15	1,50	0,30	19	8	15,9	8%
27	724	6,0	20	1,33	0,35	460	31	6,1	1%
28	469	5,9	20	1,33	0,22	300	27	5,9	0%
29	408	6,0	40	1,00	0,21	255	22	6,1	2%
30	55	1,4	100	1,00	0,27	101	15	2,0	39%

Os dados coletados experimentalmente são Qp (medição manual da produção), Tc (tempo de ciclo praticado) e Ti (tempo de injeção praticado). Os dados computados são: κ (parâmetro para “fall back”) τ (constante de tempo do poço), Tc* (tempo de ciclo ótimo) e Qc*

(ponto de produção ótimo). Na última coluna temos o aumento em porcentagem em relação à produção atual e a produção para o ponto ótimo de operação.

Os valores de H_e foram calculados conforme a Eq. 3-16, mas a constante de tempo τ depende do parâmetro IP que não tínhamos disponível na planilha de dados. No entanto, pudemos calcular o valor da constante de tempo usando a Eq.3-15 e os dados disponíveis na Tabela 3-1, ou seja, substituindo-se os valores conhecidos para um determinado poço na Eq.3-15 a única incógnita é o valor da constante de tempo e resolvendo a equação para τ uma vez conhecidos os valores de Q_p , T_c , T_i , κ , H_e e A chegaremos ao seu valor numérico. A solução foi encontrada numericamente através do Matlab, implementando-se um algoritmo de cálculo numérico para a Eq. 3-15.

É interessante ter uma visão geral da curva de produção e faremos isto em uma dimensão, somente com T_c como variável independente. O valor do T_i foi usado com o valor fixo. Isto não altera significativamente os resultados, pois o tempo de injeção tem que ser suficiente para injetar gás para elevar a coluna até a superfície, mas não contribui significativamente para a produção.

3.3 Curva de produção de um poço real

Para uma análise qualitativa podemos plotar a função de produção do poço substituindo os dados da Tabela 3-1 de um poço específico na função de produção bruta (Eq.3-15) a fim de ter uma visão geral de como é a curva de produção deste poço e analisar seu ponto de produção atual. Para isso escolhemos o poço de número 11 que opera com T_c de 10 minutos e T_i de 2 minutos.

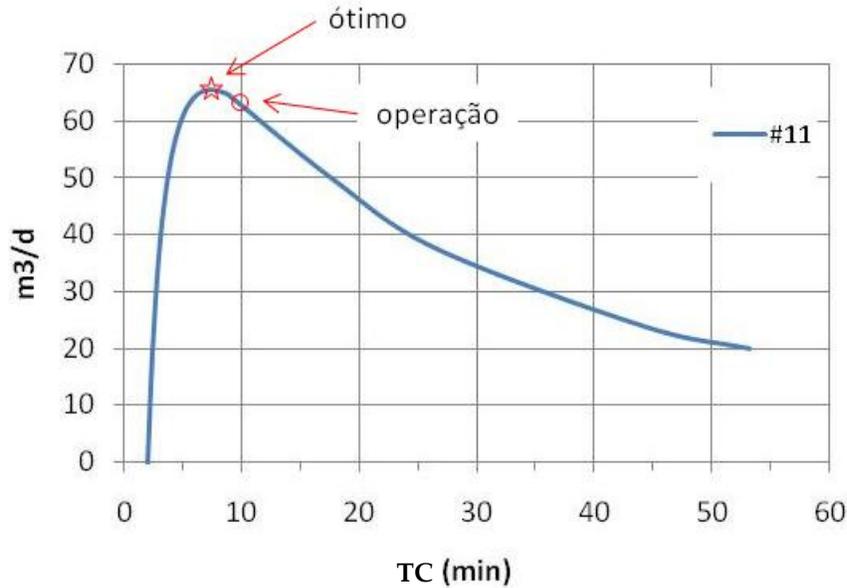


Figura 3-3 - Curva de produção do poço de número 11

Na Figura 3-3 temos a curva de produção do poço 11. O ponto de operação atual do poço é marcado no gráfico com um círculo enquanto o ponto de máxima produção é indicado com a figura de uma estrela. Pela Tabela 3-1 vemos que se o poço operasse com Tc de 7 minutos sua produção aumentaria em 5% que é um aumento considerável na produção.

Um ponto interessante a ser notado na curva da Figura 3-3 é que a curva é suave para pequenas variações em torno do ponto de máxima produção, ou seja, pequenas variações no Tc em torno do ponto de ótimo não alteram significativamente a produção. Isto pode ser vantajoso ao trabalharmos com a otimização simultânea de poços, pois atrasos e ou adiantamentos na injeção podem ser necessários a fim de se evitar que muitos poços recebam simultaneamente injeção devido à capacidade de injeção da linha de gás.

3.4 Impacto na produção operando no ponto ótimo

Os trinta poços analisados oferecem uma visão otimista na construção de um cenário de otimização dos poços. Comparando se a produção atual com a otimizada (com base nos cálculos feitos para cada poço) o aumento médio na produção ao operar no ponto ótimo aumenta em 20%.

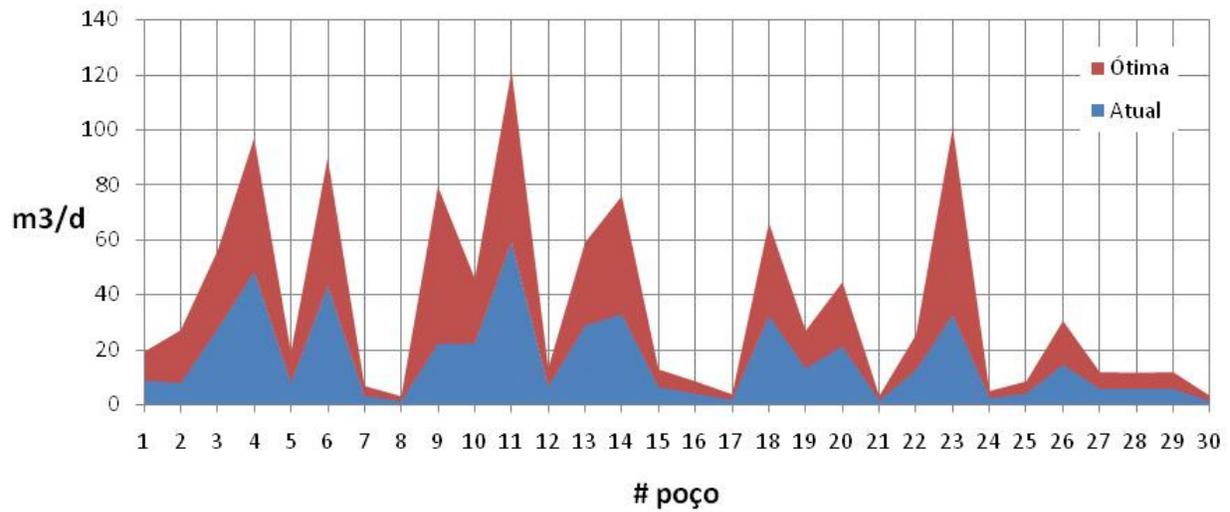


Figura 3-4 - Comparação entre a produção ótima e atual

No gráfico da Figura 3-4 temos em azul a produção atual dos poços e em vermelho podemos ver os valores da produção ao operar no ponto ótimo. Este gráfico nos permite ter uma visão ampla e mais compreensiva no aumento da produção e reforça ainda mais o quanto vantajosa pode ser a otimização da produção.

Capítulo 4

Estimativa da Produção Bruta de Petróleo em Tempo Real

Uma das dificuldades na otimização da produção de um poço é obter dados atualizados da produção. Atualmente, o método utilizado para medir a produção de um poço operado com GLI requer que sua produção seja desviada para um tanque que coletará a produção por um ou mais dias, o que impossibilita que em uma área com centenas de poços a produção de um poço seja medida diariamente. Portanto, os dados de produção podem estar desatualizados o que dificulta a validação do processo de otimização.

Apresentaremos neste capítulo um modelo para estimar a produção bruta de um poço de petróleo terrestre baseando-se na detecção da passagem da golfada de petróleo na “cabeça” do poço através de um sensor de impedância. O sensor de impedância é capaz de detectar o início e o fim de uma golfada além de outras funcionalidades. O Capítulo 6 abordará o sensor de impedância que foi desenvolvido juntamente com este trabalho de otimização. O objetivo é ter, para cada ciclo do GLI, uma estimativa da produção do poço. Desta forma, podemos não somente validar a otimização como também monitorar a produção do poço, permitindo-se

assim corrigir alterações que resultem no desvio do ponto de operação desejado e que são provenientes de diversos parâmetros que governam o funcionamento do poço. Outra vantagem é que esta estimativa de produção dispensa a necessidade de medir diretamente estes parâmetros, tais como IP, “fall back”, P_s , P_f etc.

4.1 Modelo para cálculo de produção estimada por golfada

4.1.1 PARÂMETROS E VARIÁVEIS DO MODELO

Na Figura 4-1 temos a representação simplificada do poço com a coluna de óleo produzida representada por H_{ac} e com profundidade de instalação da válvula de gás lift representada por H_v . A distância D_h corresponde à distância entre a “cabeça” do poço e a instalação do sensor de impedância. É importante salientar que o valor de D_h é muito menor do que $H_v - H_{ac}$, ou seja, a distância em que o sensor é instalado da “cabeça” do poço é muito pequena comparada com a profundidade de instalação da válvula de gás lift.

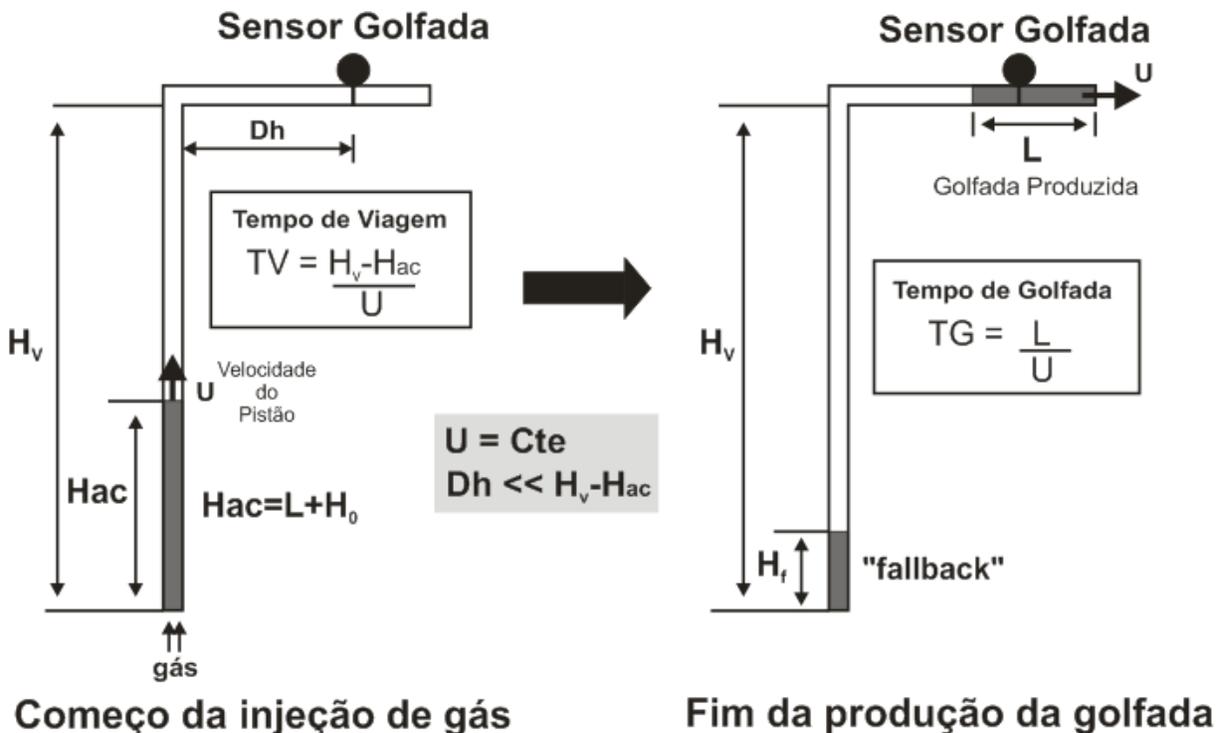


Figura 4-1 - Representação da produção de uma golfada

A coluna produzida Hac receberá uma injeção de gás, sendo elevada com velocidade U assumida constante. Do total produzido uma parte alcança a superfície (L) e outra parte volta para o fundo do poço (H_i) recebe o nome de “fall back”.

O tempo em que a frente da golfada leva para atingir a superfície, ou seja, para percorrer a distância ($H_v - H_{ac} + D_h$) será definido como tempo de viagem ou simplesmente TV. Outro tempo importante é o tempo em que a golfada fica em contato com o sensor e definiremos esse tempo de tempo de golfada ou TG.

4.1.1.1 Física de elevação da golfada

Quando o gás é injetado na coluna de produção o gás desloca a coluna de líquido partindo do estado estacionário, acelerando a coluna até atingir uma velocidade terminal e constante. Ensaios com pressões equivalentes às pressões reais mostraram que a duração de aceleração dura alguns segundos. Na Tabela 4-1 temos alguns ensaios para diferentes colunas de óleo e na Figura 4-2 vemos a curva de velocidade para cada caso.

Tabela 4-1 – Ensaios de elevação de golfada com diferentes colunas de óleo

Altura da coluna (m)	Pressão do revestimento (kPa)	Tempo de injeção (s)
50	7000	250
100	7000	250
200	7000	250
250	7000	250

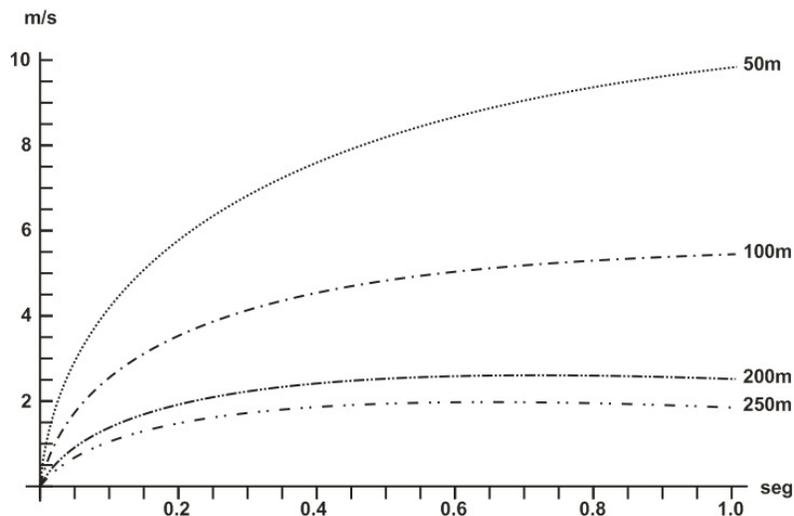


Figura 4-2 - Tempo de aceleração da golfada

Nota-se que a velocidade terminal é atingida em menos de um segundo para a maioria das colunas e quanto maior a coluna mais rápida a velocidade terminal é atingida. Quando a velocidade terminal é atingida a expansão do gás cessa e todo gás injetado fica a pressão constante uma vez que o volume deslocado pela frente da golfada é igual ao volume injetado. Nesta fase a diferença de pressão entre o fundo da coluna e o topo da coluna se iguala com a força peso e a força de atrito da coluna. A expressão da velocidade terminal pode ser vista na Eq. 4-1 onde R é constante universal dos gases e T_0 é a temperatura inicial.

$$4-1 \quad V_{\text{term}} = \frac{RT_0 \sqrt{P_R - P_0}}{\rho g H_0 A} \quad \text{onde} \quad \begin{cases} H_0 & \text{Altura inicial da coluna} \\ \rho g H_0 A & \text{Peso inicial da coluna} \\ P_0 = \rho g H_0 + P_s \end{cases}$$

4.1.2 CÁLCULO DA ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO BRUTA EM TEMPO REAL

O modelo que utilizaremos para estimar a produção de uma golfada considera, por simplificação, que a velocidade de ascensão da golfada é constante uma vez que a velocidade terminal de ascensão da golfada é atingida rapidamente em relação ao seu tempo de subida sem com isso perder precisão significativa na qualidade do modelo e tendo um ganho substancial na simplicidade do modelo. O tempo de viagem pode ser calculado através da Eq. 4-2 e o tempo de golfada através da Eq. 4-3.

$$4-2 \quad TV = \frac{H_v - H_{ac}}{U}$$

$$4-3 \quad TG = \frac{L}{U}$$

O sensor de impedância detecta somente os tempos de viagem e golfada e desta forma podemos isolar U das Equações 4-2 e 4-3 de forma a eliminar a variável U e relacionar TV com TG como mostra a Eq. 4-4.

$$4-4 \quad \frac{TG}{TV} = \frac{L}{Hv - Hac}$$

Manipulando a Eq. 4-4 podemos chegar na Eq. 4-5 que expressa uma função para o comprimento da coluna produzida que atinge a superfície (L) em função de parâmetros conhecidos. Note que a Eq. 4-5 ainda não está com formato conveniente, pois temos L também do lado direito da equação. A razão de Hac/L nos faz pensar em uma relação entre coluna produzida Hac e coluna elevada L e seria conveniente termos uma expressão que relacionasse H_f/Hv que é a razão percentual do “fall back”, cujo modelo de Brown [1] é usado para estimar seu valor como utilizado no Capítulo 3. Substituindo Hac da Eq.4-5 por H_f+L chegamos à Eq. 4-6 onde o comprimento da golfada (L) está isolado do lado esquerdo da equação.

$$4-5 \quad L = Hv \cdot \frac{TG}{TV + \frac{Hac}{L} \cdot TG}$$

$$4-6 \quad L = Hv \cdot \frac{TG}{TG + TV} \left(1 - \frac{H_f}{Hv} \right)$$

O volume produzido pode ser obtido multiplicando-se a Eq. 4-6 pela área transversal do tubo “A” resultando na Eq. 4-7 onde V_L corresponde ao volume produzido que atinge a superfície e V_{Hv} é o volume total da coluna do poço ($Hv \times A$).

$$4-7 \quad V_L = V_{Hv} \cdot \frac{TG}{TG + TV} \cdot \left(1 - \frac{H_f}{Hv} \right)$$

Usando o modelo de Brown temos para cada mil pés um “fall back” que corresponde a 7% do volume produzido que atinge a superfície (veja Eq. 4-8). Dividindo-se a Eq. 4-8 pela área “A” do tubo e pela profundidade Hv temos a Eq. 4-9.

$$4-8 \quad V_f = \frac{7}{100} \cdot V_L \cdot \frac{H_v}{304,8}$$

$$4-9 \quad \frac{H_f}{H_v} = \frac{7}{100} \cdot \frac{L}{304,8}$$

Substituindo o termo H_f/H_v da Eq. 4-7 pelo termo equivalente da Eq. 4-9 e após alguma manipulação chegamos à Eq. 4-10. O volume produzido que atinge a superfície do poço fica em função dos parâmetros conhecidos H_v e “A” que são fixos e dos parâmetros TV e TG que são medidos pelo sensor de impedância. Por final, temos que a produção deve estar em m^3/dia . Como o volume produzido por uma golfada é dado pela Eq. 4-10 devemos calcular quantas golfadas ocorrem durante um dia e teremos a produção em m^3/dia . Para calcular o número de golfadas por dia usaremos o tempo de ciclo do poço TC. Como um dia em minutos tem 1440 minutos então o número de golfadas será $1440/TC$ e finalmente temos a expressão da produção diária bruta dada pela Eq. 4-11.

$$4-10 \quad V_L = V_{Hv} \cdot \frac{\left(\frac{TG}{TG + TV} \right)}{\left(1 + \left(\frac{TG}{TG + TV} \right) \cdot \left(\frac{7}{100} \right) \cdot \left(\frac{H_v}{304,8} \right) \right)}$$

$$4-11 \quad Q_p = V_{Hv} \cdot \frac{\left(\frac{TG}{TG + TV} \right)}{\left(1 + \left(\frac{TG}{TG + TV} \right) \cdot \left(\frac{7}{100} \right) \cdot \left(\frac{H_v}{304,8} \right) \right)} \cdot \frac{1440}{TC} m^3 / dia$$

4.1.3 TESTE DE CAMPO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE CÁLCULO DA PRODUÇÃO ESTIMADO

4.1.3.1 Instalação do sensor de impedância e sinais

O modelo para estimativa de produção em tempo real foi testado em um poço terrestre no recôncavo baiano operado com GLI. O poço escolhido tem profundidade de 836 metros e o sensor foi instalado a 21,75 metros de distância da “cabeça” do poço. Na Figura 4-3 temos uma foto da instalação do sensor de impedância no poço terrestre. Foram instalados dois sensores de golfada, sendo um em posição horizontal e outro em posição vertical em relação à linha de produção.

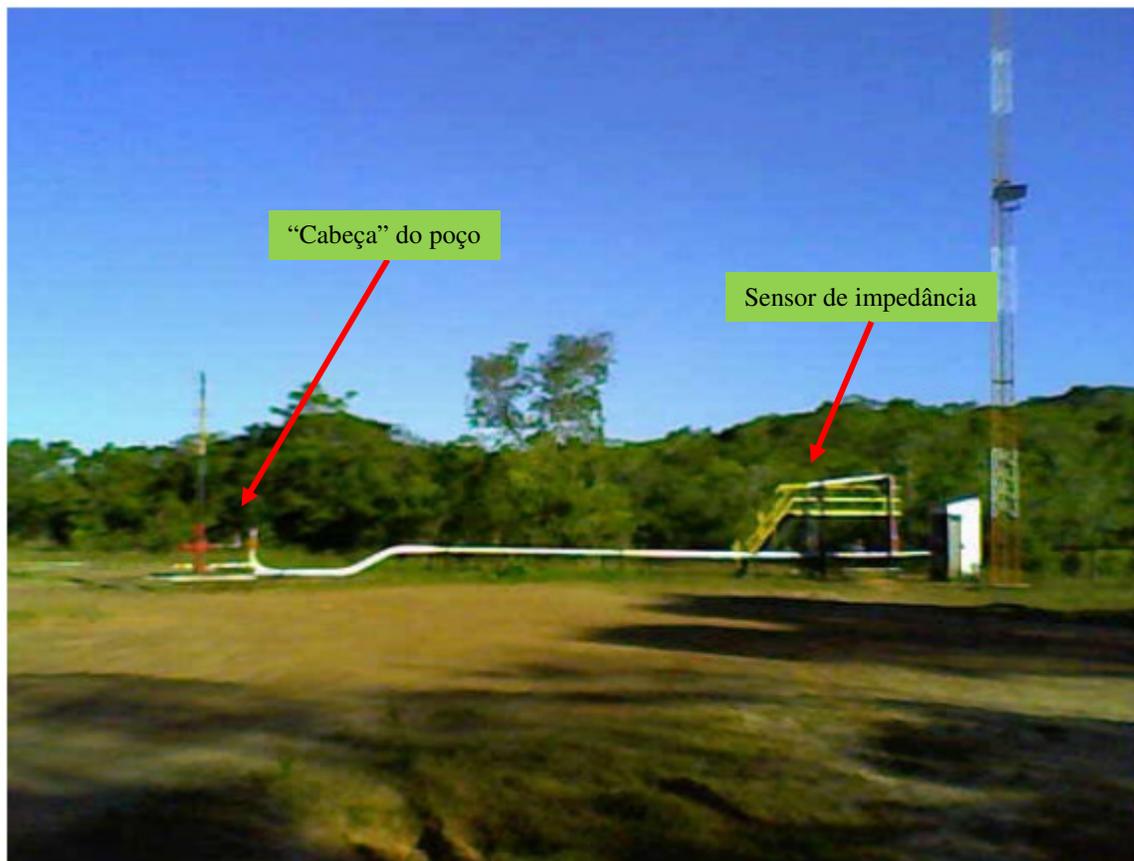


Figura 4-3 – Foto do poço e instalação do sensor de impedância para teste de campo

A instalação do sensor requer uma linha de “bypass” para permitir que a produção seja desviada para medição via sensor ou seguir diretamente sem interferência. Os dados do sensor

são coletados por um CLP e transmitidos via RF (rádio frequência) para uma estação coletora de dados. O CLP coleta não somente os dados do sensor de impedância, mas também de sensores de pressão do poço. A Figura 4-4 traz um esboço do sinal do sensor de pressão instalado no revestimento do poço e do sensor de impedância similar àquele exposto na Figura 2-6. Através da curva de pressão no revestimento podemos acompanhar o processo de elevação e determinar os tempos de viagem e de golfada. O tempo de viagem ocorre entre os instantes (b) e (d), enquanto que o tempo de golfada é obtido entre os instantes (d) e (e).

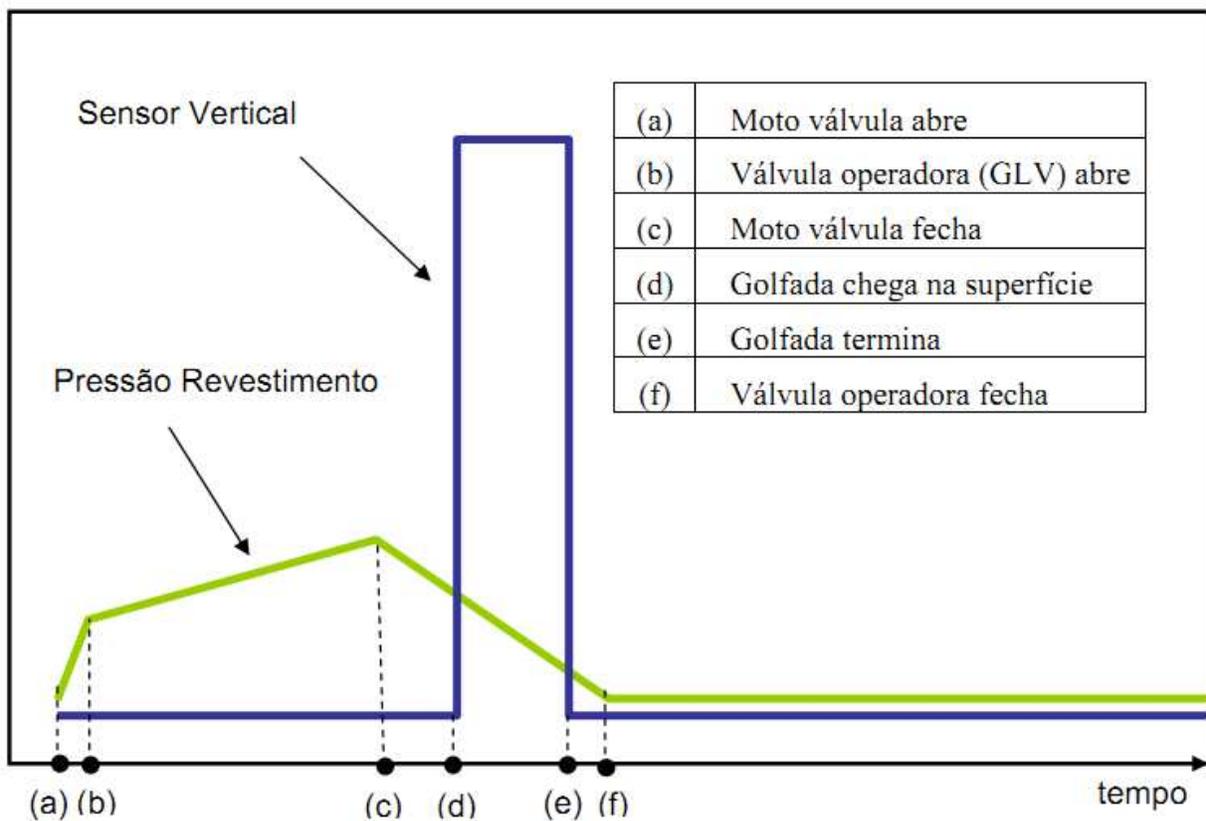


Figura 4-4 - Representação do sinal de pressão do revestimento do poço e do sensor de impedância

Na Figura 4-5 temos o sinal coletado dos sensores de golfada vertical e horizontal (azul e vermelho respectivamente) e dos sensores de pressão no tubo e revestimento (amarelo e verde respectivamente). Através destes sinais é possível detectar o tempo de viagem (TV) e o tempo de golfada (TG). Na prática, a golfada não é composta somente de líquido, mas também do gás

utilizado no processo de elevação artificial. Podemos ver, através do sinal coletado, que o início da golfada é composto com maior parcela de líquido enquanto que seu final possui maior proporção de gás (conhecido como rabo de gás). Ainda na Figura 4-5 temos as curvas de pressão no revestimento e no tubo. A Figura 4-6 mostra os sinais coletados pelo CLP dos sensores de golfada e sensores de pressão onde podemos ver vários ciclos com suas respectivas golfadas.

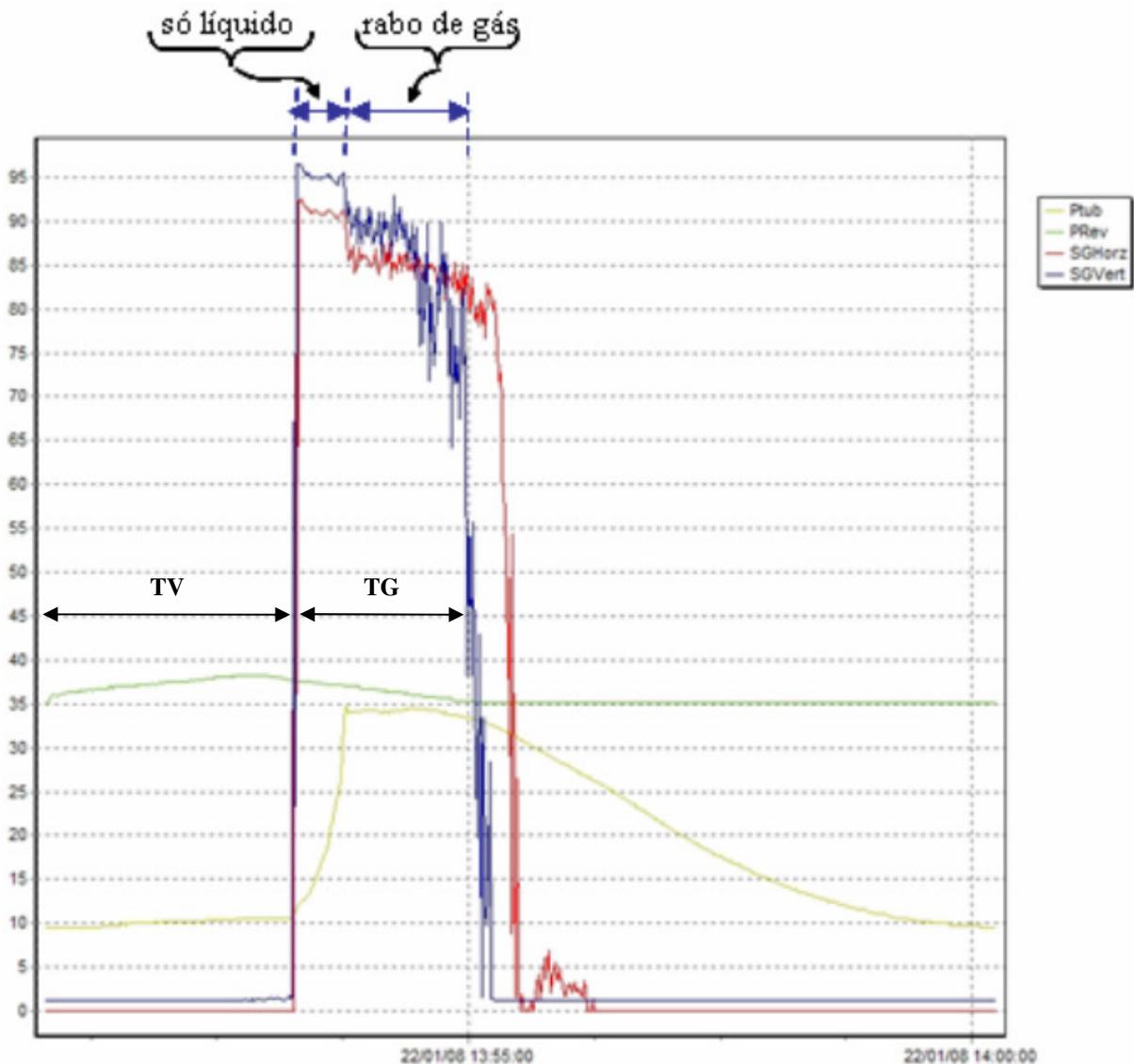


Figura 4-5 - Sinais dos sensores de golfada vertical e horizontal e de pressão no tubo e no revestimento

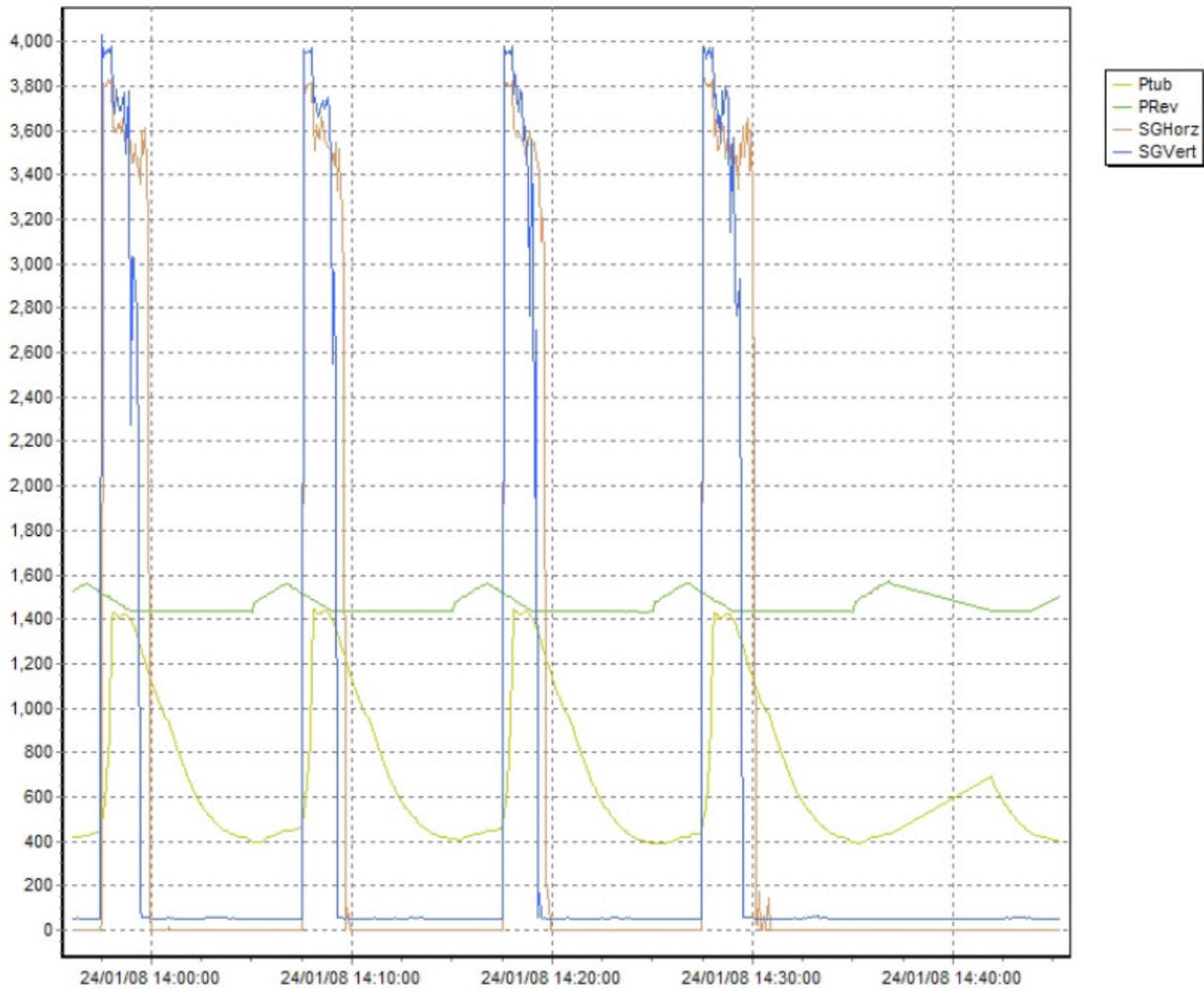


Figura 4-6 - Sinais coletados dos sensores de golfada e pressão para vários ciclos

4.1.3.2 Considerações sobre o teste de campo

O objetivo do teste de campo é validar a utilização do sensor de impedância e do modelo para estimar a produção em tempo real. Foram feitos vários testes alterando-se parâmetros de tempo de ciclo e tempo de injeção e medindo-se a produção através de um reservatório destinado para coletar a produção do poço em teste.

Entre o poço e o reservatório de medida temos uma linha de 1337 metros com uma elevação de cota de 53 metros e isto interferiu significativamente nos testes. A linha acaba armazenando parte da produção e desta forma não temos uma correspondência direta entre a golfada atual e o que entra no reservatório. Uma forma de contornar este inconveniente foi deixar o poço com determinado TC e TI “ciclado” tempo suficiente para termos algo próximo do regime permanente e trabalhar com as médias das leituras feitas do volume coletado.

4.1.3.3 Análise de resultados do teste de campo

Por questões práticas, utilizamos um poço com tempo de ciclo de alguns minutos, sendo que o tempo de ciclo mínimo foi de 8 minutos e o máximo de 16 minutos.

O teste realizado em campo consistiu em variar TC e comparar o volume medido manualmente com o volume estimado pela Eq.4-10. A Tabela 4-2 mostra os dados dos testes realizados. Cada teste representa uma média de 10 pontos para o mesmo TC. Isto minimiza os erros de medida. A Figura 4-7 compara em um gráfico o volume medido e o volume estimado em função da razão $TG/(TG+TV)$. Note que as inclinações das retas de tendência são bem próximas e o valor estimado está sempre acima do valor medido por não levar em conta o acúmulo da produção na linha que percorre uma distância de 1337 metros entre o poço e o medidor com diferença de cota de 53 metros e o “rabo de gás” presente na golfada que pode variar de golfada para golfada.

Tabela 4-2 – Dados dos testes realizados em campo na UOBA

Teste	TC (min)	TV(seg)	TG(seg)	TG/(TG+TV)	Volume Medido (Litros)	Volume Estimado (Litros)	Velocidade da Golfada (m/s)
1	8	138	78	0,36	588	880	4,7
2	10	143	92	0,39	731	949	4,2
3	10	145	91	0,39	655	936	4,3
4	10	143	95	0,40	713	966	4,2
5	12	150	96	0,39	813	946	3,8
6	14	152	125	0,45	925	1082	3,5
7	16	159	132	0,45	958	1087	3,3

$$H (m)= 836 \quad A (m^2)= 0,0031170$$

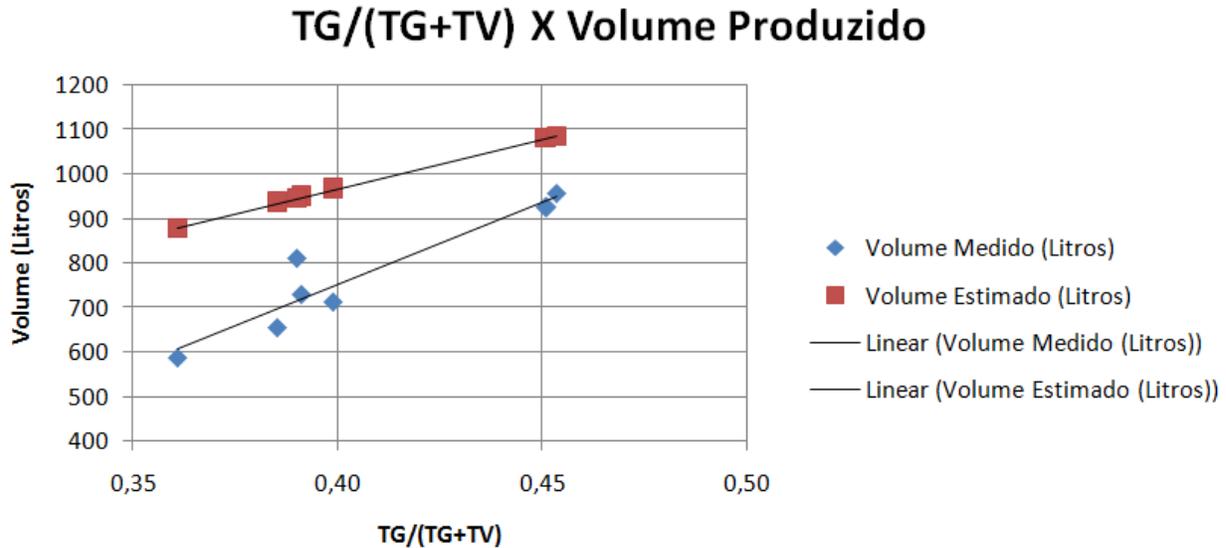


Figura 4-7 – Volume Estimado x Volume Medido

4.1.4 CONCLUSÕES SOBRE O MODELO DE ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO

A aplicação do modelo de estimativa de produção em um poço real operado com GLI nos permitiu validar o modelo e dar um passo a frente na utilização deste modelo na otimização de poços operados com GLI. Através deste modelo e do sensor de impedância podemos monitorar a produção do poço em tempo real, permitindo sentir o impacto na produção ao alterar parâmetros que alteram a produção do poço. É importante notar que para determinar o ponto ótimo de operação não é necessário medir com precisão a produção, mas sim ter sensibilidade em suas variações quando alteramos o tempo de ciclo. O ponto ótimo de operação do poço pode ser encontrado se conhecermos a curva de produção atualizada do poço como discutido no Capítulo 3, mas isso na prática é muito pouco provável, pois as medidas dos parâmetros necessários para levantar a curva de produção são atualizados em períodos longos de tempo e como estes parâmetros podem alterar significativamente com o tempo, esta prática se torna inviável. Mas, se ao invés da curva analítica pudermos estimar a produção do poço em tempo real, conforme descrito neste Capítulo, poderemos não somente encontrar o ponto ótimo de operação como também detectar e corrigir este ponto, caso o poço sofra alterações em seus parâmetros e sua produção sofra alterações significativas.

Capítulo 5

Otimização e Monitoramento da Produção de um Poço Isolado

A otimização de um poço isolado tem como função objetivo a curva de produção onde desejamos encontrar o ponto de maior produção. No Capítulo 3 apresentamos um modelo teórico da produção de um poço operado com GLI e levantamos sua curva teórica de produção analiticamente. Ainda que este modelo seja simplificado, ele nos fornece informações qualitativas de como deve ser o ponto de máximo desta curva de produção e qual a sensibilidade da variável TC (tempo de ciclo) na função de produção. Na Figura 5-1 temos a curva de produção já apresentada no Capítulo 3. O ponto de máximo é indicado com uma estrela e sua derivada em função do TC deve ser igual a zero, pois este é um ponto de estacionaridade da função como indicado na Figura 5-1.

Como já discutimos anteriormente, a abordagem analítica na otimização do poço se mostra inviável devido à dificuldade em se obter dados atualizados e confiáveis dos parâmetros do poço. Mas, se pudermos medir ou estimar a produção como apresentamos no Capítulo 4, poderemos encontrar de forma aproximada o ponto de máxima produção. A questão agora é determinar de qual forma alteramos a variável de decisão (TC) e como detectamos o ponto de

máxima produção utilizando-se do modelo de cálculo da produção estimada apresentado no Capítulo 4 juntamente com o sensor de impedância que viabiliza a utilização do modelo.

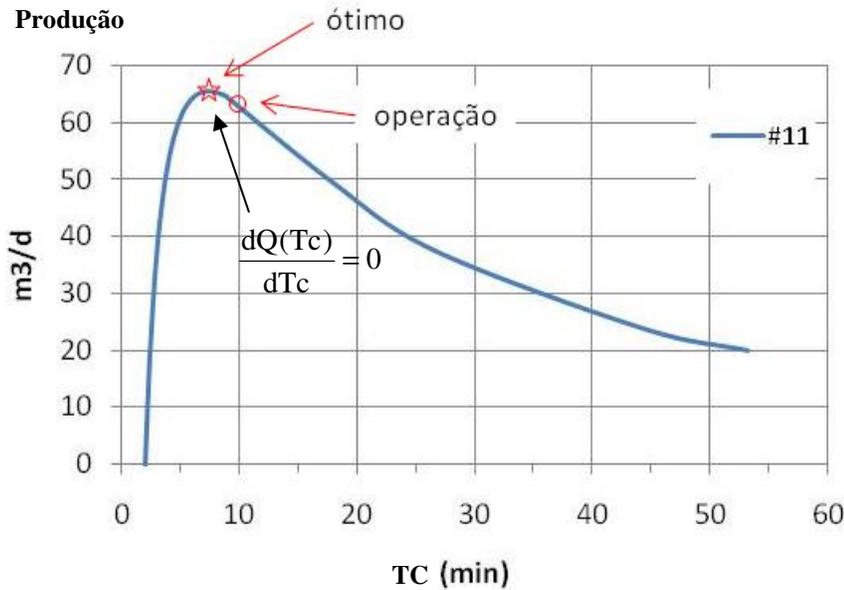


Figura 5-1 – Função de produção e ponto de produção máxima

Outra grande vantagem é o fato da produção estimada ser tomada a cada golfada, permitindo a detecção de alterações em tempo real na produção do poço e a correção, se necessário, desta alteração.

5.1 Detecção da golfada e cálculo da produção estimada através do sensor de impedância

O sensor de impedância é operado através do CLP que controla a produção do poço. O CLP é programado com um determinado tempo de ciclo e deve abrir a válvula de injeção de gás e permitir a injeção de gás no reservatório. Ao enviar o comando de abertura da válvula de injeção de gás o processo de elevação artificial se inicia e um sinal também será enviado ao sensor de impedância para que este sincronize seu contador de tempo e detecte o tempo de viagem da golfada. O sensor também detecta o tempo de golfada pelo tempo de permanência da golfada com o mesmo. Ao detectar o tempo de golfada, o sensor calcula a produção estimada da golfada atual e mantém a informação em um registro acessível ao CLP. A Figura 5-2 mostra, de maneira simplificada, a comunicação entre o sensor de impedância e o CLP.

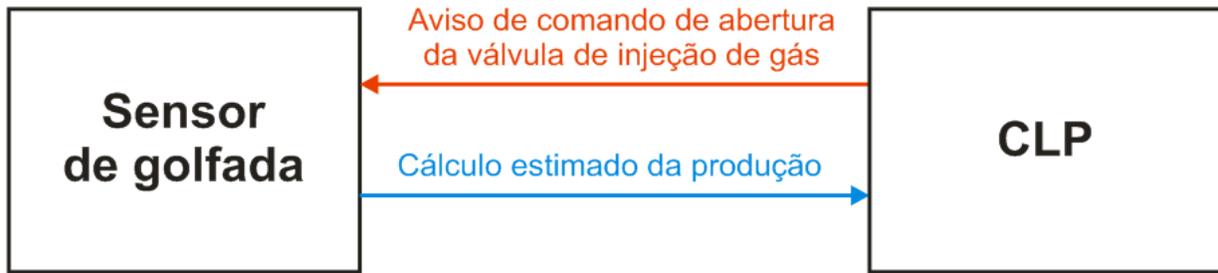


Figura 5-2 – Comunicação entre sensor de impedância e CLP

5.2 Busca do ponto ótimo de produção

5.2.1 ESTRATÉGIA DE PASSO FIXO

A variável de controle da produção é o tempo de ciclo e ao alterar o valor de TC precisamos conhecer o impacto causado na produção do poço. Devemos ter um critério para variar o TC e outro para medir seu impacto na produção através de uma análise estatística dos dados. A estratégia é variar o TC com passo fixo como mostra a Figura 5-3. O poço pode estar fora do ponto ótimo com TC atual maior do que o TC ótimo ou pode estar com o TC menor do que o TC ótimo. Devemos alterar o TC no sentido de aumento da produção (Figura 5-3) até que variações no TC não alterem significativamente a produção (ponto de máximo da função).

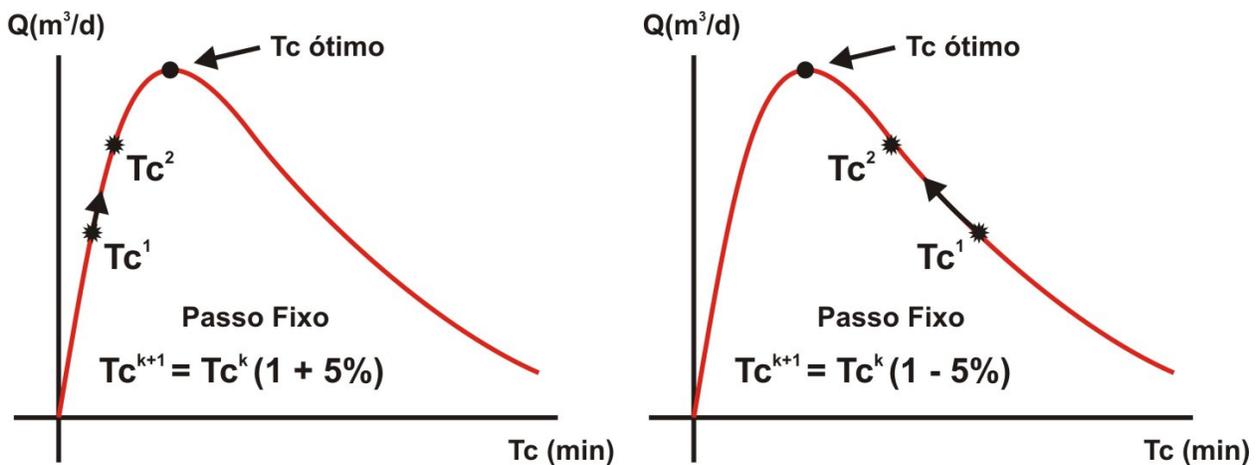


Figura 5-3 – Estratégia de passo fixo na busca do ponto ótimo de produção

Conforme discutimos no Capítulo 3, nas proximidades do ponto de máxima produção a curva é suave, ou seja, pequenas alterações no TC não causam impacto significativo na produção e podemos usar esta característica da função de produção para detectar o ponto de máximo da função de produção. Uma sugestão para o passo fixo é fazer incrementos ou decrementos no valor do TC em torno de 5% do seu valor e este valor se baseia na distribuição dos valores medidos da produção para um tempo de ciclo fixo.

5.2.2 ESTRATÉGIA COM USO DA FUNÇÃO DE PRODUÇÃO TEÓRICA

No Capítulo 3 propomos um modelo teórico para a curva de produção para um poço operado com GLI (Eq.3-15). Através deste modelo podemos encontrar a curva de produção teórica do poço com um ponto de produção conhecido, fornecido pelo cálculo de produção estimada (Eq.4-11). Como a função de produção é conhecida, podemos encontrar analiticamente o ponto de máximo, tornando a busca do ponto de máxima produção mais rápida do que a estratégia de passo fixo.

5.3 Distribuição da produção com tempo de ciclo fixo

Mesmo com um tempo de ciclo fixo temos variações na produção e devemos ter uma noção de como são estas variações para definir se a produção alterou ou não após uma alteração no tempo de ciclo ou após alterações nos parâmetros do poço. Esta análise é importante na definição da magnitude do passo ou incremento do TC utilizado no algoritmo de busca do ponto ótimo de produção.

Na Figura 5-4 temos um histograma da produção levantado através dos dados medidos na produção de um poço operado com GLI com TC fixo em 10 minutos. Vemos que o formato da distribuição se aproxima de uma distribuição gaussiana através dos valores de Kurtosis e Skewness (Eq.5-1 e Eq.5-2) que revelam numericamente o “achatamento” e a simetria da distribuição respectivamente.

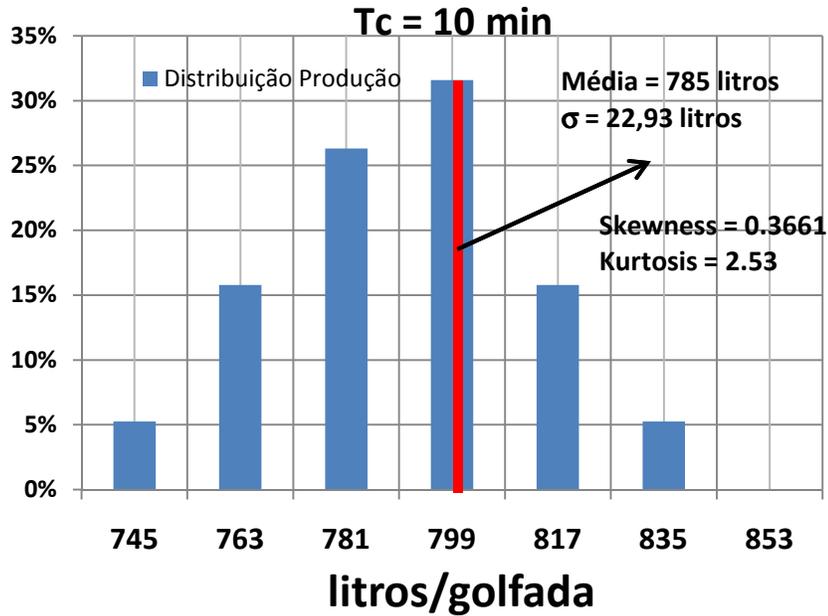


Figura 5-4 – Histograma da produção com TC fixo

$$5-1 \quad \text{Skewness} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^3}{(N-1)\sigma^3}$$

$$5-2 \quad \text{kurtosis} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^4}{(N-1)\sigma^4}$$

Na Figura 5-5 temos um esboço da função de distribuição de probabilidade gaussiana. Para um intervalo de confiança de 95% devemos considerar alterações no valor médio até dois desvios padrões acima e abaixo da média. Caso o valor encontrado tenha uma variação acima ou abaixo desses limites podemos considerar que houve de fato uma mudança no ponto de operação do poço e tomar o valor da média como novo valor de produção. Estudos mais detalhados precisam ser feitos em campo para construir um modelo estatístico mais preciso, mas os testes de campo realizados nos deram uma idéia sólida deste cenário.

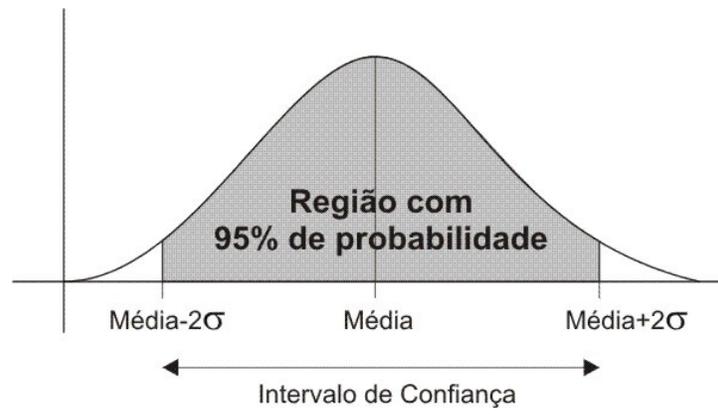


Figura 5-5 - Intervalo de confiança supondo uma distribuição do tipo $N(\mu, \sigma)$

Capítulo 6

Desenvolvimento do Sensor de impedância

O sensor de impedância é constituído por um transdutor e um circuito eletrônico para medir o efeito elétrico do petróleo em contato com o transdutor durante sua passagem pelo elemento sensor do transdutor. O sensor de impedância foi desenvolvido para permitir o estudo e a otimização de poços operados com GLI através da implementação do cálculo de produção estimada exposto no Capítulo 4 que permite medir a produção estimada em tempo real a cada ciclo do GLI. O efeito criado quando o petróleo atravessa o transdutor será capacitivo se a composição do fluido for predominantemente isolante (óleo puro) ou condutivo se a mistura for uma solução aquosa com óleo disperso. Na prática, é muito comum, em poços terrestres, ter água na composição do petróleo. Os dados de campo do recôncavo baiano mostram uma porcentagem de água variando de 9% até 97% da produção bruta dos poços operados com GLI. A capacitância do transdutor varia na faixa de alguns pico Farads, mas sua resistência pode variar de alguns ohms até centenas de quilo ohms, dependendo da condutividade do fluido.

Neste capítulo, discutiremos o funcionamento do sensor de impedância e seu desenvolvimento para detectar a impedância elétrica do fluido. O desenvolvimento do circuito eletrônico foi feito de forma paralela com o estudo para otimização de poços operados com GLI. O objetivo do sensor é medir a impedância do transdutor e processar esta informação, explorando seu significado. Poderemos detectar a presença da golfada de óleo na tubulação e medir os tempos de viagem e de golfada (TV e TG) como também, extrair informações qualitativas sobre sua composição, ou seja, poderemos saber se a produção de um poço é composta por mais óleo do que água ou vice-versa. Além disto, como discutido no Capítulo 4, o sensor pode incorporar algoritmos para o cálculo da produção estimada dentre outras várias aplicações decorrentes da leitura da impedância no tempo.

6.1 Construção do transdutor

O transdutor é construído por uma haste metálica que atravessa a sessão transversal da tubulação. A haste e a tubulação recebem isolamento elétrico e na Figura 6-1 temos a ilustração de como o transdutor é construído. O circuito eletrônico deverá medir o valor de R_x e de C_x que representam, respectivamente, o comportamento resistivo e capacitivo do transdutor em contato com o fluido.

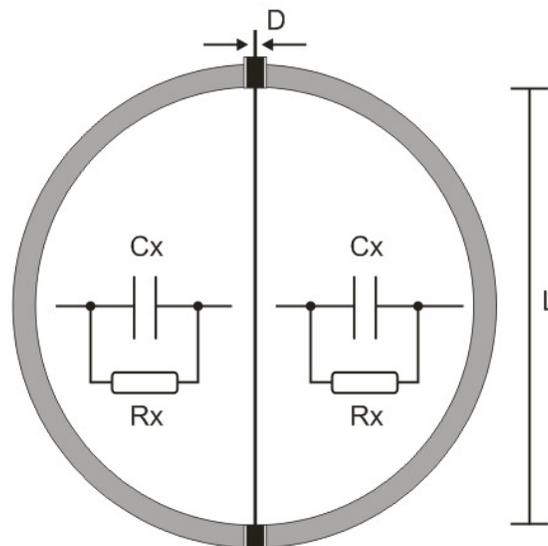


Figura 6-1 – Diagrama de construção do transdutor capacitivo

Na Figura 6-2 temos a foto frontal da montagem do transdutor acoplado com o alojamento da placa eletrônica e na Figura 6-3 vemos a montagem em perfil.

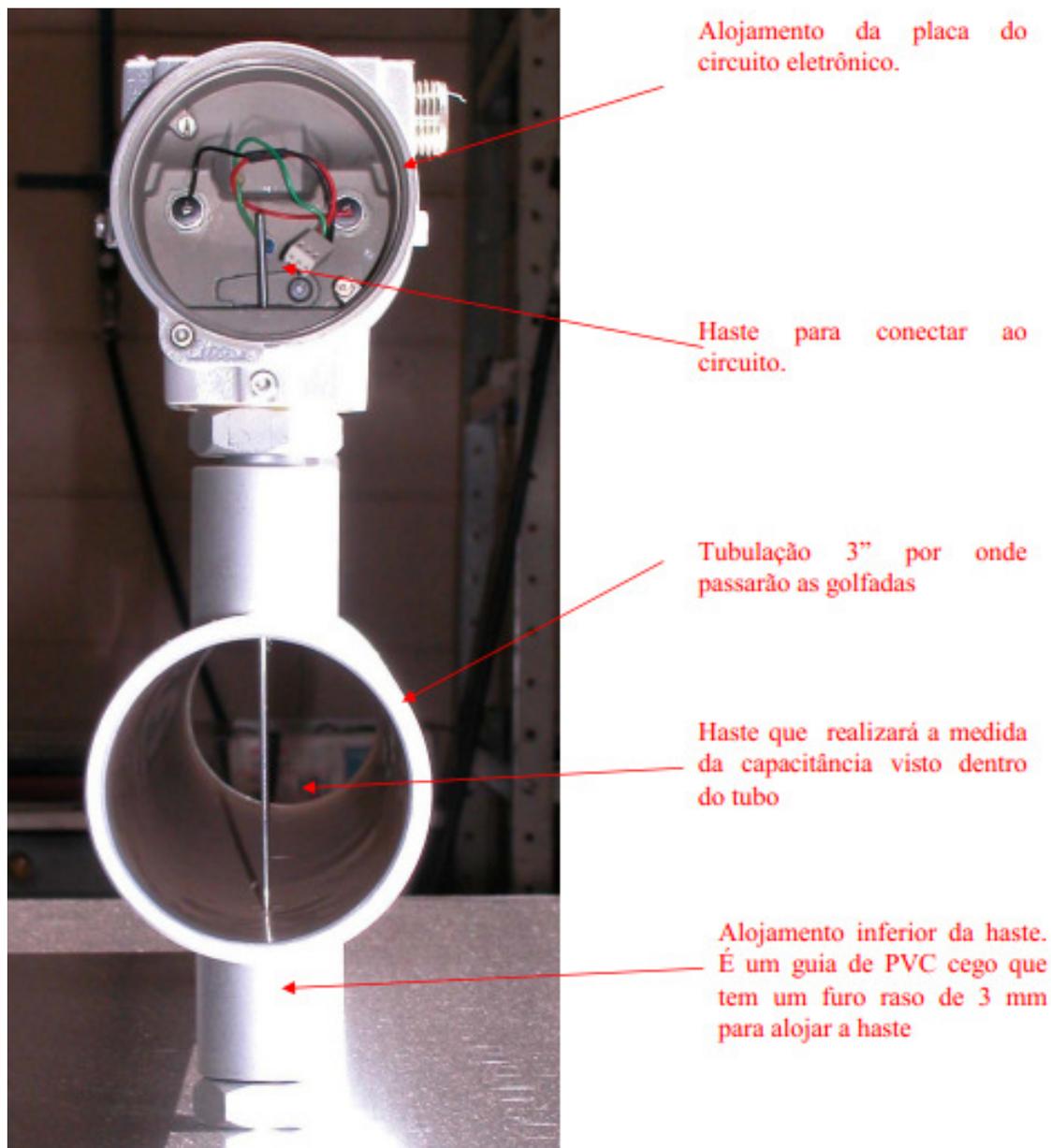


Figura 6-2 – Foto de perfil frontal do transdutor e do alojamento do circuito eletrônico

O alojamento da placa eletrônica é composto por um invólucro à prova de explosão e o circuito eletrônico que irá excitar a haste tem energia limitada para garantir que o nível de energia liberado para a haste não cause explosões nos diversos locais onde o sensor pode ser

instalado. A interface entre o transdutor e o invólucro ou alojamento do circuito eletrônico é selado mecanicamente, evitando que uma falha dentro no invólucro se propague para o interior do transdutor ou uma falha mecânica no transdutor permita que um possível vazamento de gás inflamável entre em contato com o circuito eletrônico.

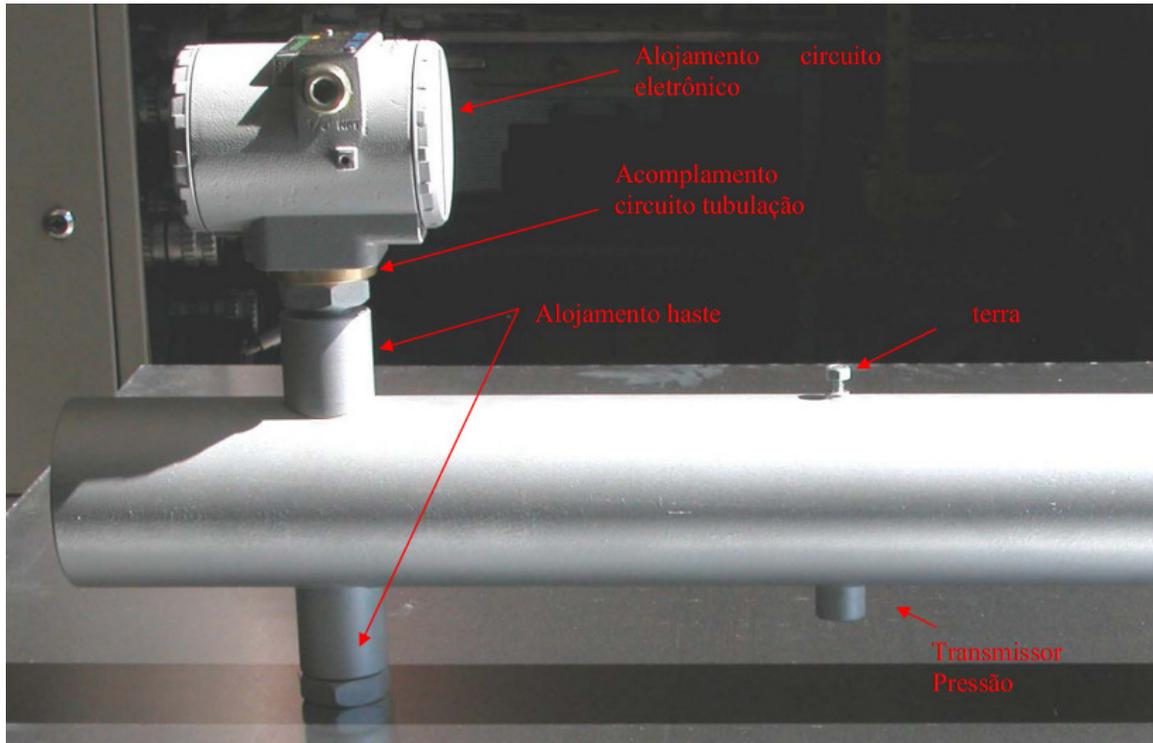


Figura 6-3 – Foto de perfil lateral do transdutor e do alojamento do circuito eletrônico

6.2 Características elétricas do transdutor/fluido

Na ausência de petróleo o transdutor tem como dielétrico ar ou gás, apresentando um comportamento predominantemente capacitivo com alguns pico Farads e ao entrar em contato com o petróleo seu comportamento elétrico pode ser predominantemente capacitivo (óleo), predominantemente resistivo (água) ou possuir uma mistura com determinada porcentagem de água que depende do BSW (Bottom sediment and water) do poço. O BSW é um índice que varia de 0 a 100% (água / água+óleo) e nos diz o quanto de água existe no óleo produzido. Como o comportamento desta água é condutivo devido à presença de sal em sua composição, o valor da impedância lida pelo circuito eletrônico pode variar de alguns ohms até centena de ohms para

esta situação, dependendo do nível de salinidade da água. Na Figura 6-4 temos um gráfico do comportamento do BSW encontrado nos poços onde realizamos o teste de campo do sensor de impedância. O gráfico mostra a função de distribuição acumulada do BSW de um campo de produção com cerca de 80 poços terrestres operados com GLI no recôncavo baiano. Note que mais de 75% dos poços têm BSW acima de 50%, ou seja, sua produção possui uma proporção maior de água do que de óleo. Portanto, o comportamento predominante do transdutor nestes poços é resistivo. Na Figura 6-5 temos a representação elétrica da impedância do transdutor em função do fluido em contato com a haste.

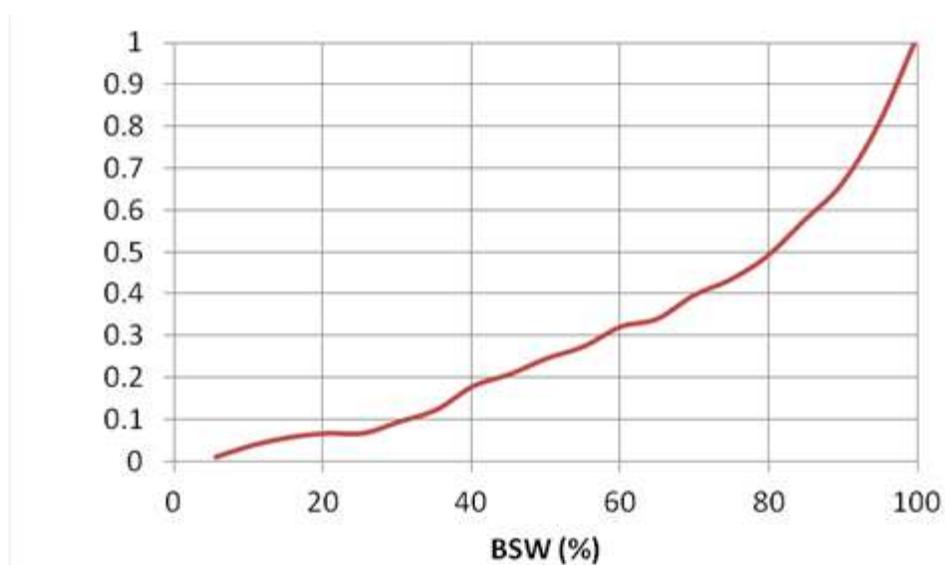


Figura 6-4 - Função de distribuição acumulada para o BSW encontrado nos poços do teste de campo

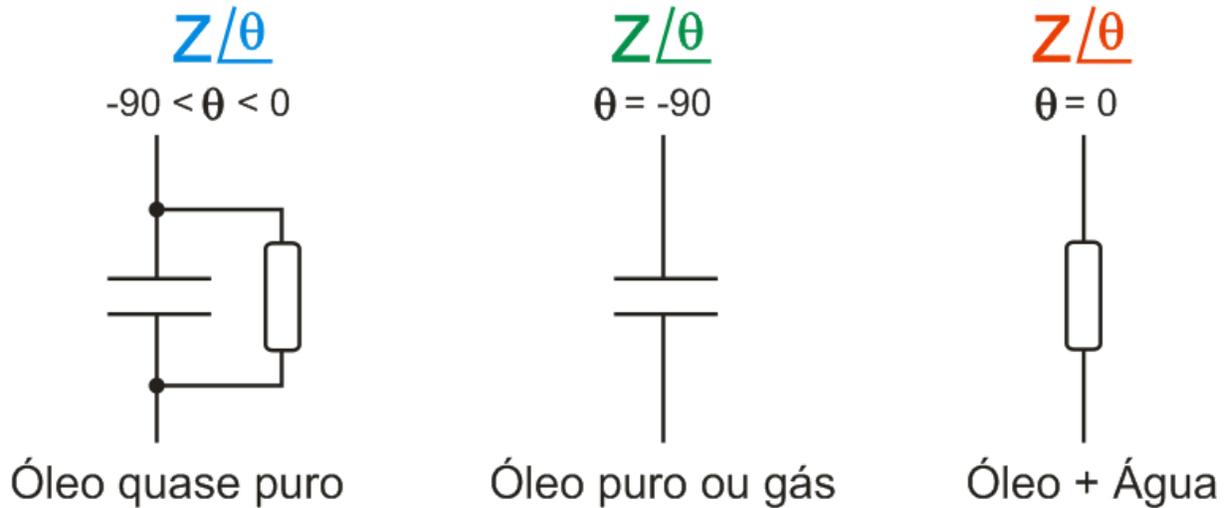


Figura 6-5 - Representação elétrica da impedância do transdutor em função do fluido

6.3 Circuito eletrônico do sensor

6.3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO SENSOR DE IMPEDÂNCIA

As características técnicas do sensor desenvolvido são:

- Alimentação de entrada: 18Vdc a 36Vdc
- Consumo total: 1,8 Watts
- Capacidade de processamento: 100MIPS
- Comunicação física: RS485
- Baud rate da comunicação: 96000bps , 38400bps e 115200bps
- Protocolo de comunicação: ModBus RTU
- Resistência mínima detectável: 5,0 Ω
- Capacitância mínima detectável: 1,0 pF
- Resistência máxima detectável: 1,0 M Ω
- Capacitância máxima detectável: 10.000 pF
- Faixa de frequência de excitação: 100 kHz a 1,0 MHz

- Laudo de conformidade: Ex d ia [ia Ga] IIC T6 Gb / - 20°C ≤ Tamb ≤ 50°C

6.3.2 DESCRIÇÃO GERAL DO HARDWARE

6.3.2.1 Visão Geral

A idéia central para ler a impedância do transdutor é excitar a haste com um sinal senoidal AC com frequência suficiente para detectar valores baixos de capacitância. Uma leitura do módulo e da fase da corrente que excita a haste é suficiente para se calcular o módulo e a fase da impedância. Na Figura 6-6 temos um diagrama simplificado que mostra, de uma forma geral, como a impedância será lida. Uma fonte de tensão com determinada frequência gera o sinal para excitação da haste e uma leitura da corrente (módulo e fase) permite o cálculo da impedância do transdutor. Como a haste se encontra em uma área classificada com risco de explosão, devemos limitar a energia para a haste através de um circuito limitador de energia.

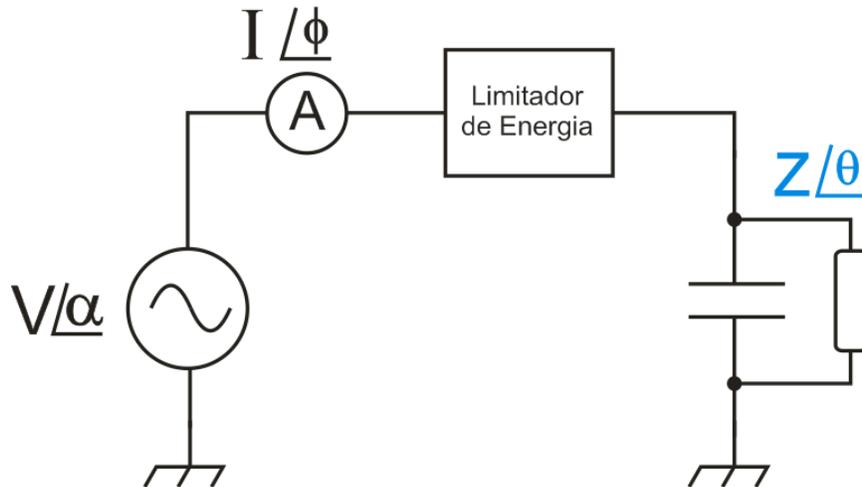


Figura 6-6 – Idéia geral para leitura da impedância do transdutor

O circuito eletrônico deve ser capaz de ler, com razoável precisão, o módulo e a fase da corrente e compensar os efeitos parasitas do transdutor e do próprio circuito eletrônico. Como as frequências envolvidas são relativamente altas, com centenas de quilo Hertz, essa tarefa requer um circuito dedicado com componentes que operam tanto com frequências altas como permite

precisão na leitura dos sinais. Na Figura 6-7 temos o diagrama em blocos do circuito eletrônico. O circuito possui um microcontrolador que controla todo o circuito analógico e permite a comunicação do sensor com o mundo exterior enviando e recebendo dados de um CLP ou de um computador remoto. Além de calcular a impedância do transdutor, o microcontrolador executa programas para o cálculo de estimativa de produção além de outras possíveis aplicações como a detecção de padrões de escoamento do fluido e detecção de BSW.

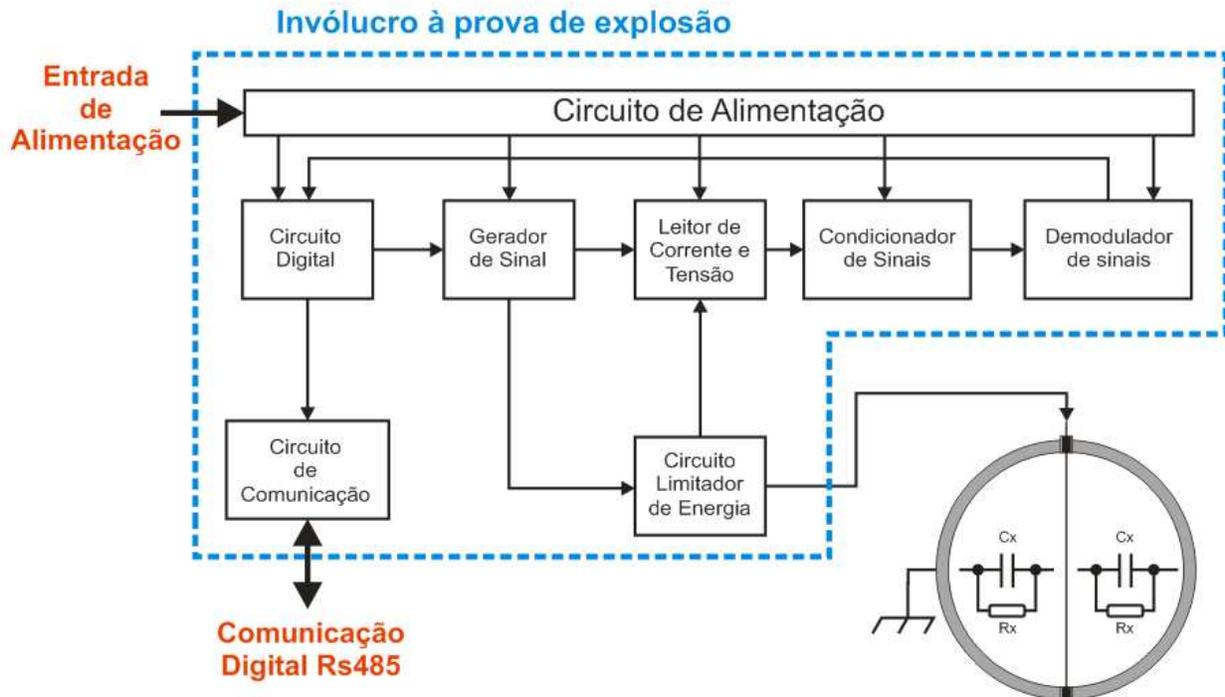


Figura 6-7 – Diagrama em blocos do circuito eletrônico

O circuito eletrônico pode ser dividido em três partes fundamentais: circuito digital, circuito analógico e circuito de proteção para áreas classificadas. A parte digital é composta pelo microcontrolador, memória externa, circuito de comunicação e circuitos de controle de frequência e módulo do sinal de excitação do sensor. A parte analógica é composta pelo circuito de leitura e condicionamento dos sinais do transdutor e do demodulador de sinais que separa a informação da impedância no tempo do sinal de excitação usado como portadora. Finalmente, temos o circuito de proteção para áreas classificadas que garante energia limitada para a haste segundo a norma internacional IEC60079-11.

6.3.2.2 Leitura do transdutor e compensação de parasitas

Um grande desafio quanto tentamos medir capacitância de baixo valor é o de compensar as capacitâncias parasitas do circuito eletrônico e do transdutor. Em muitos casos a capacitância parasita do circuito é dezena de vezes maior do que a capacitância de interesse e devemos compensar os efeitos dessas capacitâncias parasitas para conseguir medir o efeito do transdutor. Na Figura 6-8 temos o circuito simplificado que faz a leitura direta da impedância do transdutor (Z_s). O resistor R tem a função de dar ganho ao sinal desejado e é escolhido de forma conveniente em função do valor da impedância parasita Z_p e da magnitude da impedância que desejamos medir que depende da composição elétrica do fluido na tubulação. A impedância parasita Z_p é resultado do circuito limitador de energia, dos parasitas do transdutor e parasitas dos componentes eletrônicos associados com a leitura do transdutor. Devemos compensar os efeitos de Z_p , pois desejamos fazer a leitura da impedância Z_s que é dezenas de vezes menor do que Z_p .

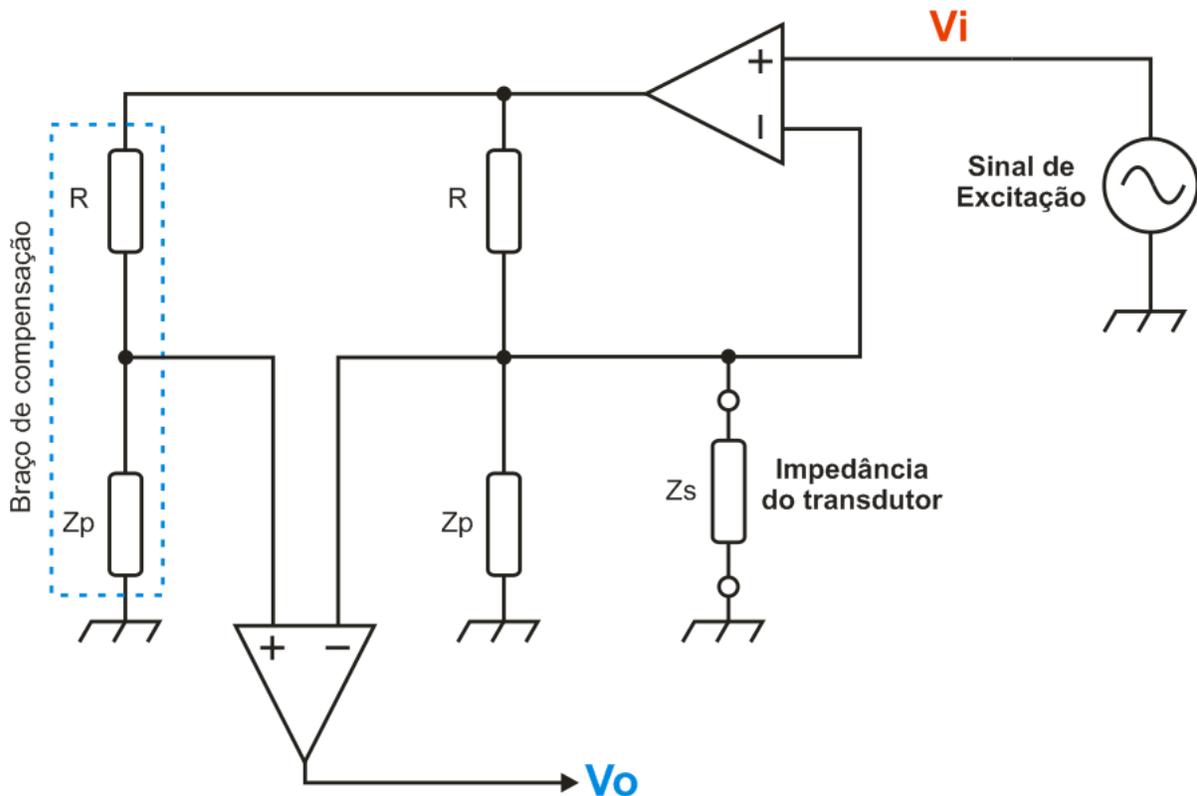


Figura 6-8 – Circuito para leitura do transdutor e compensação de parasitas

No lado esquerdo da Figura 6-8 reproduzimos o resistor R e os efeitos parasitas de Z_p e denominamos a associação em série destes elementos como braço de compensação. O resultado deste circuito é a saída V_o que deverá entregar um sinal inversamente proporcional à impedância do transdutor (Z_s). Na Eq. 6-1 temos a expressão do sinal de saída do circuito. Considera-se que $Z_p \gg R$ e, desta forma, o sinal do transdutor fica em função somente do resistor de ganho R e do sinal V_i de excitação.

$$6-1 \quad V_o = \frac{1}{Z_s} \left(\frac{R \cdot Z_p}{R + Z_p} \right) \cdot V_i \cong \frac{R}{Z_s} \cdot V_i \quad \text{onde } Z_p \gg R$$

Os próximos circuitos irão amplificar o sinal V_o , detectar a fase da impedância em função da defasagem entre V_o e V_i , detectar a tensão de pico, eliminando a portadora de sinal e condicionar o sinal até a entrada do conversor analógico-digital do microcontrolador.

6.3.3 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DO SENSOR

O circuito eletrônico do sensor de impedância é denso devido ao número de recursos e precisão que deve apresentar. A placa de circuito impresso deve ter dimensões compatíveis com o invólucro à prova de explosão e para atender estes requisitos a placa de circuito impresso conta com seis camadas de cobre que desempenham funções de interligações entre os componentes e alimentação e aterramento. Na Figura 6-9 temos a vista superior da placa e na Figura 6-10 temos a vista inferior da placa. Ambas as faces da placa recebem componentes como pode ser visto nestas figuras. Na Figura 6-11 e na Figura 6-12 podemos ver a placa instalada no invólucro à prova de explosão e operando em laboratório.

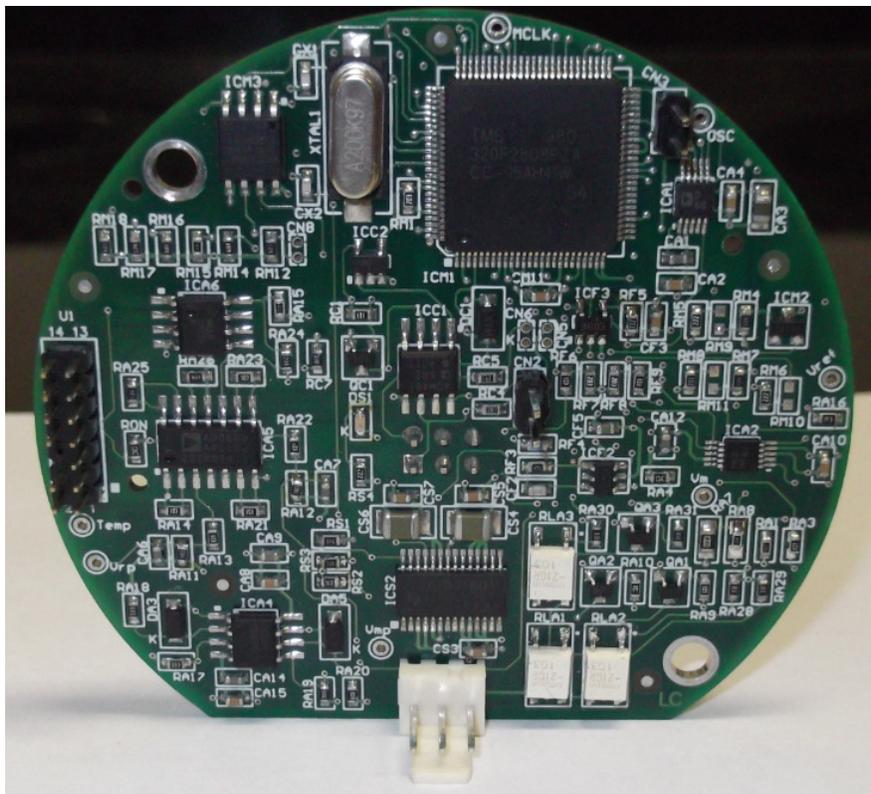


Figura 6-9 - Foto da placa eletrônica do sensor golfada com vista superior

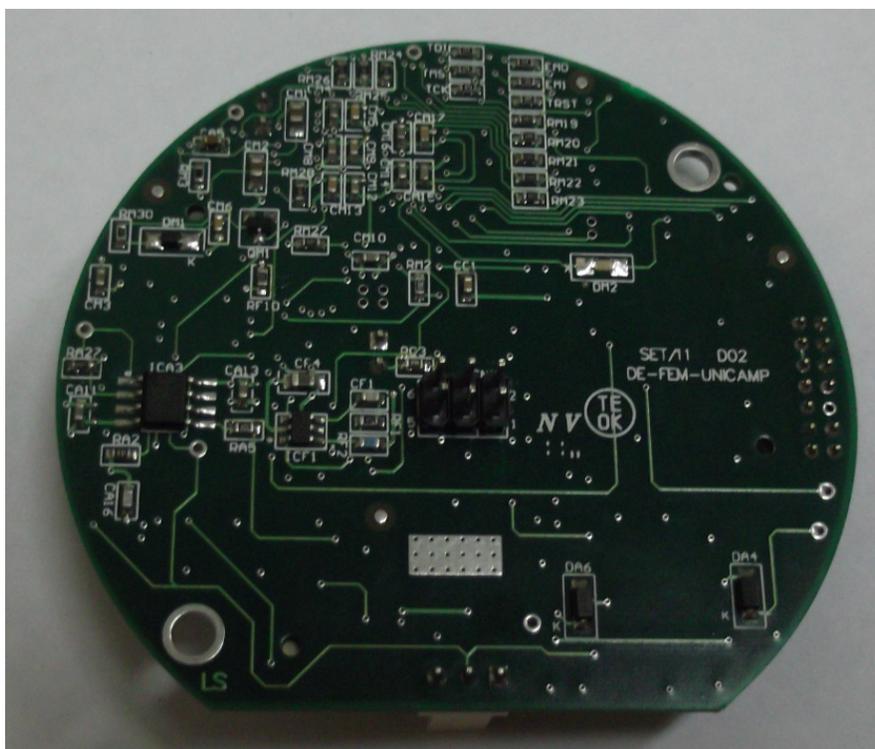


Figura 6-10 - Foto da placa eletrônica do sensor golfada com vista inferior

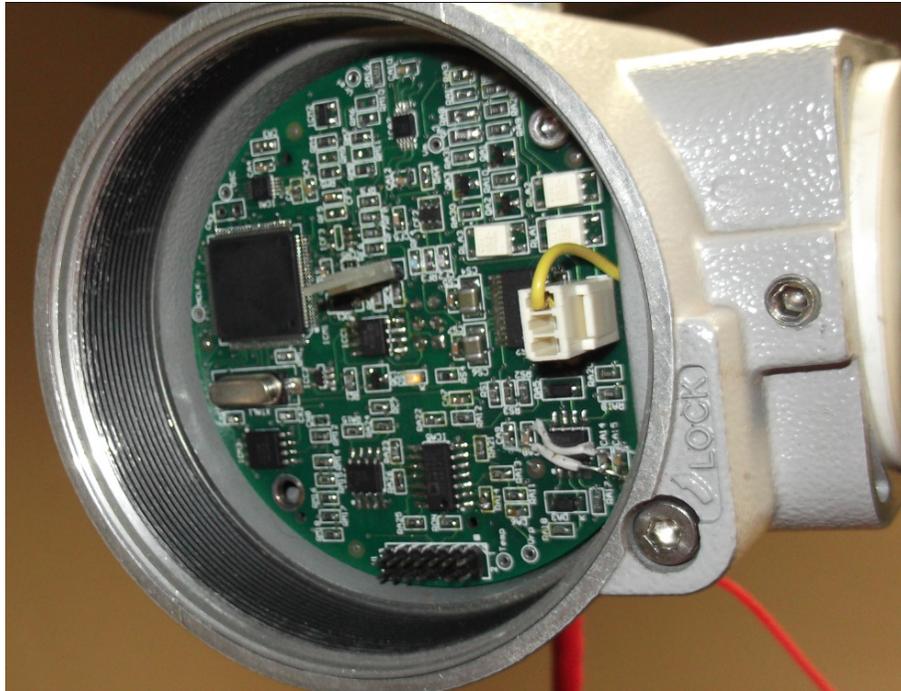


Figura 6-11 – Placa eletrônica instalada no invólucro à prova de explosão

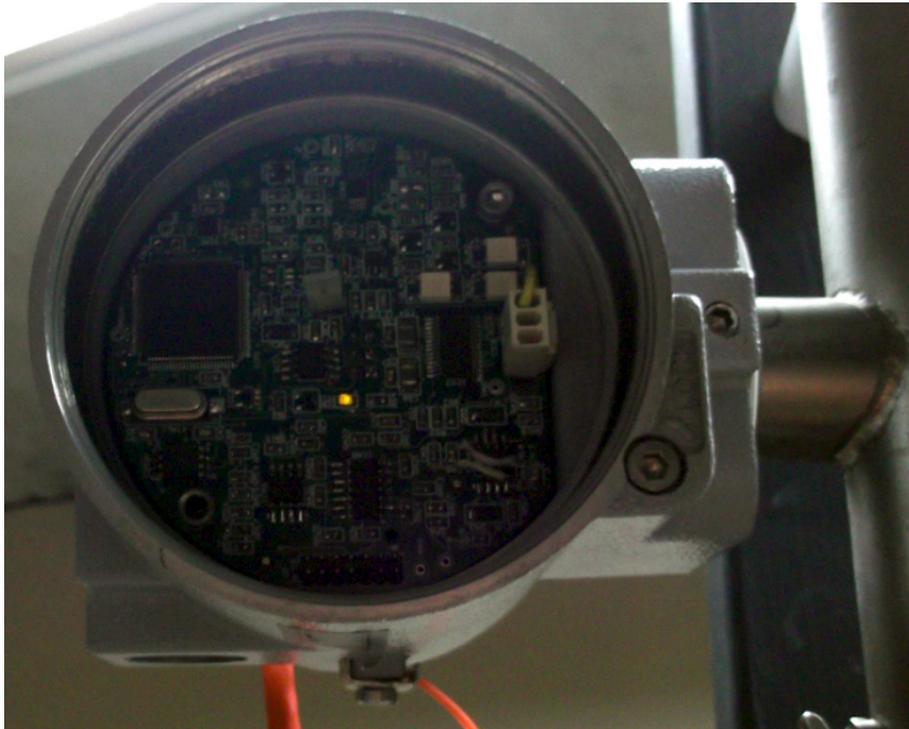


Figura 6-12 – Placa eletrônica em operação em laboratório

6.3.4 DESCRIÇÃO GERAL DO FIRMWARE

Na Figura 6-13 temos o diagrama em blocos simplificado do Firmware (software dedicado ao controle e operação do hardware) implementado no microcontrolador. Podemos dividir o controle do circuito externo (circuito de excitação, condicionamento de sinais, memória externa etc) pelo microcontrolador em três partes ou áreas: controle da frequência e amplitude do sinal de excitação, controle do resistor de ganho no circuito de leitura do transdutor e comunicação digital com o computador remoto ou CLP através do padrão físico RS485. Além destas três áreas o microcontrolador possui uma memória EEPROM externa e recebe os sinais demodulados da fase e módulo da impedância do transdutor.

Ao iniciar, o microcontrolador executa o acionamento dos periféricos e registradores internos. Em seguida, os parâmetros do poço e de hardware são carregados do mapa de memória do sensor gravado na memória não volátil EEPROM. O mapa de memória armazena todos os parâmetros do hardware e do poço, tais como taxa de comunicação do sensor, frequência de amostragem da impedância, amplitude e frequência do sinal de excitação, parâmetros de detecção da golfada, dados de produção estimada da última golfada etc. Após carregar e executar os parâmetros do mapa de memória, o firmware habilita a comunicação entre o sensor e o mundo externo, podendo receber comandos e enviar dados para o computador remoto ou CLP que fizer a requisição dos dados.

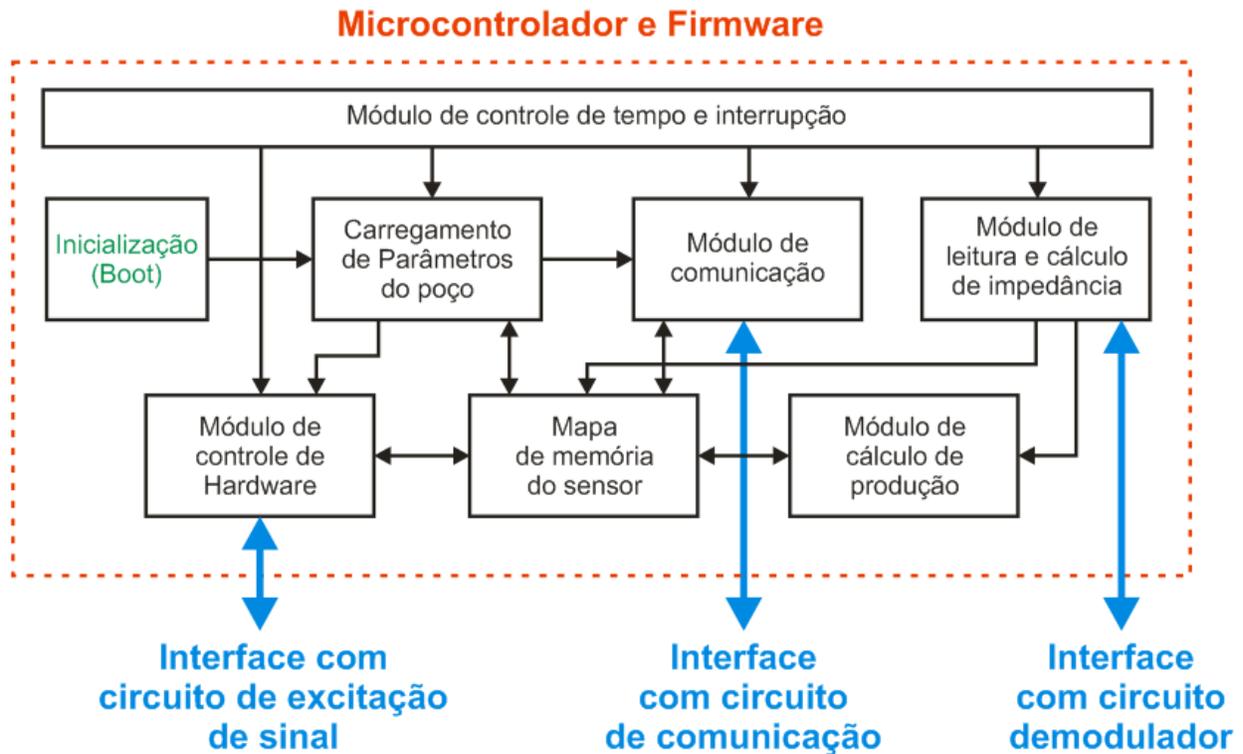


Figura 6-13 – Diagrama em blocos do Firmware do microcontrolador

O módulo de leitura e cálculo de impedância é controlado pelo módulo de tempo e interrupção assim como todos os outros módulos. Ao detectar os tempos de golfada e viagem este módulo aciona o módulo de cálculo da produção estimada. Após a realização do cálculo da produção estimada, o mapa de memória é atualizado com esta informação.

6.4 Comunicação digital

A comunicação do sensor de impedância com mundo exterior é feita por um par de fios com padrão de comunicação RS485 em Half-Duplex, ou seja, o sentido de comunicação é bidirecional e não simultâneo. O hardware do circuito de comunicação é composto por um circuito que converte o padrão RS232 do microcontrolador para o padrão RS485 e um circuito comutador que controla o sentido da comunicação uma vez que a recepção de dados e transmissão usam o mesmo par de fios.

Cada sensor instalado recebe um endereço único e poderá compartilhar o mesmo par de fios com outros sensores de golfada ou outros sensores desde que estes usem o mesmo protocolo de comunicação.

6.4.1 PADRÃO FÍSICO DE COMUNICAÇÃO

O sensor de impedância se comunica através do padrão RS485. Este padrão de comunicação física é feito através de um par de fios com sinais balanceados e permite comunicação sem repetidores em centenas de metros pelo fato dos sinais balanceados facilitarem de forma significativa a decodificação dos dados transmitidos.

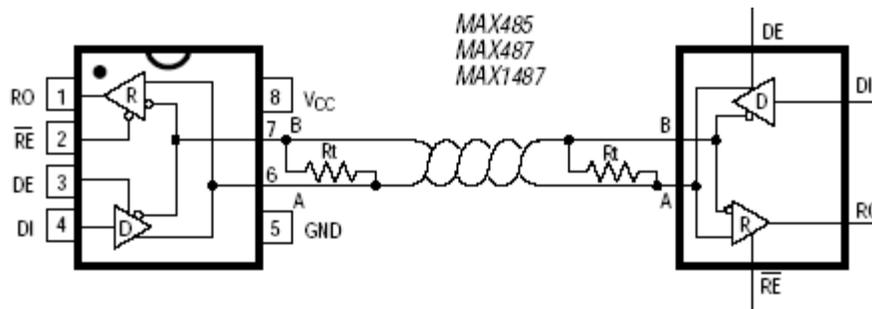


Figura 6-14 – Drives de comunicação RS485

Na Figura 6-14 temos um diagrama elétrico de um típico circuito integrado que permite a comunicação com o padrão RS485. Os pinos 2 e 3 do CI (circuito integrado) permitem a troca do sentido de comunicação (transmissão ou recepção) enquanto os pinos 1 e 4 se conectam separadamente com os sinais de entrada e saída do microcontrolador que opera com comunicação serial UART RS232. Ao receber um sinal do microcontrolador no pino 4, o CI gera este mesmo sinal sem inversão no pino 6 e invertido no pino 7. Desta forma, o receptor deste sinal gerado irá detectar somente os sinais balanceados, eliminando ruídos que em geral induzem tensões iguais nos dois fios. Para uma frequência de até 110 kHz o alcance é de aproximadamente de 1200 metros.

6.4.2 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO MODBUS

O protocolo usado no sensor de impedância é o ModBus RTU que é compatível com os utilizados no meio industrial, permitindo a compatibilidade entre o sensor e os equipamentos existentes. O ModBus é um protocolo antigo, aberto e largamente utilizado na indústria pela sua simplicidade e eficácia.

6.4.2.1 Comunicação mestre-escravo

A comunicação com o protocolo ModBus é baseada no modo Mestre-Escravo onde teremos somente um mestre conectado a n-escravos. A comunicação se inicia com o mestre (CLP ou computador remoto), o qual poderá enviar um comando a todos os escravos conectados na linha (modo Broadcast) ou endereçar um comando somente para um dispositivo. Ao receber o comando do mestre, o escravo endereçado deve checar a validade da mensagem e procurar por erros. Se houver erros o escravo enviará uma mensagem de erro, caso contrário executará o comando enviado pelo mestre. A comunicação entre mestre e escravo não é simultânea, ou seja, o mestre envia comandos ou solicita dados armazenados no dispositivo escravo e espera por uma resposta do escravo como ilustra a Figura 6-16. Somente haverá um escravo se comunicando com o mestre por vez.



Figura 6-15 - Comunicação Mestre-Escravo do ModBus

6.4.2.2 Frame de comunicação do modbus

A Figura 6-16 ilustra o frame típico utilizado na comunicação Modbus e a quantidade de bytes usados para cada componente do frame.

Endereço	Código Função	Dados	CRC
1 byte	1 byte	N*bytes	2bytes

Figura 6-16 – Frame de comunicação do protocolo ModBus

Os campos do frame têm as seguintes funções:

- **Endereço:** O primeiro byte deverá ser o endereço do escravo que receberá o comando ou requisição de dados. Podemos endereçar de 1 a 247 dispositivos. Nesta faixa de endereços somente um escravo irá se comunicar por vez. Caso a mensagem seja destinada a todos os escravos o Endereço será “0” (modo Broadcast).
- **Código Função:** O Código Função terá uma faixa de 1 a 255 e irá determinar o que o escravo deverá executar, como fornecer dados de registradores e coils (bits de registradores que se relacionam com portas do hardware) ou alterar dados de registradores e coils além de outras funções.
- **Dados:** Este campo se refere aos dados. Se o mestre desejar ler um registrador deverá informar neste campo a quantidade de registradores que deverá ser lido e o endereço inicial do primeiro registrador.
- **CRC:** Os últimos dois bytes se referem ao CRC (cyclic redundance check). Estes dois bytes resultam de um cálculo realizado com todos os bytes anteriores. O escravo ao receber o frame deverá recalcular o CRC e comparar com o CRC

recebido. Caso estes valores não sejam iguais o frame recebido sofreu um erro em algum bit e uma exceção (execução de software para tratamento do erro) será gerada.

6.4.3 INTERFACE ENTRE SENSOR E COMPUTADOR REMOTO OU CLP

Quando um computador remoto ou CLP capaz de se comunicar em ModBus acessa o sensor através do seu endereço (Figura 6-17) ele deve conhecer o mapa de memória do sensor onde estão diversos registradores com significados diferentes e acesso controlado (somente leitura ou leitura e escrita). Estes registradores controlam toda a operação do sensor como a taxa de comunicação serial, parâmetros do poço, parâmetros de operação de hardware do sensor, dados de leitura de impedância etc. O computador remoto deverá conhecer o endereço do registrador desejado para acessá-lo e realizar um comando de leitura ou escrita conforme o tipo de acesso permitido para o registrador desejado. Na Tabela 6-1 temos uma parte do mapa de memória do sensor de impedância relativa à operação do sensor.

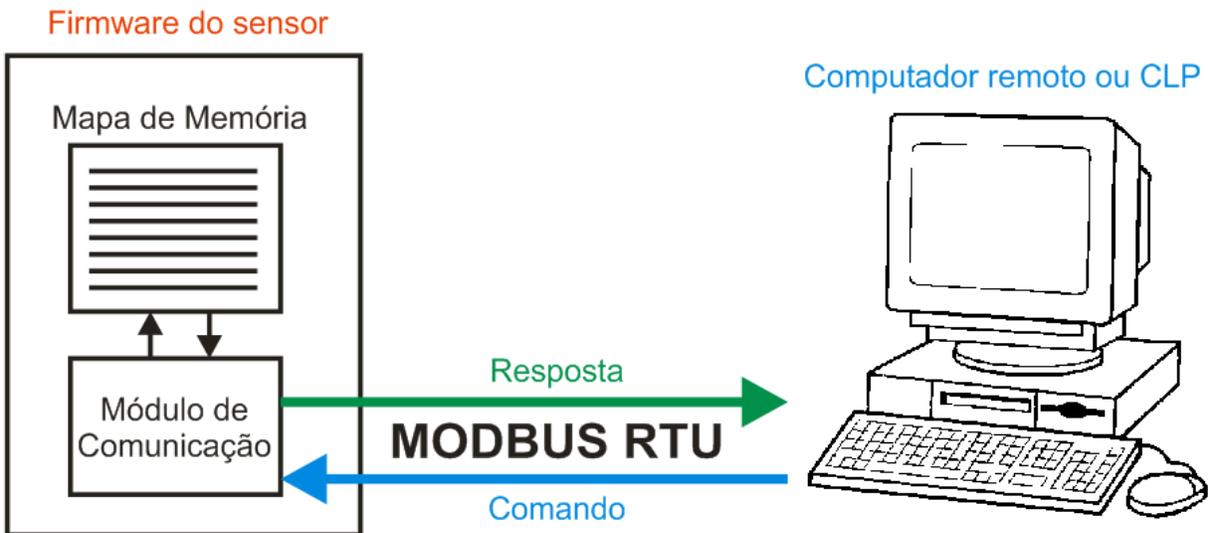


Figura 6-17 – Comunicação entre sensor de impedância e computador ou CLP

Tabela 6-1 – Mapa de memória de operação do sensor de impedância

Parâmetro	Endereço	Unidade	Faixa	Acesso	Comentários
Dados de leitura do Sensor - Operação (0-59)					
MóduloRelativo	0	adimensional	0 a 10000	Leitura	Módulo Relativo
DataMóduloRelativo	1	adimensional	0 a 10000	Leitura	Data do Módulo Relativo
MóduloAbsoluto	2	ohms	0 a 65535	Leitura	Módulo Absoluto
DataModuloAbsoluto	3	adimensional	0 a 10000	Leitura	Data do Módulo Absoluto
Fase	4	graus	0 a 90	Leitura	Fase da Impedância
Capacitância	5	pF	0 a 65535	Leitura	Capacitância Paralela
DataCapacitância	6	adimensional	0 a 10000	Leitura	Data da capacitância
Temperatura	7	°C	0 a 125	Leitura	Temp. do Sensor da Placa
VolumeProduzido	8	Litros	0 a 65535	Leitura	Volume da Golfada
DataVolumeProduzido	9	adimensional	0 a 10000	Leitura	Data do Volume da Golfada
VolumeFallback	10	Litros	0 a 65535	Leitura	Volume de fallback
VolumeInicial	11	Litros	0 a 65535	Leitura	Volume inicial
ProducaoBruta	12	m3/dia	0 a 65535	Leitura	Produção Bruta
ProducaoOleo	13	m3/dia	0 a 65535	Leitura	Produção de óleo
TempoGolfada	14	segundos	0 a 65535	Leitura	Tempo Golfada
TempoViagem	15	segundos	0 a 65535	Leitura	Tempo de viagem
NumeroSubGolfadas	16	adimensional	0 a 65535	Leitura	Número de sub golfadas
ZmaxGolfada	17	ohms	0 a 65535	Leitura	Máxima Impedância detectada
ZmaxFaseGolfada	18	graus	0 a 65535	Leitura	Fase da máxima impedância
ZminGolfada	19	ohms	0 a 65535	Leitura	Mínima impedância detectada
ZminFaseGolfada	20	graus	0 a 65535	Leitura	Fase da mínima impedância
AlphaRaiz	21	%	0 a 100	Leitura	Fração de vazio (%)

O Mapa de memória do sensor de impedância foi dividido em cinco áreas conforme o tipo de função do registrador. Estas áreas são:

- **Operação:** Área onde os dados disponíveis pelo sensor somente podem ser lidos pelo computador remoto e se referem à operação do sensor de impedância no poço instalado.
- **Dados de leitura do sensor:** Área com dados de leitura técnica disponível para checagem técnica dos dados lidos pelo microcontrolador a fim de permitir a avaliação técnica dos dados.
- **Configuração de algoritmos:** Área destinada para a configuração dos parâmetros de algoritmos realizados pelo sensor como o cálculo de produção estimada.
- **Parâmetros do poço:** Área onde os dados do poço são inseridos para a correta operação do sensor e do algoritmo de cálculo da produção estimada.
- **Parâmetros do circuito eletrônico:** Área com gravação e leitura de dados técnicos relativos ao controle do circuito analógico do sensor.

6.5 Instalação em áreas classificadas

Os locais de instalação do sensor de impedância se encontram em áreas classificadas. As áreas classificadas são aquelas onde há risco de explosão pela presença de ar, combustível e fontes de ignição que são os elementos básicos para uma combustão ilustrados na Figura 6-18. Os equipamentos a serem instalados nestas áreas devem ter certificação especial de acordo com o nível de risco da área onde o equipamento será instalado. O sensor de impedância é equipado com um invólucro à prova de explosão e um circuito limitador de energia que combinados, garantem sua instalação nos mais rígidos ambientes, permitindo seu uso em qualquer ponto do poço. Descrevemos em seguida alguns conceitos desta parte do projeto que contou com um laudo de conformidade após o desenvolvimento do projeto do sensor.



Figura 6-18 - Elementos básicos para combustão

6.5.1 ZONAS DE CLASSIFICAÇÃO

As áreas classificadas são divididas em zonas conforme o risco da mistura explosiva acontecer e receber energia para sua ignição. As zonas abaixo são assim categorizadas conforme normas internacionais (IEC- série 60079 [11]).

Zona 0: Onde uma mistura explosiva ar/gás está continuamente presente ou presente por longos períodos.

Zona 1: Onde é provável ocorrer uma mistura explosiva ar/gás, durante operação normal.

Zona 2: Onde é pouco provável ocorrer uma mistura explosiva ar/gás, em condições normais de operação ou, caso ocorra, será por um breve período de tempo.

Dependendo do tipo de combustível da atmosfera explosiva o equipamento recebe ainda uma divisão por grupos conforme abaixo:

Grupo I: Equipamento elétrico destinado para utilização em minas de carvão susceptíveis ao gás metano (grisu).

Grupo II: Equipamento elétrico destinado para utilização em áreas com atmosfera explosiva de gás que não o metano (grisu).

Conforme o tipo de gás o grupo II ainda possui subdivisões:

IIA: Um gás típico é o propano

IIB: Um gás típico é o etileno.

IIC: Um gás típico é o hidrogênio.

Grupo III: Equipamento elétrico destinado para utilização em áreas com atmosfera explosiva de poeiras que não minas susceptíveis ao grisú.

Subdivisões do grupo III:

IIIA: Fibras combustíveis

IIIB: poeiras não condutoras

IIIC: poeiras condutoras

6.5.2 TIPOS DE PROTEÇÃO DO SENSOR DE IMPEDÂNCIA

O sensor de impedância recebeu laudo de conformidade para operar em Zona 0 em áreas do grupo IIC que é a área de maior grau de risco para o grupo II. Portanto, o sensor pode ser instalado em qualquer área do grupo II mesmo onde existe a presença contínua ou com alta frequência de atmosfera explosiva.

6.5.2.1 Invólucro à prova de explosão

O invólucro à prova de explosão tem a função de conter uma explosão que possa ocorrer em seu interior onde é inserido o circuito eletrônico, ou seja, não permite que a explosão se propague para o ambiente externo.



Figura 6-19 – Invólucro à prova de explosão

6.5.2.2 Circuito de segurança intrínseca

O circuito limita a energia enviada para a zona classificada em uma quantidade de energia insuficiente para causar a ignição da atmosfera explosiva. Para cada tipo de grupo temos um limite de energia que deve ser respeitado pelo equipamento.

Existem várias maneiras de se limitar energia e a escolha da técnica varia conforme as necessidades funcionais do equipamento e a viabilidade técnica para sua aplicação dentro das limitações impostas. Particularmente, o sensor conta com o que é conhecido como barreira zener para limitar a energia enviada para a haste que compõe o transdutor e que está em contato com a atmosfera explosiva. Na Figura 6-20 vemos a arquitetura do circuito de uma barreira zener linear. O circuito é bem simples e podemos ver a curva da tensão de saída pela corrente de saída na Figura 6-21 de onde se justifica o nome da barreira, pois a tensão cai linearmente com a corrente. A potência máxima que a saída pode fornecer para a carga acontece quando o valor resistivo da carga é igual ao resistor R_p . Desta forma, a expressão para a potência máxima é de

$P_{\max} = \frac{U_o^2}{4R_p}$ e pode ser facilmente deduzida derivando a expressão da potência na carga em função do resistor de carga e igualando o resultado a zero (ponto de máximo). A tensão U_o é a tensão máxima permitida pelo diodo zener e I_o é a máxima corrente que a carga pode drenar, limitada pelo resistor R_p e pela tensão U_o (U_o/R_p).

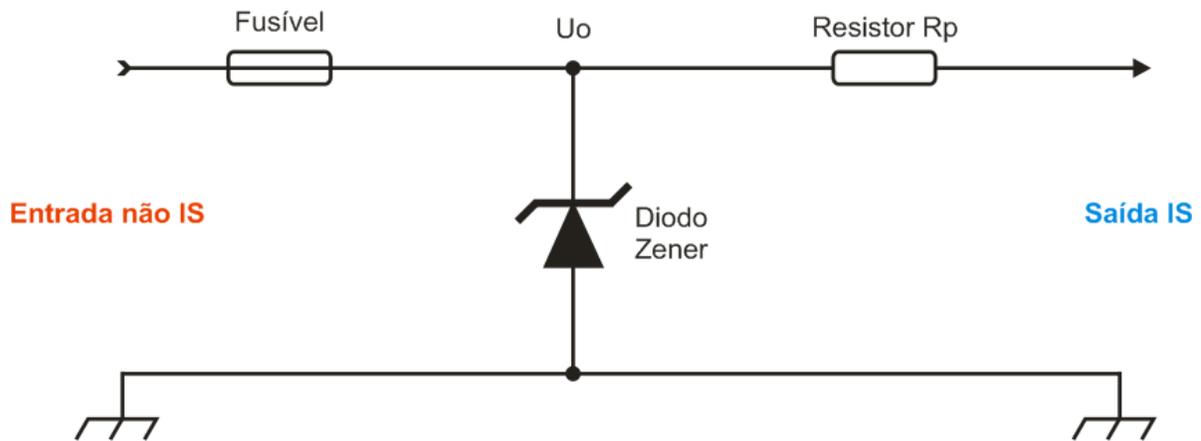


Figura 6-20 – Barreira zener do tipo linear

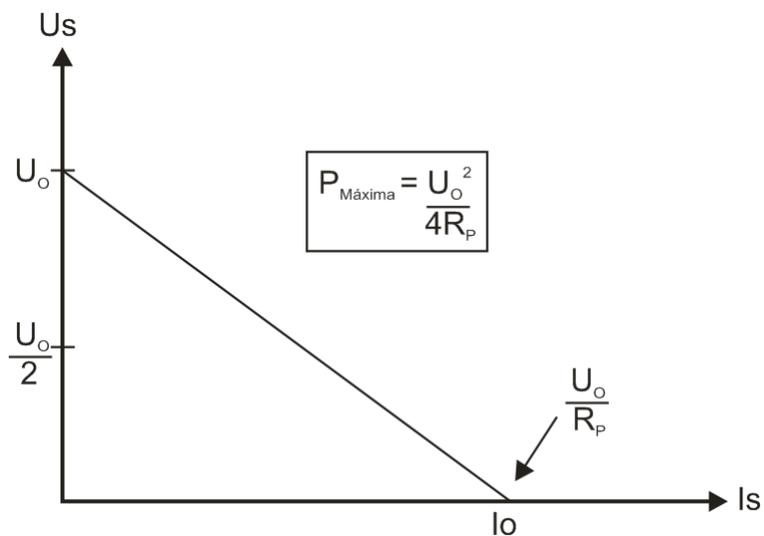


Figura 6-21 – Corrente de saída x tensão de saída da barreira zener linear

6.6 Sinal do módulo da impedância no tempo

A medida do módulo da impedância no tempo pode ter várias aplicações; uma delas é a detecção de uma golfada de petróleo devido à variação da impedância quando a tubulação passa de vazio para cheio ou vice versa. Quando o tubo está vazio, sem a presença de petróleo, a impedância tende a ser alta, mas na presença do petróleo o valor da impedância cai significativamente. Portanto, a tarefa de detectar uma golfada de petróleo através do monitoramento da impedância é relativamente simples. A função do sensor de impedância para detectar os tempos de golfada e de viagem, conforme discutido no Capítulo 4, é o de detectar quando o tubo está cheio e quando está vazio, mas a aplicação deste sensor vai muito além desta tarefa. A informação da impedância no tempo nos permite saber qual é o padrão de escoamento do fluido em contato com o sensor.

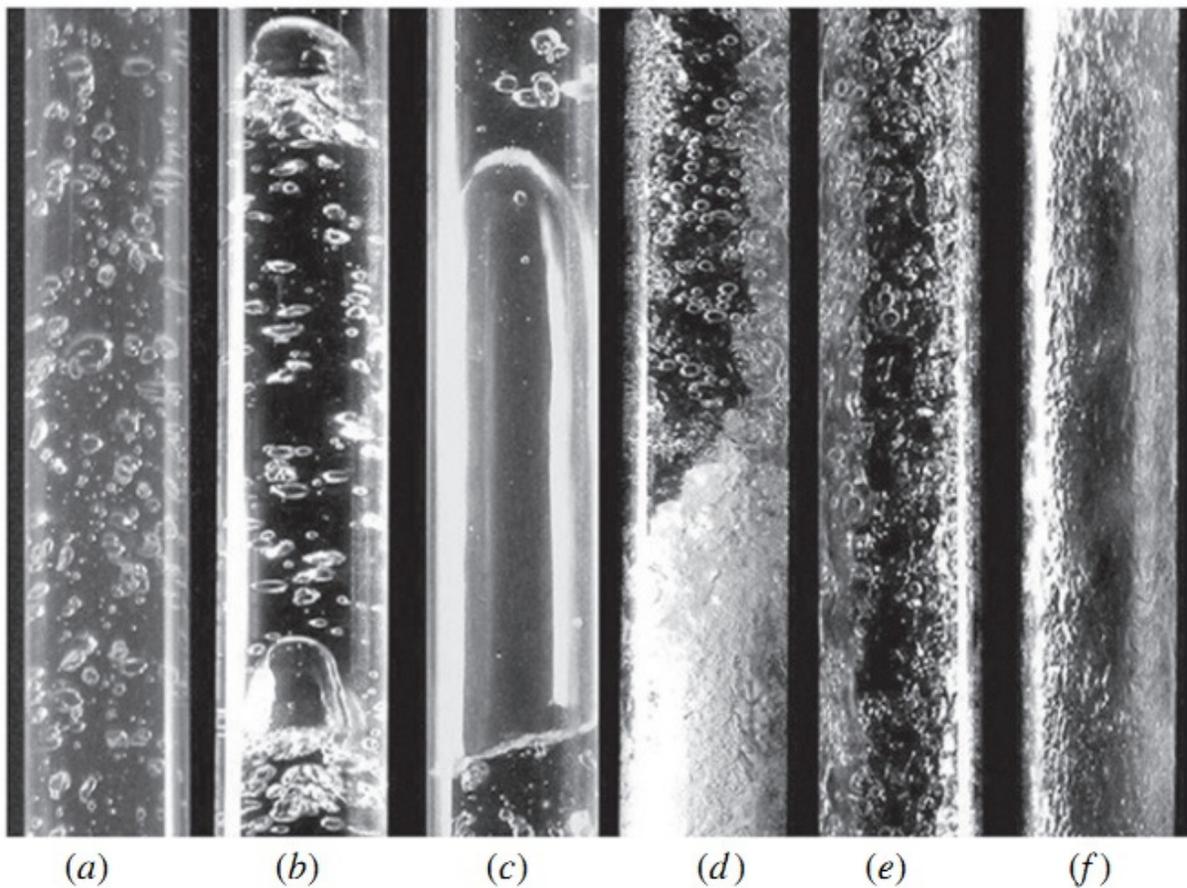


Figura 6-22 – Padrões de escoamento do fluido: (a) – bolhas, (b) – capa esférica, (c) – slug estável, (d) – slug instável, (e) – semi-anular e (f) – anular

Na

Figura 6-22 temos fotos de vários padrões de escoamento tiradas por uma câmera de alta velocidade em um fluido composto pela mistura de água e ar. O padrão recebe seu nome em função de como a água e o ar estão distribuídos na tubulação durante seu deslocamento pela tubulação.

O sinal elétrico do sensor de impedância pode ser usado para saber qual é o tipo de padrão de escoamento do fluido que está em contato com o sensor. Se colocarmos em um gráfico o valor do inverso da impedância no tempo e normalizarmos este gráfico indo de 0 a 1, sendo 0 para tubo vazio, 1 para tubo cheio e um valor intermediário para misturas de ar e líquido (água neste caso), poderemos detectar os diferentes tipos de padrões de escoamento. Da Figura 6-23 à Figura 6-30 temos o sinal no tempo para os padrões de escoamento vistos na Figura 6-22, incluindo os sinais para tubo cheio (Figura 6-23), e para tubo vazio (Figura 6-30).

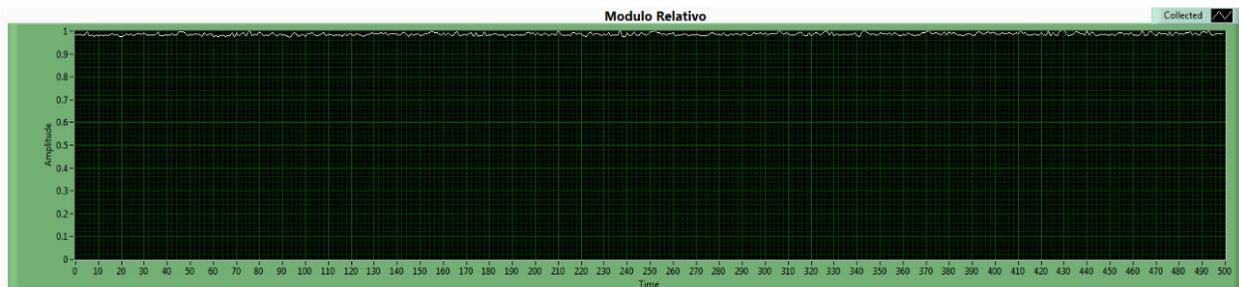


Figura 6-23 – Sinal de impedância no tempo para padrão de tubo cheio

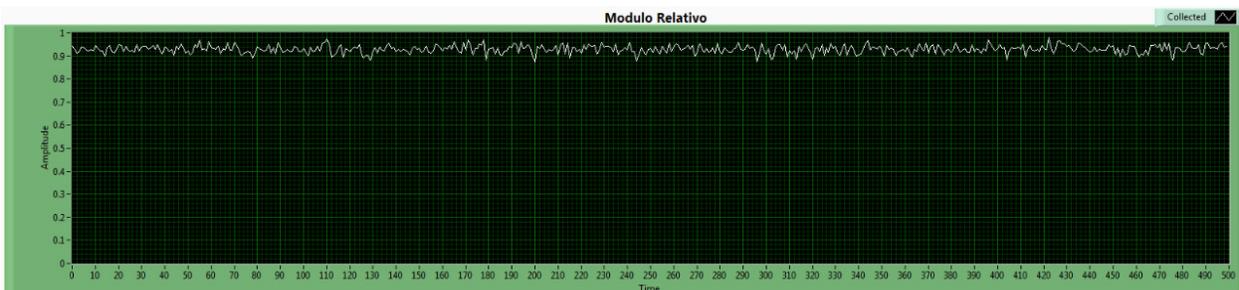


Figura 6-24 – Sinal de impedância no tempo para padrão de bolhas

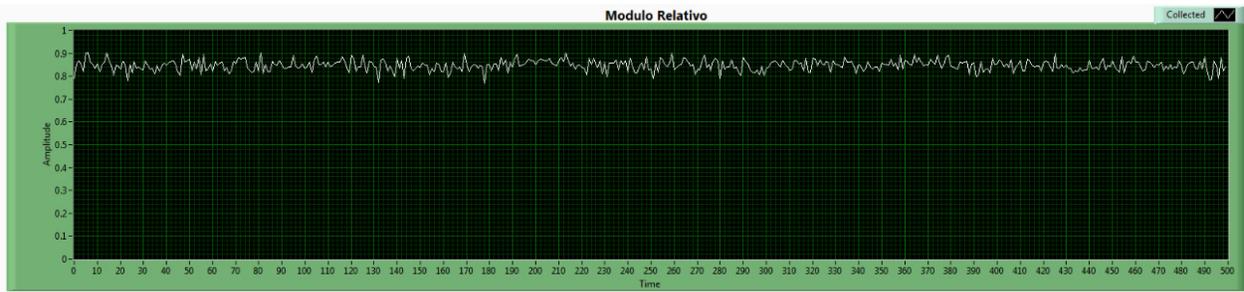


Figura 6-25 - Sinal de impedância no tempo para padrão de capa esférica

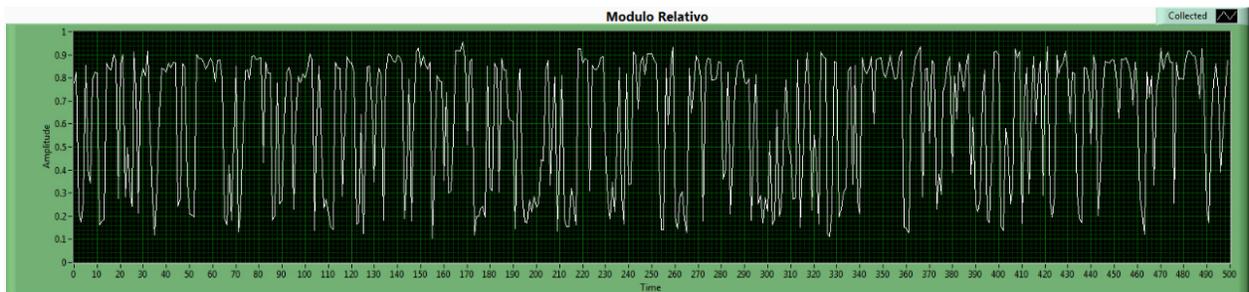


Figura 6-26 - Sinal de impedância no tempo para padrão de slug estável

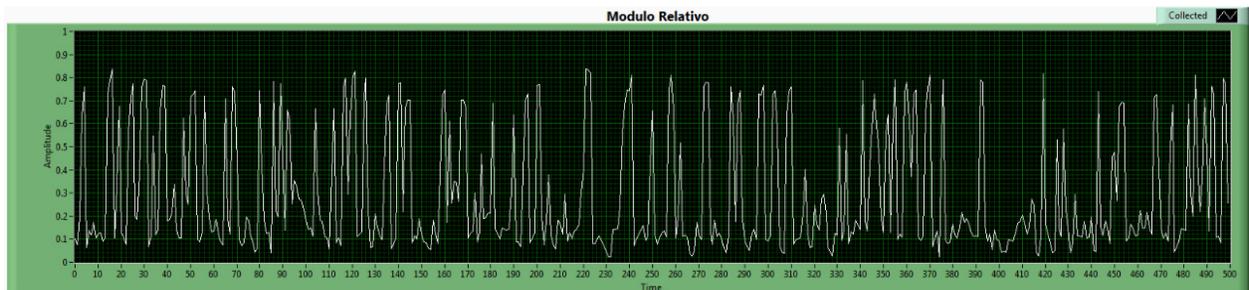


Figura 6-27 - Sinal de impedância no tempo para padrão de slug instável

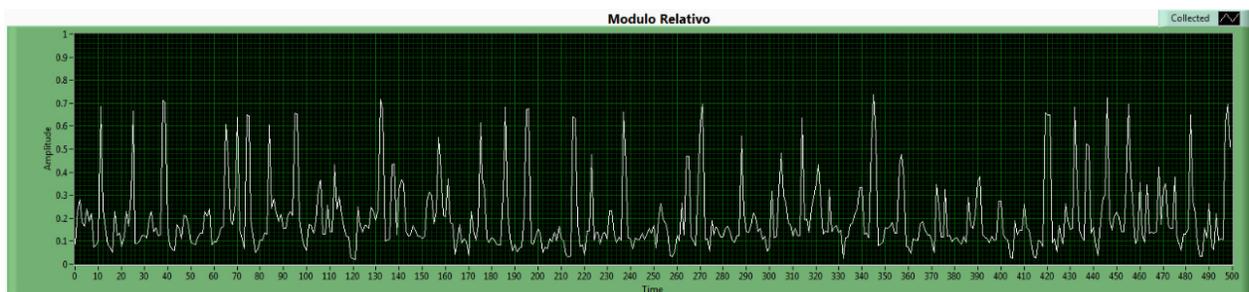


Figura 6-28 - Sinal de impedância no tempo para padrão de semi-anular

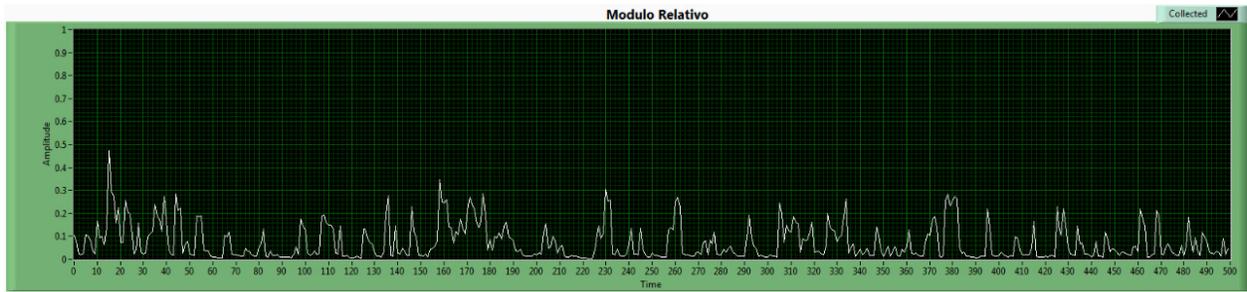


Figura 6-29 - Sinal de impedância no tempo para padrão de anular

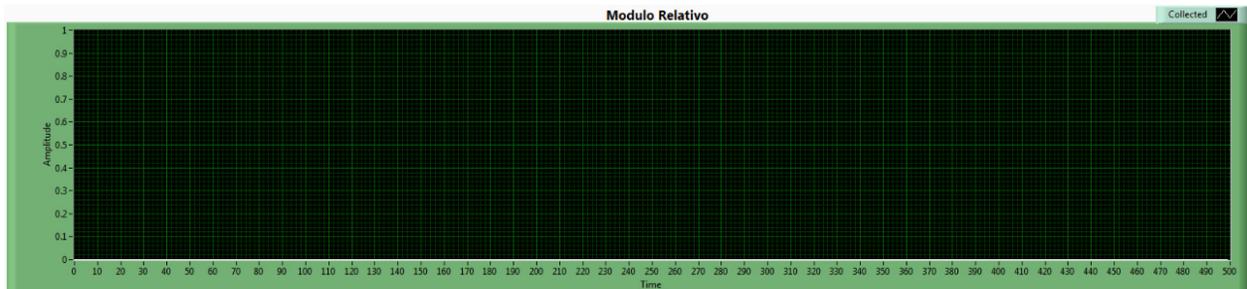


Figura 6-30 - Sinal de impedância no tempo para padrão de vazio

Capítulo 7

Conclusão

O uso de instrumentos de medida no controle e monitoramento de poços de petróleo torna sua produção mais eficiente e lucrativa. Porém, devido ao alto custo dos equipamentos importados, esta prática acaba não sendo viável para os poços de baixa produtividade como os operados com GLI, ainda mais quando se pensa na instalação permanente e individual destes instrumentos nesses poços. É importante lembrar que este instrumento foi inteiramente desenvolvido com tecnologia nacional com respeito à sua concepção e fabricação e atende aos mais severos ambientes de instalação dentro da indústria de petróleo brasileira no que diz respeito à sua flexibilidade na leitura das várias composições de fluidos encontradas e quanto à conformidade com áreas classificadas incluindo áreas com Zona 0. Sua função como medidor de produção estimada em tempo real é somente um exemplo das várias aplicações decorrentes do uso do sinal de impedância do fluido no tempo. Isto não somente evidencia este sensor como um importante instrumento de medida como também viabiliza a pesquisa em outras frentes de trabalho.

Os testes de campo no recôncavo baiano (UOBA) validaram a utilização do sensor na aplicação como medidor da produção estimada e o estudo teórico da função de produção de um poço GLI aliado ao cálculo da produção estimada efetuada pelo sensor nos possibilita a

otimização da produção individual do poço em tempo real através do cálculo do tempo de ciclo ótimo (TC*).

Em continuidade ao trabalho desenvolvido propõe-se a expansão do estudo de otimização para um conjunto de poços operados com GLI além da otimização na utilização de “*Gas-Lift*” utilizada para a injeção dos poços, minimizando o volume injetado para cada ciclo do GLI sem afetar sua produção.

Referências Bibliográficas

- [1] **Brown, K.E.**, 1967. Gas Lift Theory and Practice. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [2] **HUANG, S.M, STOTT, A.L., GREEN, R.G.,and BECK, M.S.:** 'Electronic transducers of industrial measurement of low value capacitances', J. Phys. E., 1988,21,pp. 242-250
- [3] **S. Ayatollahi** et al. / Intermittent gas lift in Aghajari oil field, a mathematical study, Journal of Petroleum Science and Engineering 42 (2004) 245–255
- [4] **Tapabrata Ray, R. S.** / Genetic algorithm for solving a gas lift optimization problem, Journal of Petroleum Science and Engineering 59 (2007) 84–96 .
- [5] **Nereu Carlos Milani de Rorri**, 2006/ Programa de Formação Petrobrás – Curso de engenharia de petróleo CEP 2006-II
- [6] **Eduardo Camponogara, P.H. R. N.** / Solving a gas-lift optimization problem by dynamic programming, European Journal of Operational Research 174 (2006) 1220–1246.
- [7] **José F. Correa. UN-BA/ST/ELV** / Automação de poços GLI
- [8] **Thomas, J. E., Et Al.** / Fundamentos de Engenharia de Petróleo, 2ª Ed. Rio de Janeiro, Interciência, 2001.
- [9] **Odair G. Santos, S.N.B,F. J. S. A.** /Study of dynamics, optimization and selection of intermittent gás-lift methods – a comprehensive model. , Journal of Petroleum Science and Engineering 32 (2001) 231– 248.
- [10] **Rosa, E.S.; Salgado, R.M.; Ohishi, T. ; MASTELARI, N..** / Performance Comparison of Artificial Neural Networks and Expert Systems Applied to Flow Pattern

Identification in Vertical Ascendant Gas-Liquid Flows. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 36, p. 738-754, 2010.

[11] **Brill, J.P., Doerr, T.C., Brown, K.E.**, 1967. An analytical description of liquid slug flow in small diameter vertical conduits. *Trans. AIME* 240, pp. 419–432, JPT, March.

[12] **Brown, K.E., Jessen, F.W.**, 1962. Evaluation of valve port size, surface chokes and fluid fallback in intermittent gas-lift installation. *Trans. AIME* 255, pp. 315–322, JPT, March.

[13] **Chacín, J.E.**, 1994. Selection of optimum intermittent gas-lift scheme for gas-lift wells, *SPE #27986*.

[14] **Santos, O.G., Alhanati, J.S., Bordalo, S.N.**, 1998. Liquid fallback and the performance of intermittent gas-lift. *Proc. of ENCIT-98*, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, vol. 2, pp. 989–994.

[15] **P.H.R. Nakashima, E. Camponogara**, Otimização da alocação de gás de injeção para um conjunto de poços de petróleo operando via gas-lift, in: *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*, 2004 (in Portuguese).

[16] **P. Wang, M. Litvak, K. Aziz**. Optimization of production from mature fields, in: *Proceedings of the 17th World Petroleum Congress*, Rio de Janeiro, Brazil, 2002.

[17] **Baxter L K** 1997 *Capacitive Sensors. Design and Applications* (Piscataway, NJ: IEEE)

[18] **Marioli D, Sardini E and Taroni A** 1993 High-accuracy measurement techniques for capacitance transducers *Meas.Sci. Technol.* **4** 337–43

[19] **Kolle C and Leary P O** 1998 Low-cost, high-precision measurement system for capacitive sensors *Meas. Sci. Technol.* **9** 510–7

[20] **Reverter F, Li X and Meijer G C M** 2006 Stability and accuracy of active shielding for grounded capacitive sensors *Meas. Sci. Technol.* **17** 2884–90

[21] **Reverter F, Li X and Meijer G C M** 2007 Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor *Sensors Actuators A* **138** 1–8

[22] **Haase W C** 2004 Digital measurement circuit and system using a grounded capacitive sensor *US Patent* 6,700,392