



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PETRÓLEO

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS E CONTROLE
APLICADO AO MÉTODO DE ELEVAÇÃO DE BOMBEIO POR
CAVIDADES PROGRESSIVAS**

THALITA LEANDRA DE OLIVEIRA COSTA

Julho, 2020
NATAL/RN

THALITA LEANDRA DE OLIVEIRA COSTA

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS E CONTROLE
APLICADO AO MÉTODO DE ELEVAÇÃO DE BOMBEIO POR
CAVIDADES PROGRESSIVAS**

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Petróleo.

Orientadora: Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli

Coorientador: Dr. André Laurindo Maitelli

Julho, 2020

NATAL/RN

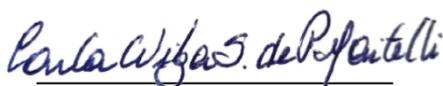
Orientador (a): Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS E CONTROLE
APLICADO AO MÉTODO DE ELEVAÇÃO DE BOMBEIO POR
CAVIDADES PROGRESSIVAS**

Natal, Julho de 2020

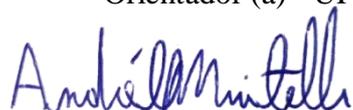
A aluna **Thalita Leandra de Oliveira Costa** foi considerada aprovada no seu trabalho de conclusão para obtenção do título de **Formação em Engenharia de Petróleo**.

BANCA EXAMINADORA



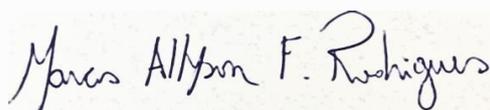
Prof. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli

Orientador (a) - UFRN



Prof. Dr. André Laurindo Maitelli

Membro examinador(a) - UFRN



Prof. Dr. Marcos Allyson Felipe Rodrigues

Membro examinador(a) – UFRN

COSTA, T. L. O. Estudo e Implementação de Técnicas e Controle Aplicado ao Método de Elevação de Bombeio Por Cavidades Progressivas. 2020. TCC (Graduação) – Curso Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2020.

Orientadora: Prof^a. Dr. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli

RESUMO

Na indústria de Petróleo, a busca por eficiência e melhor desempenho de suas aplicações são contínuas e de extrema importância econômica para a indústria. No Brasil, a utilização do Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP) iniciou em 1982 no campo de Fazenda Belém, localizado no Ceará, e vem se mantendo em constante evolução ao longo dos anos. Diante disso, o acompanhamento de poços produtores, equipados pelo sistema BCP são realizados através de registros de *Sonolog*, sendo esse o sensor responsável pelo registro do nível de fluido. No entanto, os custos de instalação e manutenção de sensores aumentam o custo total do sistema de bombeio e a substituição ou manutenção dos mesmos pode exigir que as operações da bomba sejam suspensas. O nível de fluido contido no anular representa uma importante variável para controle, pois conforme Peterson (2014), a partir desse parâmetro, pode-se proteger a bomba contra danos, otimizar a operação da bomba, aumentar a eficiência da bomba e aumentar a sua produção. Nesse trabalho é proposto uma nova estratégia de controle, na qual desenvolveu-se uma ferramenta com o objetivo de controlar a submersão para que, com essa aplicação, as necessidades da utilização de equipamentos registradores de níveis e o nível dinâmico do fluido sejam usados a fim de evitar danos a bomba e melhorias na produção e operação.

Palavras-Chaves: Bombeio por Cavidades Progressivas, Submersão, Controle e Sensor.

COSTA, T. L. O. Estudo e Implementação de Técnicas e Controle Aplicado ao Método de Elevação de Bombeio Por Cavidades Progressivas. 2020. TCC (Graduação) – Curso Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2020.

Tutor: Prof^a. Dr. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli

ABSTRACT

In the oil industry, the search for efficiency and better performance of its applications is continuous. In Brazil, the use of Progressive Cavity Pumping (PCP) started in 1982 in the Fazenda Belém field, located in Ceará, and has been constantly evolving over the years. Then, the monitoring of producer wells, equipped by the PCP system, are performed through *Sonolog* records, being the sensor responsible for recording the fluid level. However, sensor installation and maintenance costs increase the total cost of the pumping system and sensor replacement or repair may require that pump operations be suspended. The fluid level contained in the ring represents an important variable to control, because according to Peterson (2014) from this parameter can protect the pump from damage, optimize pump operation, increase pump efficiency and/or increase production. Therefore, this study proposes a new control strategy, in which a control tool was developed to control the fluid level in the annulus so that with this application, it aims to alleviate the needs of using recording equipment control the fluid level to avoid pump data and improvements in production and operation.

Keywords: Progressive Cavity Pump, Fluid Level, Control and Sensor.

Dedico este trabalho aos meus pais, *Francisca Guedes* e *Francisco Leandro*, que são meus maiores incentivadores e base para a busca do saber. Aos meus *Professores*, pela disseminação do conhecimento em prol da sociedade em toda minha jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à força superior que rege o Universo, por me guiar e me apoiar nos momentos de descontentamentos e dificuldades.

Aos meus pais, que são minha base de apoio durante todos os meus anos de vida, que se esforçaram para que minha única preocupação e dedicação fosse voltada aos estudos.

A Junior Cavalcante, por todo apoio, amor e paciência. Aos meus amigos, que sempre torceram pelas realizações dos meus objetivos.

À minha Orientadora Prof. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli, por contribuir para minha formação, pela orientação e paciência para que as dúvidas fossem sanadas.

Ao meu Co-orientador, Prof. Dr André Laurindo Maitelli, por abrir portas para pesquisa acadêmica no LAUT, que tanto me acrescentou e me guiou durante dois anos de muito aprendizado.

À Eliara Medeiros, por toda orientação, ensinamentos e conselhos que tanto contribuíram para o desenvolvimento da minha vida acadêmica.

Aos meus colegas do LAUT e do projeto CONTELEV, Aliadine, Gabriel, Rhacley, Allana e Afonso, pela amizade e conhecimentos trocados.

À empresa PETROBRAS, pelo incentivo à pesquisa acadêmica na Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Ao Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT/UFRN), pelo acolhimento e parceria para o desenvolvimento de pesquisa.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	15
1.2	Estrutura da Pesquisa	15
2	ASPECTOS TEÓRICOS	17
2.1	Bombeio por Cavidades Progressivas	17
2.2	Determinação do nível de fluido a partir para poços BCP	19
2.3	Controle de Processo	22
2.3.1	Controle PID	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	Simulador de Bombeio por Cavidades Progressivas	25
3.2	Controle PID aplicado ao BCP	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	45
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Componentes da Bomba de Cavidades Progressivas.....	17
Figura 2.2 Configuração de um poço esquipado pelo BCP	18
Figura 2.3 Representação dos níveis nos poços equipados pelo BCP	21
Figura 2.4 Controle em malha aberta.....	22
Figura 2.5 Controle em malha fechada	22
Figura 3.1 Interface do Simulador BCP.....	25
Figura 3.2 Esquema da entrada de dados do Simulador BCP	26
Figura 3.3 Interface das variáveis de saída do sistema do Simulador BCP	27
Figura 3.4 Diagramas de blocos para o controlador no sistema BCP	28
Figura 3.5 Interface Gráfica da Tela Inicial do Controlador	29
Figura 3.6 Diagrama de blocos da interação simulador BCP e o controlador BCP	30
Figura 4.1 Controle da Submergência em malha aberta	34
Figura 4.2 Controle da Velocidade de Rotação do Motor em malha aberta	35
Figura 4.3 Comportamento da Rotação do Motor em malha fechada	36
Figura 4.4 Comportamento da Submergência em malha fechada	37
Figura 4.5 Comparativo da submergência do simulador e Peterson.....	39
Figura 4.6 Comportamento da rotação do Motor.....	39
Figura 4.7 Comportamento da Submergência poço II.....	41
Figura 4.8 Comportamento da Rotação do Motor	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Dados do Reservatório e Propriedades do Fluido do Poço I e Poço II	311
Tabela 3.2 - Características Gerais do Poço I e Poço II	31
Tabela 3.3 - Dados do Revestimento do Poço I e Poço II.....	32
Tabela 4.1 - Sintonias PID da simulação 1	36
Tabela 4.2 - Sintonia para a submersão 1.....	38
Tabela 4.3 - Sintonias PID da simulação para o poço II.....	40

LISTA DE SÍMBOLOS

$u(t)$:	Sinal de saída do sistema no instante t .
K_p :	Coefficiente da ação proporcional.
$e(t)$:	Sinal de erro na entrada do controlador no instante t .
K_i :	Coefficiente da ação integral.
K_d :	Coefficiente da ação derivativa
T_i :	Tempo integrativo
T_d :	Tempo derivativo
dt :	Derivada do instante a ser processado
t :	Instante do estado a ser processado.
rpm:	Rotação por minuto
m:	Metros
s :	Segundos
T_{has} :	Torque da Haste
T_{mot} :	Torque do Motor
Gr:	Relação de engrenagens
T_b :	Torque da Bomba
Prec:	Pressão de recalque
P_{suc} :	Pressão de Sucção
D_b :	Deslocamento da Bomba
$T_{tabelado}$:	Torque Tabelado
ΔP :	Diferencial de Pressão
P_{adm} :	Pressão de Admissão
H_b :	Profundidade da Bomba
γ_t :	Peso específico no tubing
Pent:	Pressão de entrada
H_{sub} :	Submergência da Bomba
γ_c :	Peso específico do fluido na coluna de produção
Nd:	Nível dinâmico

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Na indústria do petróleo, a busca pela eficiência na produção de energia é contínua, visto que, na maioria dos casos, na vida produtiva de um poço, a energia em forma de pressão torna-se insuficiente, exigindo a remoção artificial dos fluidos retidos no reservatório para superfície por meio da aplicação dos métodos de elevação artificial. Para realizar a seleção do método de elevação artificial adequado, conforme Assmann (2008), é necessário levar em conta fatores como: características de reservatório, características de perfuração e de completação do poço, facilidades de produção disponíveis, tipo de fluido produzido, presença ou não de abrasivos, corrosivos e outros contaminantes, localização do poço, custos operacionais e facilidades de instalação e operação.

Nesse contexto, os métodos de elevação artificial dividem-se em dois grupos: os pneumáticos e os de bombeamento. Os principais métodos enquadrados nos pneumáticos são: o *Gas Lift, Contínuo* (GLC) e o *Intermitente* (GLI), além do *Plunger Lift*. Para os métodos classificados como de bombeamento tem-se: o *Bombeio Mecânico* (BM), *Bombeio Centrífugo Submerso* (BCS) e o *Bombeio por Cavidades Progressivas* (BCP), foco principal deste trabalho.

O método BCP é recente, quando comparado aos outros, no Brasil, a sua utilização começou em 1982, no campo de Fazenda Belém, Ceará, e de acordo com Mathews *et al* (2002), o BCP tem mostrado maior capacidade de superar suas próprias limitações diante de enormes perspectivas de evolução tecnológica. Esse sistema de elevação artificial é utilizado na bacia potiguar em terra, em Sergipe e Alagoas, na Bahia e Espírito Santo e também é usado em testes de poços da Bacia de Campos, no Litoral do Rio de Janeiro (ASSMANN, 2008). Além disso, atualmente, segundo a Petrobras (2019), na UO-RNCE (Unidade de Operações do Rio Grande do Norte/Ceará), o número de poços equipados pelo sistema por cavidades progressivas é de 128 poços.

Para acompanhar poços são realizados testes de produção, verificação de vibrações no cabeçote e registros de *Sonolog*. O registro denominado *Sonolog*, que é um registrador sônico de nível e é importante para determinação do nível dinâmico de fluido no anular. O nível de fluido contido no anular é essencial para controle de poços equipados com BCP, pois, a partir desse parâmetro, pode-se proteger a bomba contra danos, otimizar a operação, aumentar a eficiência da bomba e/ou aumentar a produção (PETERSON, 2014).

Diante disso, nesta pesquisa foi proposto um método de cálculo para determinação do nível dinâmico do fluido e submergência, sem a utilização de sensores, para poços operando por Bombeio por Cavidades Progressivas, através de um simulador específico que permitirá testes com poços virtuais para validação. A pesquisa foi desenvolvida no âmbito do projeto de pesquisa CONTELEV, uma parceria UFRN/PETROBRAS. Uma ferramenta foi proposta com o objetivo de controlar o nível de fluido por meio rotação da bomba e, conseqüentemente, amenizar as necessidades da utilização de equipamentos registradores de níveis, controlar o nível de fluido, a fim de evitar danos bomba como também alcançar uma otimização na produção e operação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O estudo proposto tem como objetivo geral a determinação da submergência no método de elevação artificial bombeio por cavidades progressivas e o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de controlar a submergência, a partir dos parâmetros de funcionamento do motor e da bomba, sem a utilização de sensores no poço, visto que, atualmente, sua medição é feita a partir do aparelho *Sonolog*.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Realizar o cálculo da determinação da submergência e o nível dinâmico a partir dos parâmetros do motor e bomba;
- b) Desenvolver e implementar a estratégia de controle para o cálculo do nível de fluido;
- c) Realizar a implementação do algoritmo de controle na linguagem de programação JAVA;
- d) Validar o algoritmo de controle utilizando poços virtuais no Simulador BCP.

1.2 Estrutura da Pesquisa

No Capítulo I, foi desenvolvida a introdução sobre a temática do trabalho, incorporando as justificativas e a relevância do assunto para indústria. Além disso, foram adicionados os objetivos, geral e específicos, do trabalho a serem cumpridos.

O Capítulo II abordará toda a teoria para o desenvolvimento e a aplicação do estudo, que será fundamental para o entendimento teórico das próximas etapas. Especificamente, nesse capítulo, será feito um levantamento bibliográfico sobre o método de elevação artificial bombeio por cavidades progressivas (BCP), a forma de cálculo utilizada para obtenção do nível dinâmico do fluido e o detalhamento do controle de processos aplicados ao BCP.

No Capítulo III será apresentada a metodologia adotada para o desenvolvimento da técnica aplicada, em que se detalha a abordagem da pesquisa e os passos definidos para a produção e avaliação dos resultados, como também os parâmetros utilizados no controle desenvolvido para obtenção dos resultados.

O Capítulo IV apresentará os resultados e as discussões envolvendo a técnica e os estudos apresentados, bem como as simulações para validação do método proposto. E, por fim, no Capítulo V, serão apresentadas as conclusões dos resultados e as recomendações para trabalhos futuros e por fim, no Capítulo VI, as referências bibliográficas.

CAPÍTULO II

ASPECTOS TEÓRICOS

2 ASPECTOS TEÓRICOS

Este capítulo tem como objetivo principal a apresentação de alguns conceitos relevantes para o entendimento da proposta do estudo.

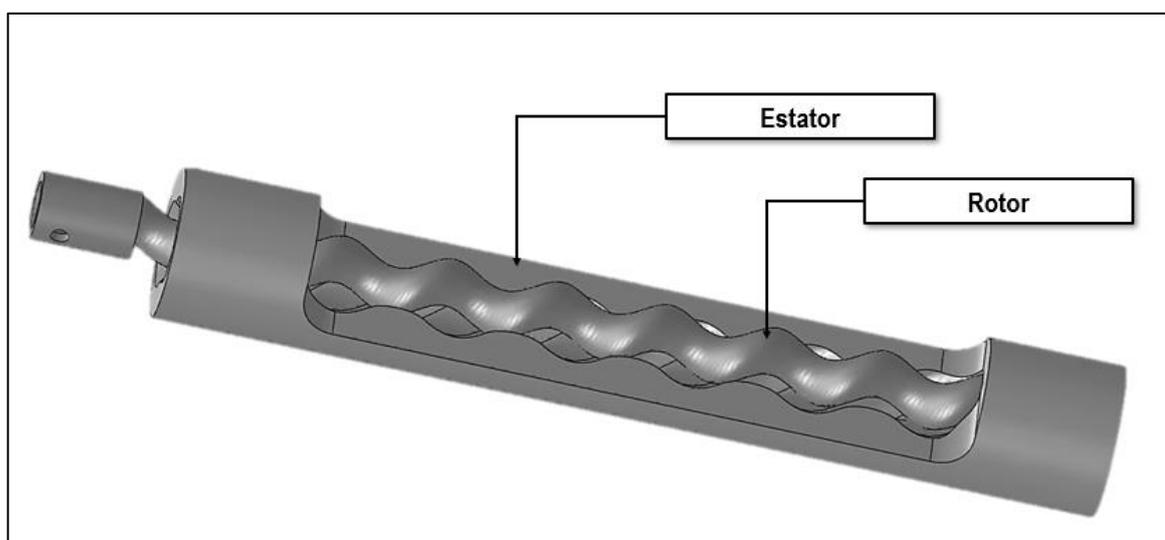
2.1 Bombeio por Cavidades Progressivas

O Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP) é um método de elevação artificial em que a transferência de energia ao fluido é feita através de uma bomba de cavidades progressivas, concebida no final da década de 1920 por René Moineau.

Segundo Carvalho *et al* (2008), a utilização comercial do BCP como método de elevação de petróleo é mais recente. Iniciou-se no Canadá, na década de 1980, com o objetivo de bombear óleos pesados e viscosos, com elevado teor de areia, de reservatórios rasos (até 500 m de profundidade), a vazões relativamente baixas (abaixo de 20 m³/d).

A bomba característica desse método, ilustrada na Figura 2.1, consiste em um rotor no formato de uma hélice simples externa que, ao girar dentro de um estator moldado no formato de uma hélice dupla interna, produz uma ação de bombeio (VIDAL, 2005).

Figura 2.1 Componentes da Bomba de Cavidades Progressivas



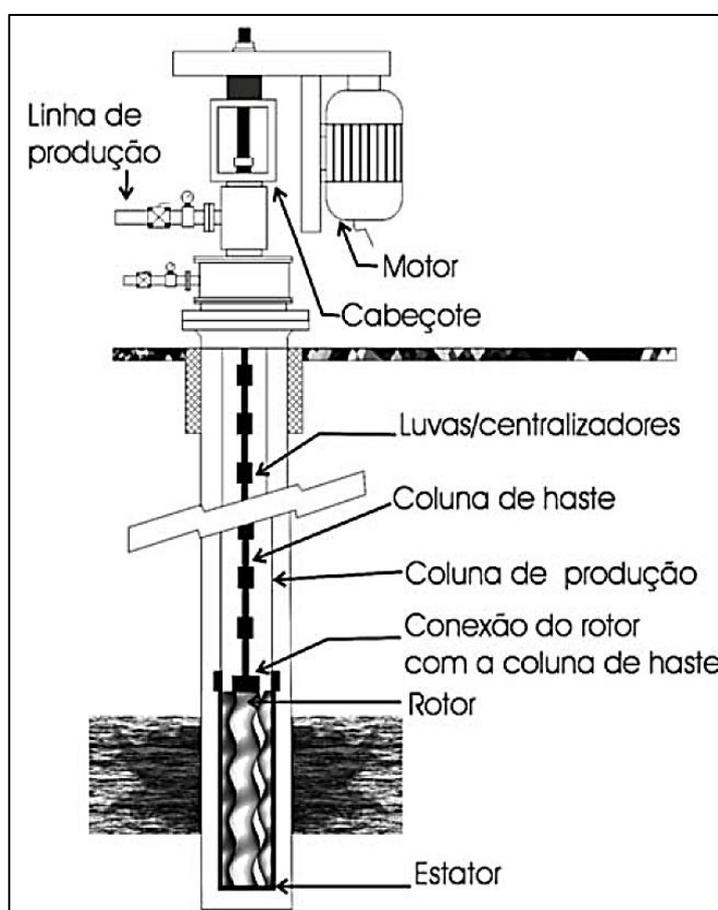
Fonte: Adaptada de Fluidresearch.

Esse método possui vantagens frente a outros métodos, pois tem maior adaptação à produção de óleos viscosos, capacidade de produção com altas concentrações de areia, ausência de válvulas que estão sempre sujeitas a acelerado desgaste, boa resistência à abrasividade, baixa

manutenção e baixo investimento inicial. No entanto, há também limitações no que se diz respeito à produção (máximo de 500 m³/dia), elevação (máximo de 200m), temperatura do fluido (máximo de 170°C), sensibilidade à presença de aromáticos (CO₂ e H₂S) e pequena experiência acumulada (VIDAL, 2005).

O conjunto de equipamentos componentes do sistema BCP, ilustrado na Figura 2.2, possui um motor, cabeçote, linha de produção, luvas/centralizadores, coluna de haste, coluna de produção, conexão do rotor com a coluna de haste, rotor e estator.

Figura 2.2 Configuração de um poço esquipado pelo BCP



Fonte: Vidal, 2005.

Para o acompanhamento do poço produtor BCP é realizado um teste de produção, uma verificação de vibrações no cabeçote e os registros de *Sonolog*, conforme citado na introdução deste trabalho, sendo esse último uma ferramenta com a função de medir o nível de fluido do poço, prevenindo falhas ou problemas operacionais durante o bombeio.

2.2 Determinação do nível de fluido a partir para poços BCP

Na indústria de petróleo, o método de elevação artificial de bombeio por cavidades progressivas tem como cenário atual para a medição do nível de fluido de um poço, o uso do aparelho *Sonolog*, citado na seção de introdução do Capítulo I. Contudo, visando a eliminação desse sensor para a medição do nível e reduzindo os custos de instalação, operação e manutenção, optou-se por estudar o método desenvolvido por Peterson (2014) o qual, a partir dos parâmetros de motor e bomba, determina a submergência e nível dinâmico do poço, em que a submergência é o nível de fluido acima da sucção da bomba e o nível dinâmico é a profundidade do nível dentro do poço, quando está em bombeamento.

Nesse enquadramento, segundo Peterson (2014), a determinação da submergência (H_{sub}) no poço BCP é primeiramente realizada na determinação do toque da haste (T_{has}), que é baseado no torque do motor (T_{mot}) e na relação de engrenagens da (G_r) e é dado pela Equação 2.1,

$$T_{has} = T_{mot} * G_r \quad (2.1)$$

na qual o T_{mot} é calculado a partir dos dados elétricos do motor (corrente e tensão) e a relação de engrenagens (unidade adimensional) está relacionada nas relações dos diâmetros das polias movida e motora e em função da velocidade no cabeçote. Além disso, no caso dos torques, a unidade para o Sistema Internacional (SI) utilizada é o Newton-metro (N.m).

Em seguida, de acordo com Peterson (2014), calculou-se o torque da bomba (T_b) com base nas pressões de recalque (P_{rec}) e sucção (P_{suc}), no deslocamento da bomba (d_b) e no torque tabelado ($T_{tabelado}$), que é um toque obtido por um método experimental. A expressão para o torque da bomba, de acordo com Peterson (2014), é dada pela Equação 2.2,

$$T_b = T_{has} - [(P_{rec} - P_{suc}) * d_b] - T_{tabelado} \quad (2.2)$$

em que o termo entre os colchetes é o torque hidráulico (T_{hid}) dado em N.m, o deslocamento da bomba d_b é dado em m³/d/rpm, as pressões em N/m² e o torque $T_{tabelado}$ em N.m.

Calcula-se o diferencial de pressão (ΔP), pela razão do torque da bomba (T_b), e o deslocamento da bomba (d_b) mostrado na Equação 2.3.

$$\Delta P = \frac{T_b}{d_b} \quad (2.3)$$

esse diferencial de pressão é dado em N/m².

E ainda, calcula-se a pressão de admissão da bomba (P_{adm}) em relação à profundidade da bomba (H_b), do diferencial ΔP e do peso específico do fluido no *tubing* (γ_t), dada pela Equação 2.4.

$$P_{adm} = (H_b * \gamma_t) - \Delta P \quad (2.4)$$

Com a pressão de admissão, determina-se a pressão de entrada da bomba (P_{ent}), em função da pressão de admissão e da pressão de sucção, descritas anteriormente. Então, a expressão característica dessa pressão é dada pela Equação 2.5,

$$P_{ent} = P_{suc} + P_{adm} \quad (2.5)$$

em que, a P_{ent} é dada em N/m^2 .

A submergência da bomba (H_{sub}) pode ser determinada em função da pressão de entrada P_{ent} e do peso específico do fluido presente na coluna de produção (γ_c). A submergência (H_{sub}) será dada pela Equação 2.6:

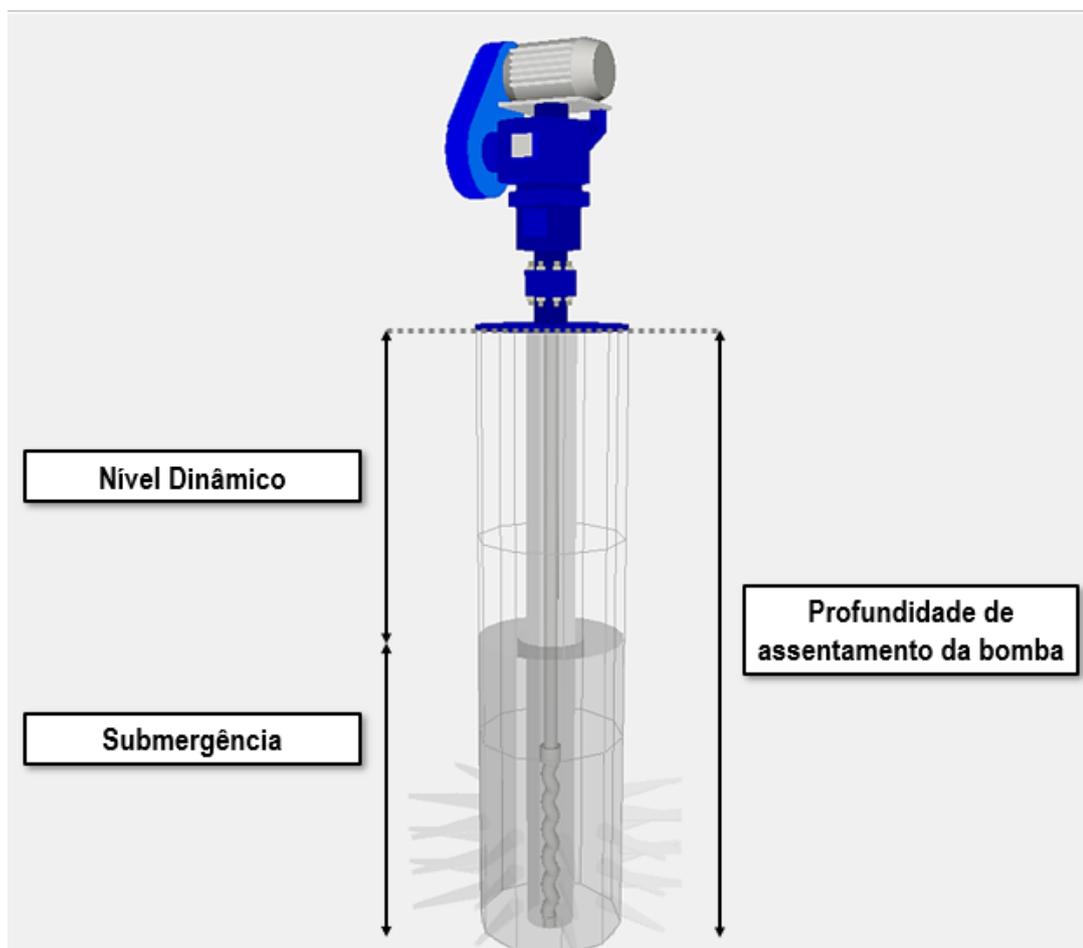
$$H_{sub} = \frac{P_{ent}}{\gamma_c} \quad (2.6)$$

onde, H_{sub} é dada em unidade de comprimento (m) e o peso específico em N/m^3 . Portanto, o nível dinâmico (ND) é dado a partir de diferença entre a submergência do poço e a profundidade da bomba, conforme a Equação 2.7:

$$ND = H_b - H_{sub} \quad (2.7)$$

O nível dinâmico representa a profundidade medida a partir da superfície até o nível do fluido. Para exemplificar e compor o raciocínio empregado pelo método de Peterson (2014), é importante entender a relação entre nível dinâmico, submergência e profundidade da bomba exemplificada na Figura 2.3 a seguir.

Figura 2.3 Representação dos níveis nos poços equipados pelo BCP



Fonte: Adaptada Vidal, 2005.

Ao analisar a Figura 2.3, pode-se perceber as diferentes medições no BCP entre nível dinâmico, submersão e profundidade da bomba, em que o nível dinâmico é a profundidade medida a partir da superfície até atingir o nível do fluido; a submersão é a profundidade medida a partir do nível dinâmico até a bomba de fundo e, por fim, a profundidade de assentamento da bomba, que é medida desde a superfície do equipamento BCP até a bomba de fundo.

Além disso, segundo Peterson (2014), os custos de instalação e manutenção do sensor aumentam o custo total do sistema de bombeio e a substituição ou manutenção dos sensores pode exigir que as operações da bomba sejam suspensas. Portanto, os custos de instalação, operação e manutenção podem ser reduzidos e a produtividade e confiabilidade do sistema podem ser melhoradas, eliminando, assim, a colocação de sensores dentro do poço e determinando o nível a partir dos parâmetros da bomba e do motor.

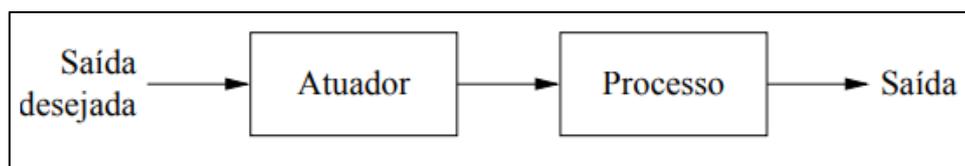
Portanto, com a determinação do nível, a partir do método descrito, é possível realizar também o controle do nível por meio do desenvolvimento e da implementação de estratégias de controle que possam realizar essa tarefa, possibilitando o monitoramento do poço e, conseqüentemente, o aumento da produção.

2.3 Controle de Processo

O controle é um componente importante e intrínseco pois, por meio dele é possível otimizar e aumentar de forma significativa o desempenho dos sistemas, além de diminuir o trabalho braçal realizado ao longo dos processos, tornando-se essencial nos campos da engenharia e ciência (OGATA, 2008).

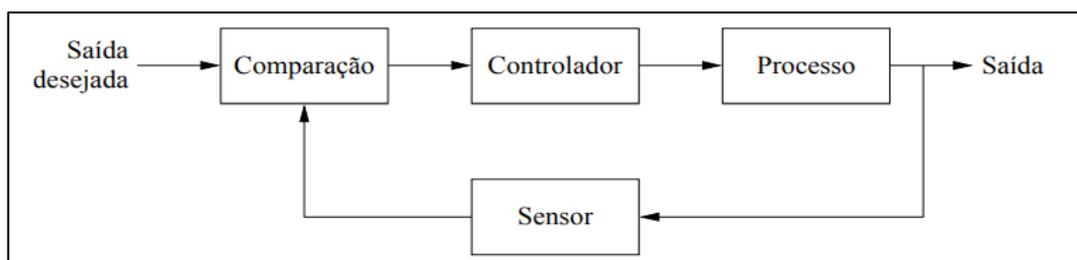
Segundo Ogata (2008), os sistemas de controle podem ser divididos em controle de malha aberta ou fechada. De forma genérica, para se obter o desempenho requerido, é necessário que um atuador controle o funcionamento da bomba através de algum ou alguns parâmetros a serem definidos pelo operador, independente do sistema. Em um sistema de controle de malha aberta, consiste em um sistema que não possui realimentação, ilustrado na Figura 2.4, utiliza-se de um atuador para se obter a resposta desejada pois não exige uma comparação sobre o valor desejado e o valor obtido na saída, de forma que haja um melhor resultado e, desta forma, um melhor desempenho do sistema seja obtido.

Figura 2.4 Controle em malha aberta



Fonte: Autor, 2019.

Figura 2.5 Controle em malha fechada



Fonte: Autor, 2019.

Segundo OGATA (2008), em contraste ao controle em malha aberta, o controle em malha fechada, representado na Figura 2.5, utiliza uma medida da saída para compará-la com a saída desejada (entrada de referência) a partir de um sinal de realimentação.

2.4 Controle PID

O controlador PID (proporcional integral derivativo) é amplamente utilizado em processos industriais, pois possui uma estrutura relativamente simples, mas suficiente para o uso em inúmeros processos, visto que, segundo Silva (2017), cerca de 98% dos sistemas de controle na indústria utilizam controladores PI (proporcional integral).

A saída do controlador PID é um sinal composto por três componentes de controle: proporcional (K_p), integral (K_i) que é dado pela razão entre o K_p e T_i , e o derivativo (K_d) em cujo valor é estimado pelo produto entre o K_p e T_d , onde $e(t)$ representa o sinal de erro (desvio do valor de controle desejado, *setpoint*). O controlador Proporcional, Integrativo e Derivativo (PID) gera sua saída proporcionalmente ao erro, à integral do erro e à derivada do erro. A equação seguir apresenta a forma ideal do controlador PID:

$$u_{(t)} = K_p \cdot \left(e_{(t)} + \frac{1}{T_i} \int e(t) + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.8)$$

Segundo Assmann (2017), o controle operacional do sistema BCP tem tradicionalmente se restringido ao acompanhamento de nível de fluido no anular e ao ajuste de velocidade de rotação da haste polida através de mudança de relação de diâmetro das polias. Este ajuste de velocidade leva o poço a trabalhar com uma velocidade maior que a ideal em determinadas situações, fazendo com que a bomba trabalhe por longo período a seco com a consequente redução de sua vida útil, ou, caso contrário, quando a velocidade for menor que a ideal, fazendo com que haja perda de produção e aumento do custo operacional.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

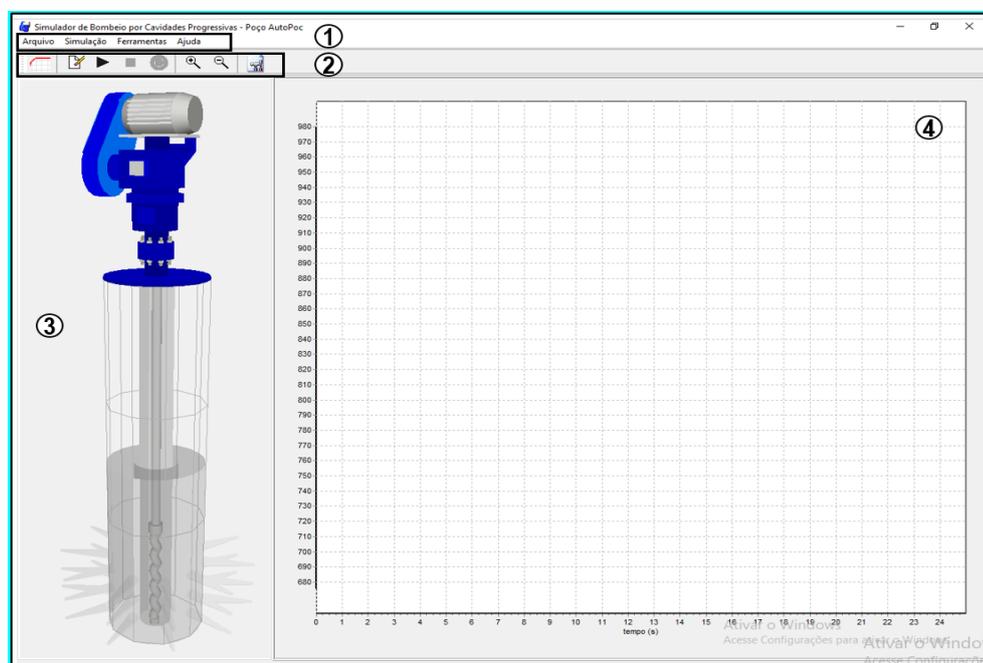
3 METODOLOGIA

Este capítulo começa com a apresentação de uma ferramenta computacional auxiliar, o simulador BCP, que é utilizado em paralelo com a técnica desenvolvida, fornecendo dados iniciais e sendo fonte de validação dos resultados. Além disso, de forma detalhada, descreve-se a metodologia utilizada para determinação do nível de fluido e, por fim, o procedimento utilizado para o controle do nível.

3.1 Simulador de Bombeio por Cavidades Progressivas

A fim de dispor de uma ferramenta computacional capaz de representar o comportamento dinâmico quando submetidos a diferentes condições operacionais de um poço equipado pelo sistema de elevação BCP, recorreu-se ao Simulador de Bombeio de Cavidades Progressivas desenvolvido por Vidal (2005), para auxiliar no desenvolvimento deste trabalho. O simulador é composto por uma interface, ilustrada na Figura 3.1.

Figura 3.1 Interface do Simulador BCP



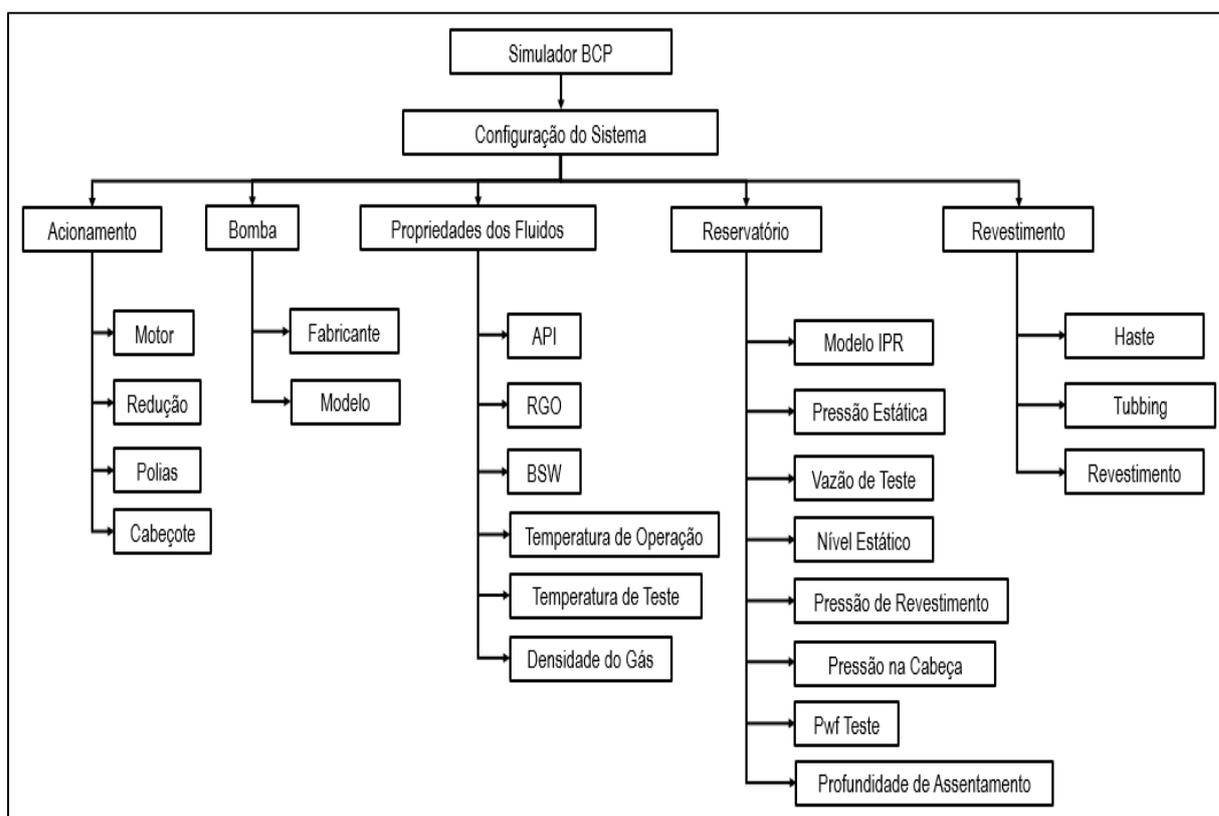
Fonte: Adaptada Vidal, 2005.

Na Figura 3.1, a seção 1 é composta pelas opções de arquivo, simulação, ferramentas e ajuda, respectivamente, que tem com função direcionar o usuário às funcionalidades do

simulador. Na seção 2, a primeira opção mostra as saídas e configura os gráficos desejados, a opção de apagar gráfico, continuar simulação, parar a simulação, desligar o motor, aumentar o zoom do gráfico, diminuir o zoom do gráfico e as configurações do sistema, nessa sequência. Já as sessões 3 e 4 ilustram o equipamento BCP e as curvas da saída desejada no tempo, respectivamente.

Na aba “configuração do sistema”, descrito anteriormente, é possível inserir os dados de entrada do poço virtual na qual são subdivididos em: acionamento, bomba, propriedades dos fluidos, reservatórios e revestimento. O esquema da entrada de dados do Simulador BCP é ilustrado de acordo com a Figura 3.2.

Figura 3.2 Esquema da entrada de dados do Simulador BCP

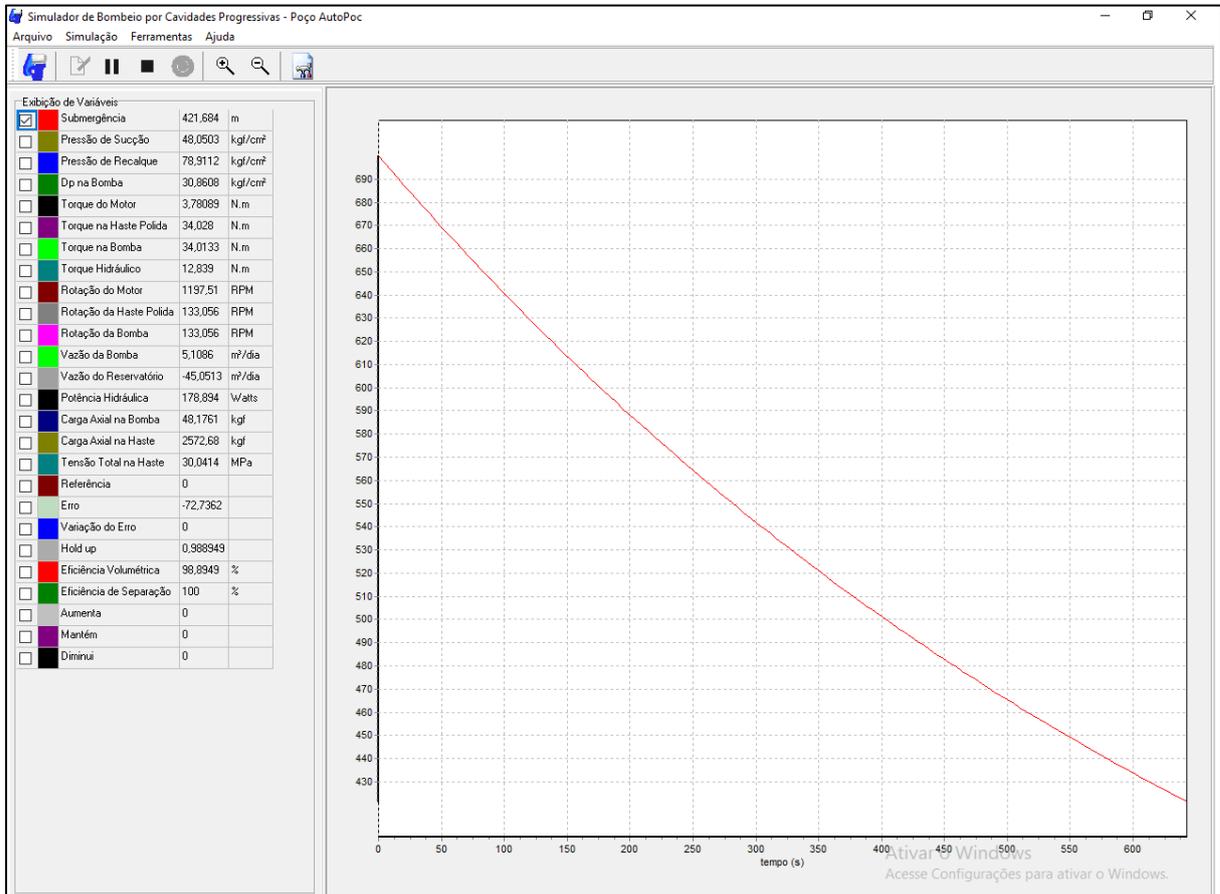


Fonte: Autora, 2019.

Além disso, na seção de 4, encontram-se as curvas e valores numéricos das variáveis de saída do sistema: pressão de sucção (P_{suc}), recalque (P_{rec}), torque da bomba (T_b), torque do motor (T_m), torque da haste (T_{has}), torque hidráulico (T_{hid}), o diferencial de pressão (ΔP) e ainda, as vazões e rotações da bomba. Todas essas variáveis de saídas são importantes para a rotina

de cálculo proposta para determinar o nível de fluido no anular. A interface de saída é ilustrada de acordo com Figura 3.3. Para cada variável tem-se uma curva de cor correspondente.

Figura 3.3 Interface das variáveis de saída do sistema do Simulador BCP



Fonte: Adaptada Vidal (2005).

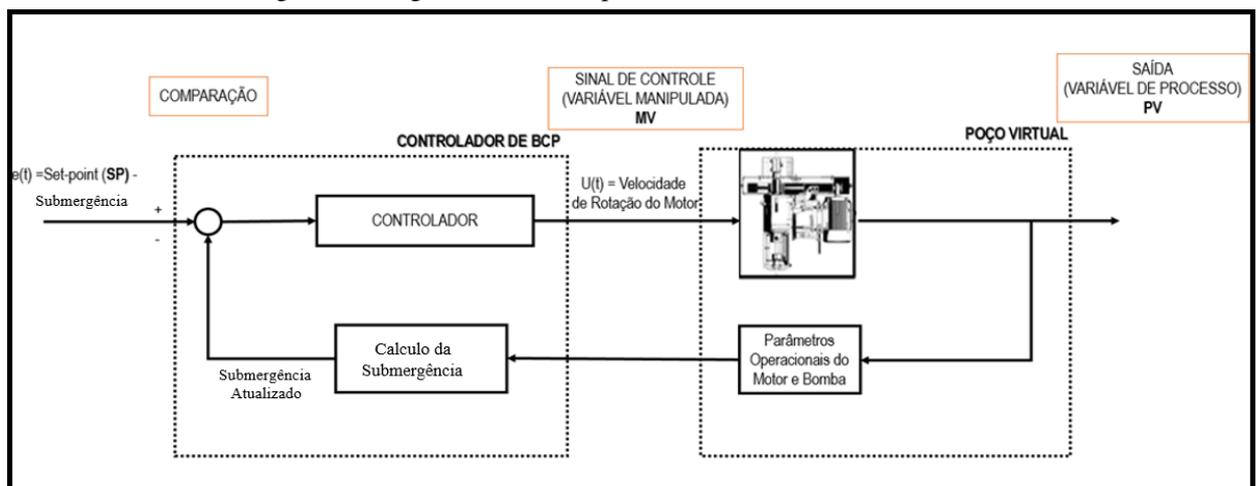
Dessa forma, com a dinâmica proposta pelo Simulador BCP, utilizou-se essa ferramenta como poço virtual, fornecendo dados para realização do método proposto anteriormente, e ainda, como fonte de validação dos resultados obtidos (descrito no próximo capítulo).

3.2 Controle PID aplicado ao BCP

O controle do tipo PID, aplicado neste método, é composto por três componentes: proporcional (Kp), integral (Ki) e derivativo (Kd). Além disso, tem-se o componente do erro, $e(t)$, que é usado para o cálculo do PID e representa o desvio do valor de referência (*setpoint*).

No controle BCP, desenvolvido nesta pesquisa, utilizou-se de um controle do tipo PID, descrito anteriormente, em malha fechada. Nesse controle, a variável de processo (PV) é a submersão e a variável manipulada (MV) é a velocidade de rotação do motor. A velocidade é ajustada até que a variável de processo (submersão) atinja o *set-point* desejado. A malha de controle do sistema é ilustrada na Figura 3.4.

Figura 3.4 Diagramas de blocos para o controlador no sistema BCP



Fonte: Autora, 2020.

Para o desenvolvimento do controlador da submersão do poço, utilizou-se um ambiente de desenvolvimento integrado de *software NetBeans IDE* e a linguagem de programação *JAVA*. Os parâmetros de entrada do poço virtual (dados de bomba, motor, propriedades dos fluidos e reservatórios) são inseridos no simulador BCP, que fornece ao controlador as variáveis do sistema nas quais encontram-se: pressão de sucção e recalque, torque da bomba, torque do motor, torque da haste e torque hidráulico, o diferencial de pressão e ainda, as vazões e rotações da bomba. Essas variáveis de saída são importantes tanto para a rotina de cálculo do método descrito por Peterson (2014), para determinar a submersão do poço como também para o controle proposto.

3.2 Interface Gráfica do Controlador BCP

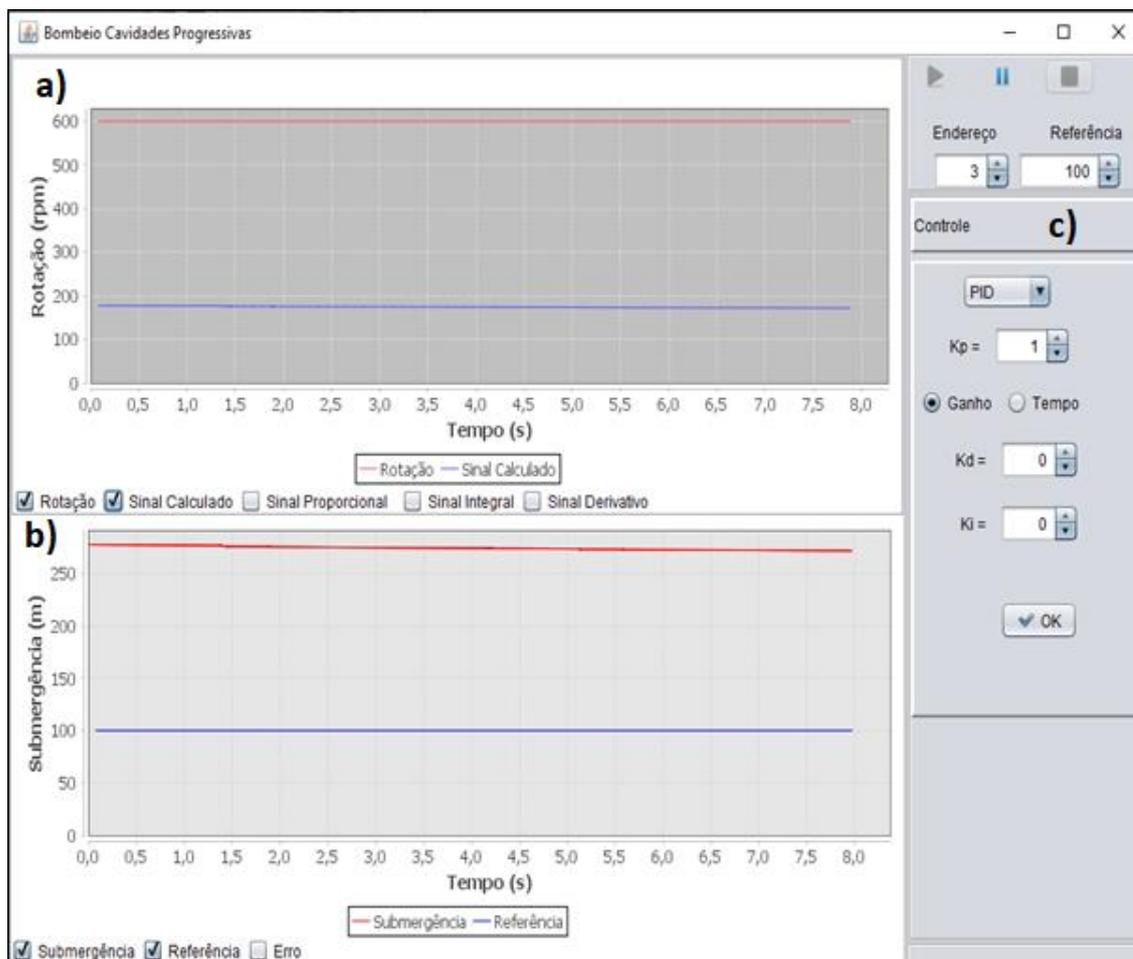
A partir da descrição do controle, desenvolveu-se a interface gráfica do controlador BCP, que possibilita ao usuário ou operador acompanhar o comportamento das variáveis manipuladas

e controladas ao longo da simulação, como também a curva do erro calculado a partir do valor atual da submergência e da referência (*setpoint*).

A interface é composta por três categorias (a, b e c), conforme a Figura 3.4, em que, na primeira seção, indicada pela letra “a”, pode-se acompanhar a curva da rotação do motor pelo tempo e ainda é possível visualizar a curva do sinal calculado. Além disso, nessa seção, ainda é possível visualizar as curvas do sinal proporcional, integrativo e derivativo. Na seção “b” tem-se a curva da variável controlada, da submergência e do valor de referência. Além disso, ainda é possível visualizar a curva do erro.

Por fim, na seção “c”, tem-se a parte do controle onde é possível inserir os valores das sintonias para os valores de K_p , K_i e K_d e ainda é possível a escolha do tipo de controle a ser utilizado (P, PI e PID). Ademais, é possível, também, na célula referência, entrar com o valor desejado. A partir da interface desenvolvida, estabeleceu-se a conexão com o simulador a fim de gerar os resultados para comprovação dos estudos.

Figura 3.5 Interface Gráfica da Tela Inicial do Controlador



Fonte: Autora (2020).

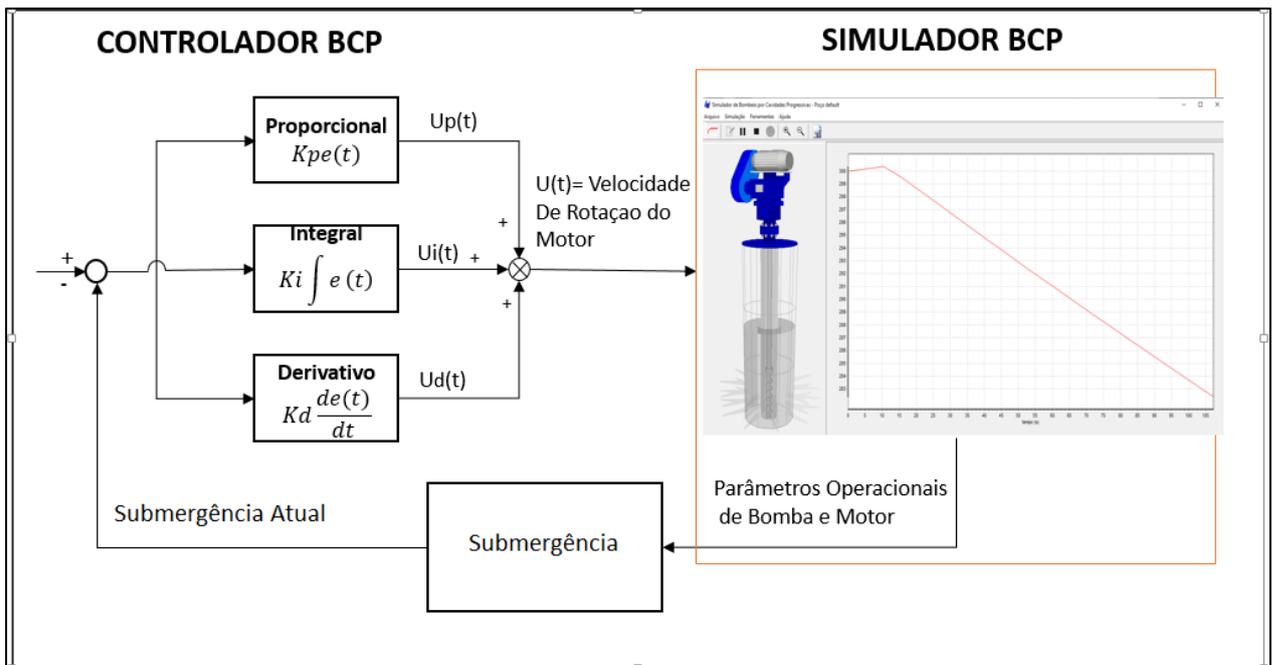
3.3 Interação entre o Simulador BCP e o Controlador BCP

O simulador BCP, como citado anteriormente, é utilizado nesta pesquisa como poço virtual e fonte de validação de dados. Essa ferramenta computacional que simula dinamicamente o comportamento de um poço equipado pelo sistema BCP foi desenvolvido na linguagem Borland C++ Builder 5, enquanto o controlador foi implementado em linguagem JAVA, em que se contribuiu na implementação da rotina do cálculo do método de Peterson (2014).

A partir do estabelecimento da conexão entre o controlador e simulador BCP, recebe-se as variáveis de saída e calcula a variável de processo (submersão) para, em seguida, compará-la com o valor de referência estabelecido inicialmente. Ao comparar esses dois valores, calcula-se um erro que será utilizado para alterar a velocidade de rotação do motor a fim de levar a variável de processo até o ponto de estabilização, que é o valor de referência.

Além disso, a cada recebimento de dados vindo do simulador, o controle atua de forma periódica, recebendo dados fornecidos pelo simulador, recalculando o erro e otimizando a velocidade de rotação do sistema dinamicamente. Essa rotina pode ser representada conforme a Figura 3.5.

Figura 3.6 Diagrama de blocos da interação simulador BCP e o controlador BCP



Fonte: Autora, 2020.

Assim, para que isso seja testado, utilizou-se um poço virtual, descrito na próxima seção, a fim de gerar os resultados para discussão.

3.5 Dados do poço I e poço II de teste virtual

Nessa seção serão apresentados os dados e as características dos dois poços utilizados nas simulações oriundas do simulador BCP. Na Tabelas 3.1, são mostrados os dados do reservatório e das propriedades do fluido para o poço I e poço II de um mesmo campo, equipados pelo BCP que foram utilizados nesse trabalho.

Tabela 3.1 - Dados do Reservatório e Propriedades do Fluido do Poço I e Poço II

DADOS DO RESERVATÓRIO E PROPRIEDADES DO FLUÍDO	POÇO I	POÇO II
Pressão estática do reservatório (kgf/cm ²)	46	46
Nível Estático (m)	300	300
API°	28	35
RGO (m ³ /m ³)	1	1
BSW (%)	97,5	98,2
Profundidade de Assentamento da Bomba (m)	500	700
Temperatura de Operação (C°)	54	54
Temperatura de Teste (C°)	45	45
Densidade do gás	0,7	0,7
Pressão na cabeça (kgf/cm ²)	15	15
Vazão de teste (m ³ /d)	30	30
Pressão de teste (kgf/cm ²)	30	30
Modelo para IPR	Vogel	Vogel

Fonte: Autora, 2020.

Os dados amostrais para categoria “características gerais do poço” são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Características Gerais do Poço I e Poço II

CARACTERÍSTICAS GERAIS DO POÇO	POÇO I	POÇO II
Motor	20 HP 6 Polos 1170 rpm	20 HP 6 Polos 1170 rpm
Potência (HP) do Motor	20	20
Redução do Motor	2,8	2,8
Fabricante do Cabeçote	Weatherford	Weatherford
Modelo do Cabeçote	AL-2-7	AL-2-7

Redução do Cabeçote	2,6	2,6
Modelo da Bomba	14.40.800	14.40.800
Vazão Nominal da Bomba (m ³ /dia)	25	25
Diferença de Pressão Nominal da Bomba(kgf/cm ²)	80	80

Fonte: Autora, 2020.

Por fim, os dados amostrais para categoria “revestimento” são mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Dados do Revestimento do Poço I e Poço II

DADOS DE REVESTIMENTO	POÇO I	POÇO II
Haste	7/8” 25 ft C	7/8” 25 ft C
Tubing	2 7/8” NU	2 7/8” NU
Revestimento	7” 23 lab/ft	7” 23 lab/ft

Fonte: Autora, 2020.

Logo, a partir dos dados de entrada detalhados nas tabelas descritas, foram gerados os resultados para o poço I e poço II, sendo esses detalhados no próximo capítulo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

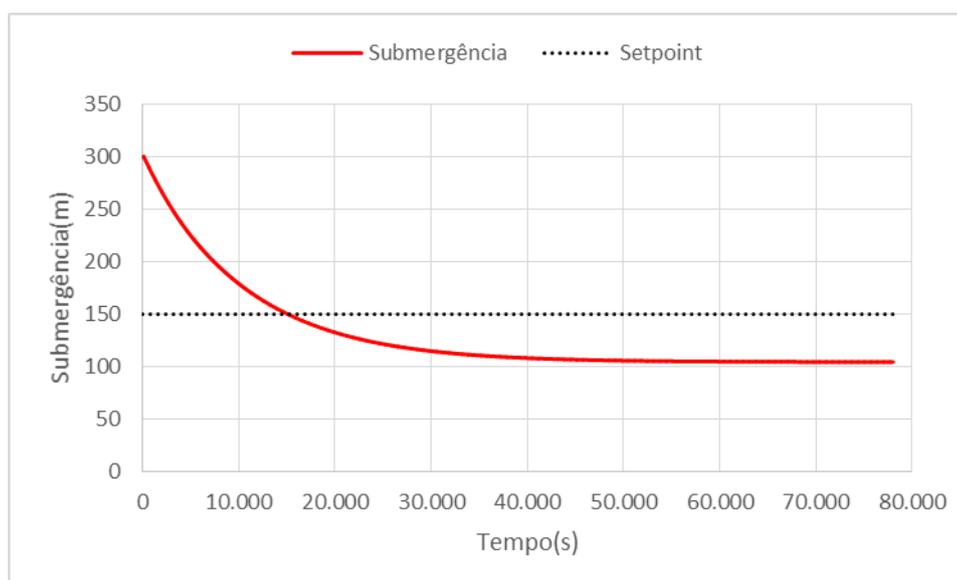
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tão importante quanto a metodologia exposta ao longo desse estudo, é mostrar os resultados que possam atender com coerência os requisitos para o qual o controlador foi projetado. Portanto, nessa seção, inicialmente, serão apresentadas as simulações realizadas em malha aberta, isto é, sem a interferência do controle. Em seguida, são realizadas as simulações com o controle estabelecido aos dois poços utilizados para a validação desse estudo, em que são apresentados os resultados obtidos nos testes realizados, discutindo sobre o comportamento das variáveis de controle e manipulada.

4.1 Simulação do comportamento do poço sem a influência do controle (malha aberta)

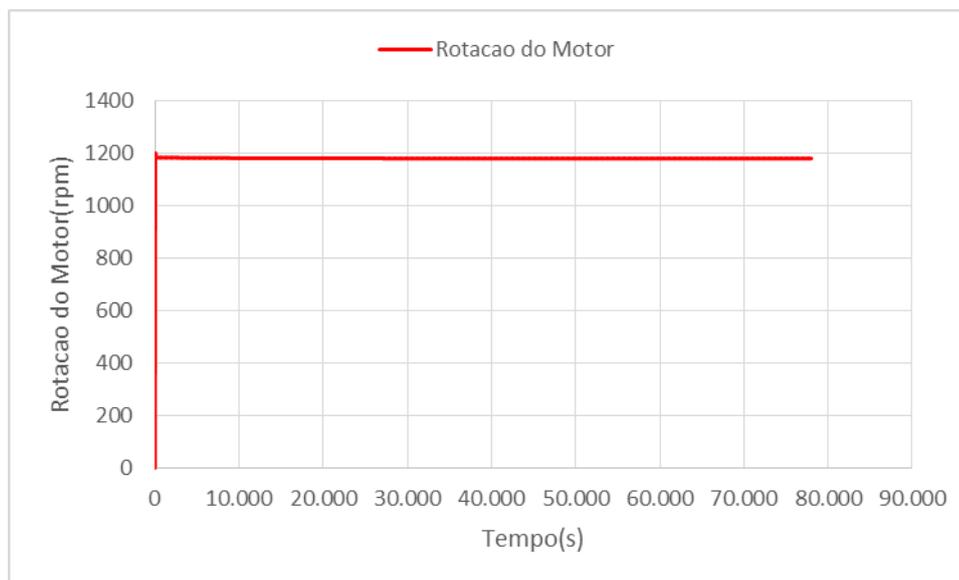
A partir da entrada de dados do poço no simulador BCP, foram geradas, inicialmente, as curvas da submersão e da velocidade de rotação do motor para uma malha do tipo aberta (sem influência do controle), não havendo uma evolução da dinâmica da submersão almejada. As Figuras 4.1 e 4.2 ilustram os resultados a obtidos.

Figura 4.1 Controle da Submersão em malha aberta



Fonte: Autora, 2020.

Figura 4.2 Controle da Velocidade de Rotação do Motor em malha aberta



Fonte: Autora, 2020.

Observa-se que houve uma acomodação da submersão abaixo do *setpoint*, sendo o mesmo ajustado para o valor de 150 m, como ilustrado na Figura 4.1. Sendo assim, é possível chegar a um valor inalterado durante todo o tempo de simulação. No entanto, é possível que se possa atingir a submersão desejada, alterando a velocidade de rotação manualmente, porém, a priori, não se conhece a velocidade ideal.

4.2 Simulação do comportamento do poço com a influência do controle (malha fechada)

Com o controle da submersão ativado e estabelecida a conexão com o Simulador BCP, realizaram-se simulações com diferentes sintonias para o mesmo poço de teste, buscando-se analisar o comportamento da submersão para que assim seja definido sua melhor configuração. Nas simulações realizadas, a velocidade de rotação do motor opera entre uma faixa preestabelecida de 600 rpm 1800 rpm, já o *setpoint* foi estimado em 150 m.

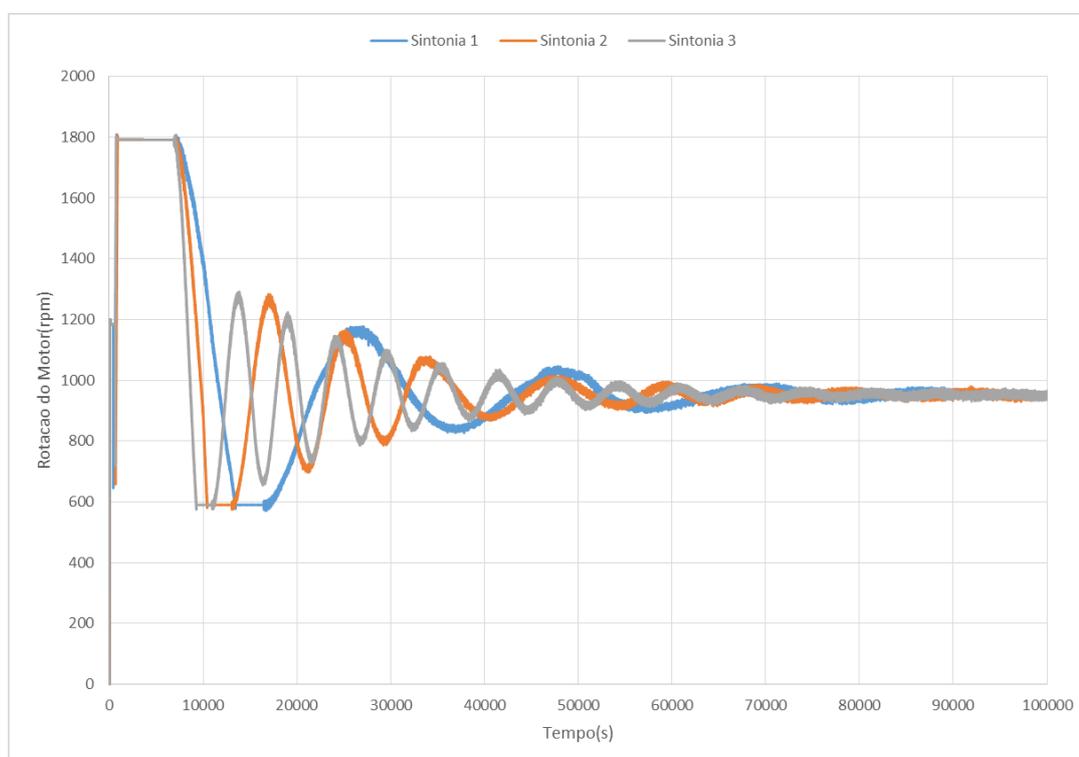
Conforme a Tabela 4.1, para as simulações iniciais, foram atribuídos os valores dos ganhos proporcional, integral e derivativo. A determinação desses valores se designa na busca pela estabilidade e pelo desempenho adequados do sistema, pois em critérios de desempenho, as sintonias requisitadas são as que reduzam as oscilações finais ao nível máximo possível. Os valores dos ganhos de cada sintonia são mostrados na Tabela 4.1 a seguir.

Tabela 4.1 - Sintonias PID da simulação 1

Sintonia	Ganho Proporcional	Ganho Integral	Ganho Derivativo
Sintonia 1	0,5	0,01	0,0000
Sintonia 2	0,8	0,03	0,0000
Sintonia 3	1	0,07	0,001

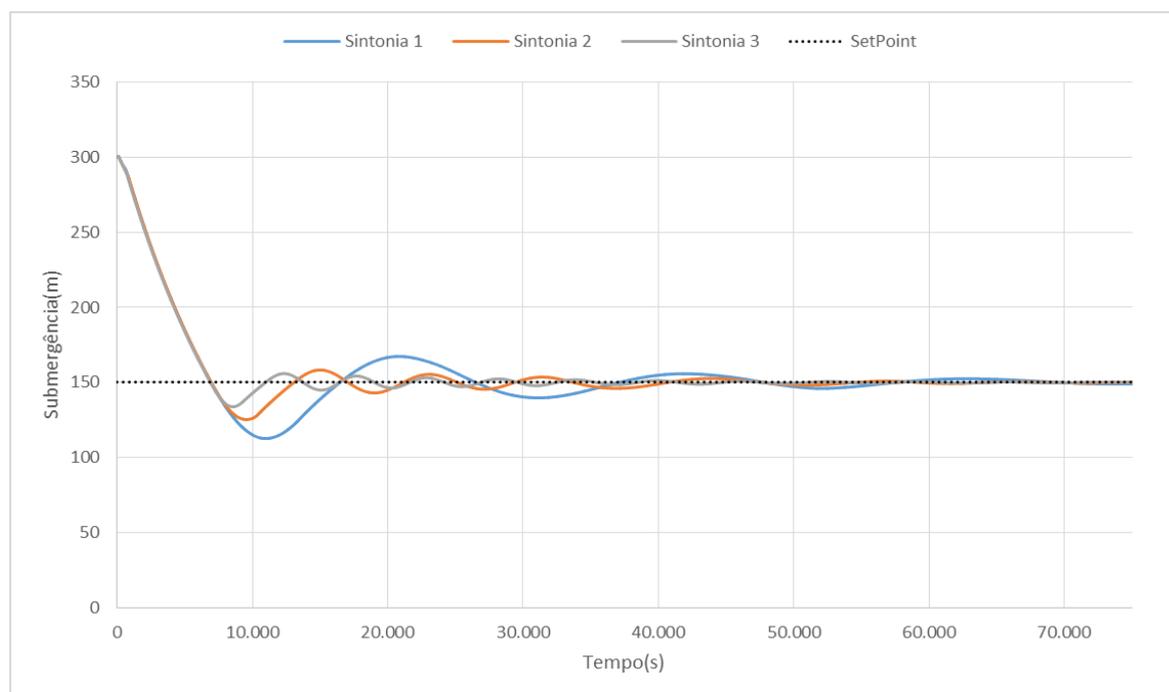
Os resultados obtidos com as diferentes sintonias para o comportamento da submergência são ilustrados nas Figuras 4.3 e 4.4.

Figura 4.3 Comportamento da Rotação do Motor em malha fechada



Fonte: Autora (2020)

Figura 4.4 Comportamento da Submergência em malha fechada



Fonte: Autora (2020)

As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram o comportamento da submergência controlada. Geralmente, no início da produção, a submergência apresenta um valor máximo, com isso a velocidade de rotação do motor tende a elevar com o objetivo de aumentar a produção do poço. Com o passar do tempo, a submergência tende a decair e a velocidade de rotação do motor acompanha a dinâmica do decaimento. Assim, uma vez que a velocidade tende a diminuir, a submergência volta a aumentar e, assim, a velocidade de rotação do motor acompanha o comportamento da variável controlada.

Na primeira simulação, na sintonia 1, mostrada na Figura 4.3, em que os valores de K_p , K_i e K_d foram atribuídos manualmente, observou-se que a submergência parte do ponto 300 m e, desse modo, há o aumento da velocidade de rotação do motor, comportamento coerente, pois o intuito é o aumento da produção do poço. Com o passar do tempo de simulação, a submergência diminui gradativamente, assim como a velocidade de rotação do motor, que acompanha a dinâmica da redução. Apesar do controle ter atingido o *setpoint* nessa sintonia, nota-se que a submergência apresentou maior oscilação e sensibilidade ao controle, respectivamente. Para a sintonia 2, foi atribuído um aumento no ganho proporcional e menor ganho integral, obtendo menores oscilações em sua resposta quando comparada a sintonia 1, assim, estabiliza-se e alcança o *setpoint* desejado. Já para a sintonia 3, optou-se por um ganho

proporcional maior, menor ganho integral e também por um pequeno ganho derivativo. Verificou-se, portanto, que com tais mudanças para a sintonia 3, atingiu-se oscilações mais suaves e uma mais rápida estabilidade dentre as outras sintonias já citadas anteriormente.

O critério para se avaliar a melhor e pior sintonia do controle proposto nas simulações foi a avaliação de dois parâmetros: o tempo de acomodação e o *overshoot* do sistema. Nesse sentido, quando se compara as sintonias apresentadas e seus respectivos comportamentos durante o tempo de simulação, observou-se que a sintonia 1 apresentou oscilações maiores e maior tempo de acomodação, em torno de 70.000 segundos, enquanto as sintonias 2 e 3 se estabilizaram em torno de 60.000 segundos.

4.3 Simulação do controle da Submergência de Peterson

No Capítulo II, foi descrito o método de Peterson (2014) que tem como objetivo a determinação da submergência a partir dos parâmetros de motor e bomba sem a necessidade de sensores. Para a validação do método, utilizou-se do poço I em que a velocidade de rotação do motor, operando entre uma faixa preestabelecida entre 600 rpm a 1800 rpm com o *setpoint*, foi estimado em 150 m.

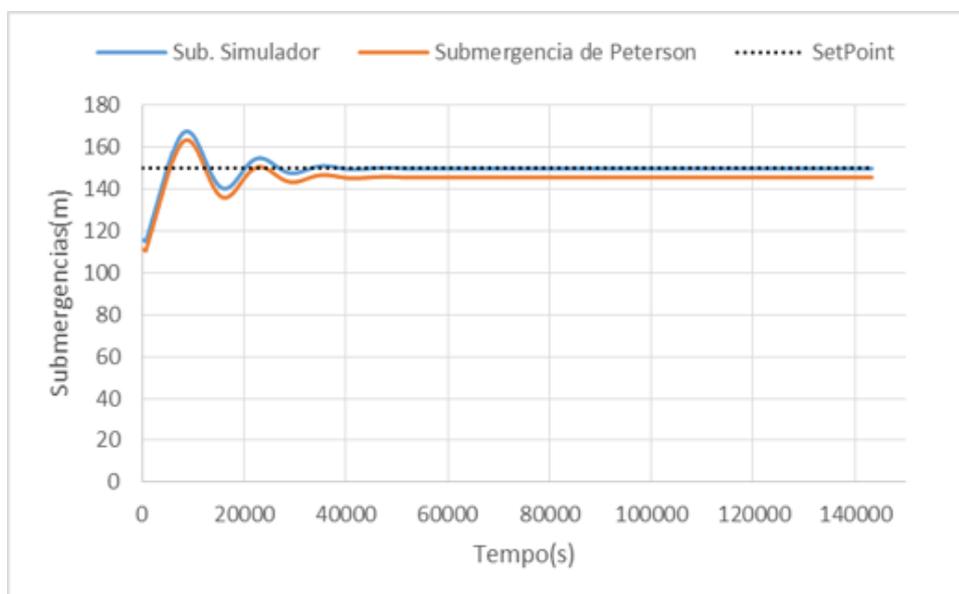
Conforme a Tabela 4.2, para a simulação, foram atribuídos os valores dos ganhos proporcional, integral e derivativo. Os valores dos ganhos de cada sintonia são mostrados a seguir.

Tabela 4.2 - Sintonia para a submergência 1

Sintonia	Ganho Proporcional	Ganho Integral	Ganho Derivativo
Sintonia 1	0,9	0,06	0,001

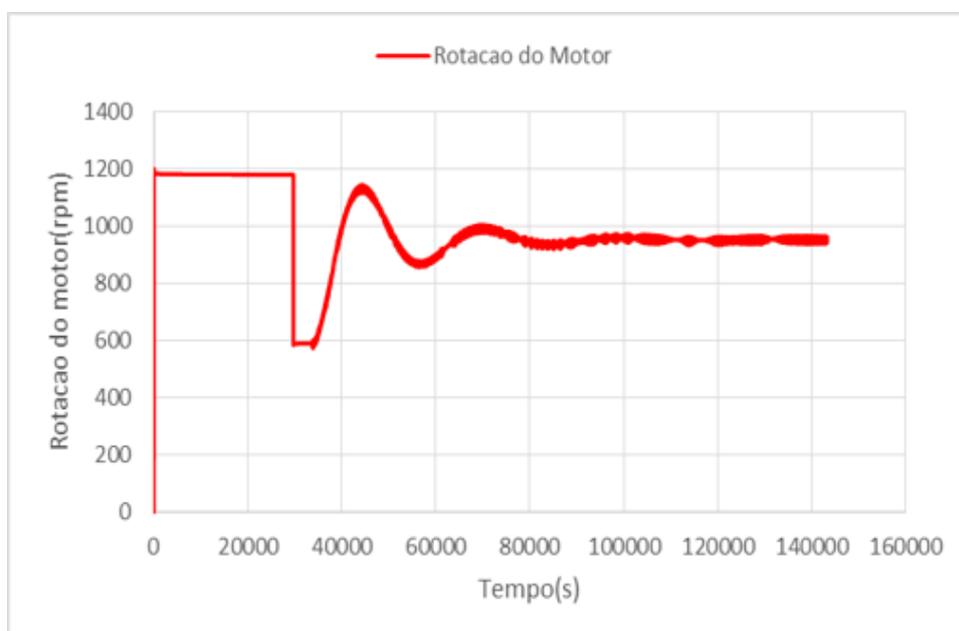
Os resultados obtidos com as diferentes sintonias para o comportamento da submergência são ilustrados nas Figuras 4.5 e 4.6.

Figura 4.5 - Comparativo da submergência do simulador e Peterson



Fonte: Autora (2020)

4.6 - Comportamento da rotação do Motor



Fonte: Autora (2020)

A partir das Figuras 4.5 e 4.6, tem-se o comportamento da submergência oriunda do simulador, a submergência de Peterson, calculada pelo método de Peterson (2014) e o comportamento da rotação do motor, respectivamente. Para se obter o comportamento da

submergência de Peterson é buscado o valor a partir da ativação do Controlador BCP, no tempo 0 segundos da Figura 4.5 que representa o comportamento das submergências e no tempo de 30000 segundos da Figura 4.6 do comportamento da rotação do motor oriunda do simulador BCP, com a ativação do controle, ocasiona à diminuição da dinâmica da rotação do motor e aumento gradativo dos valores das submergências até a estabilidade no *setpoint*.

Pode-se analisar que a submergência de Peterson tem um comportamento semelhante à submergência do simulador, no entanto a mesma não atinge o *setpoint* (150 m) estabelecido, gerando, assim, um pequeno erro na faixa de 5m. A partir disso, a partir do tempo de 40000 s apresentado na Figura 4.5, a submergência de Peterson foi controlada se estabilizando em uma faixa de 145 m durante toda a simulação, portanto, validando o método de Peterson (2014) para o poço proposto.

4.4 Simulação do controle da Submergência com poço II

Para efeitos de refinamento do controle desenvolvido, foram feitos novos testes com um segundo poço II, com características de reservatório e propriedades do fluido diferentes em relação ao poço I.

A Tabela 4.3 mostra valores que foram atribuídos para os ganhos proporcional, integral e derivativo, conforme a sintonia 3 da Tabela 4.1, pois a mesma apresentou resultados coerentes para o poço I. A velocidade de rotação do motor opera entre uma faixa preestabelecida entre 600 rpm a 1800 rpm, com o *setpoint* estimado em 200 m.

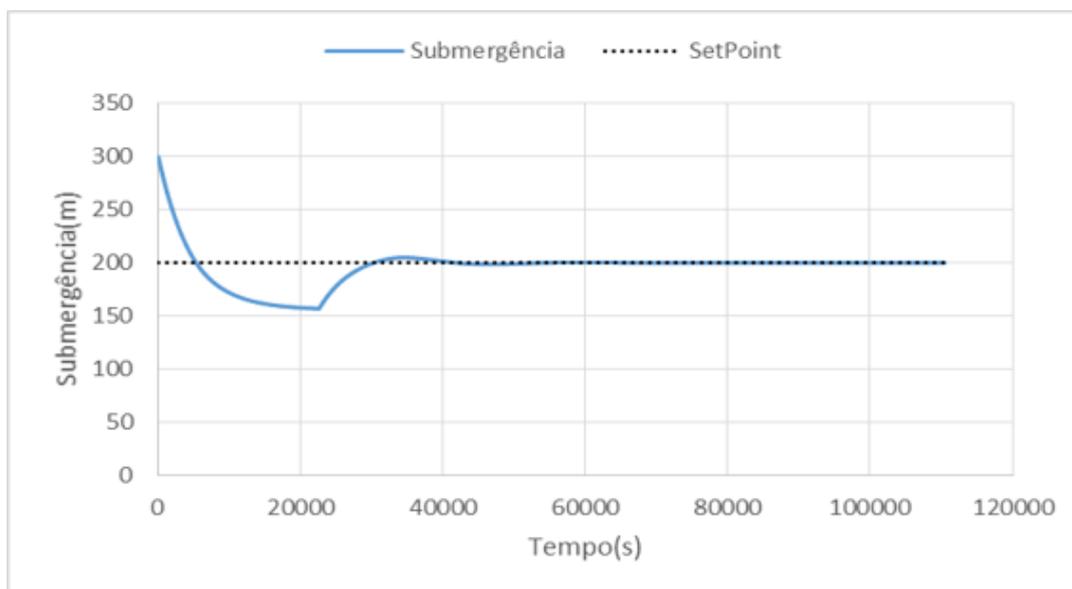
Os valores dos ganhos de cada sintonia são mostrados na Tabela 4.3 a seguir.

Tabela 4.3- Sintonias PID da simulação para o poço II

Sintonia	Ganho Proporcional	Ganho Integral	Ganho Derivativo
Sintonia 1	1	0,07	0,001

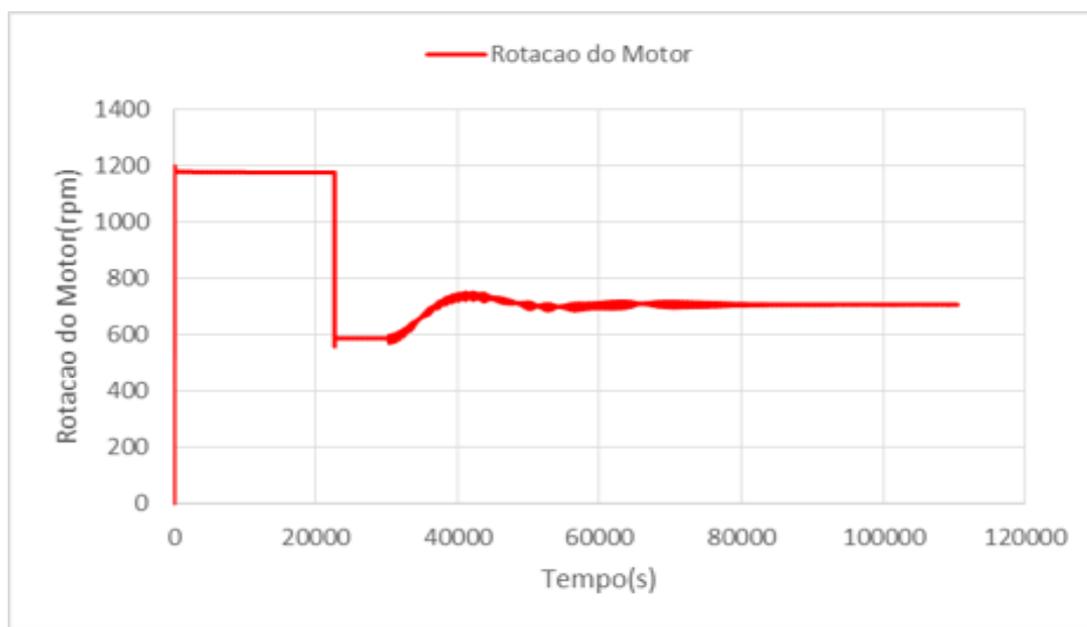
O resultado obtido para o comportamento da submergência são ilustrados nas Figuras 4.7 e 4.8.

Figura 4.7 - Comportamento da Submersão poço II



Fonte: Autora (2020).

Figura 4.8 - Comportamento da Rotação do Motor poço II



Fonte: Autora (2020)

A partir das Figuras 4.7 e 4.8, é possível traçar uma análise crítica do comportamento do controle. De maneira geral, ao acionar o controle no tempo 20.300 segundos nota-se tanto a mudança no comportamento da submersão (aumento gradual) como também, no mesmo tempo, o declínio da rotação do motor. A partir do momento que a rotação diminui, a submersão aumenta com o intuito de alcançar o *setpoint* estimado e essa dinâmica entre a

variável manipulada e controlada acontece até que a referência é alcançada de maneira rápida e constante.

Sendo assim, com o *setpoint* alcançado o controle se faz eficaz para um segundo poço, com características diferentes e dinâmica diferente, tornando-o, dessa maneira, válido e coerente independente das mudanças propostas.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesse trabalho, foi apresentado o desenvolvimento de uma estratégia de controle para o método de elevação artificial por Bombeio por Cavidades Progressivas. O estudo foi desenvolvido no âmbito do projeto de pesquisa CONTELEV, por meio de uma parceria com a UFRN/PETROBRAS. A esse respeito, a contribuição da pesquisa desenvolvida neste trabalho de conclusão de curso teve como foco encontrar e implementar, em linguagem Java, novas técnicas para o cálculo do nível do poço, tais como o método de Peterson (2014), cuja rotina de cálculo foi descrita no Capítulo II. Além disso, foram desenvolvidos, testes para encontrar uma melhor sintonia com o objetivo de gerar resultados com o controle da submersão estimada.

Assim, foi possível não só controlar a submersão do poço, como também controlar a submersão através da metodologia desenvolvida em Peterson (2014). O estudo foi feito com controle do tipo PID, tendo em seu desenvolvimento a submersão definida como variável de processo e a velocidade de rotação do motor como variável manipulada.

Na metodologia, foi abordada o controle do tipo PID, em que os algoritmos desenvolvidos foram implementados na linguagem JAVA. Além disso, fez-se uso do Simulador BCP como poço virtual trabalhando em conjunto com o controle para os testes laboratoriais. Foram realizadas simulações computacionais com o intuito de se obter a validação do controle desenvolvido e os resultados discutidos.

Com os resultados atingidos, observou-se o comportamento do sinal de controle, analisando, portanto, sua funcionalidade. Ademais, foi analisado o desempenho do controle em diferentes sintonias e poços, atingido resultados coerentes e esperados, pois o controle conseguiu alcançar o *setpoint* desejado com *overshoot* e o tempo de acomodação dentro da margem satisfatória tanto para a submersão oriunda do simulador BCP quanto para a submersão do método de Peterson (2014), eliminando atuações liga-desliga, que reduzem a vida útil do equipamento.

A partir desse estudo, recomenda-se como trabalhos futuros a implementação de uma auto sintonia do controle BCP em malha fechada. Com isso, as técnicas para uma melhor validação a fim de ser amenizar as discrepâncias remanentes entre o método de Peterson (2014) e o controlador, visto que, espera-se um constante aprimoramento de todos as características abordados nesse estudo.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adaptada de Fluidresearch. **Progressing Cavity Pump Working Illustration**. Disponível em: < https://youtu.be/jRC_O7hQBgc > Acesso em: 15 de outubro de 2019.

ASSMANN, B. W et al; **Implementation of PI-Fuzzy Controller Progressing Cavity Pump Artificial Oil Lift System**; IEEE LATIN AMERICA

ASSMANN, B. W. **Estudo de Estratégias de Otimização para Poços de Petróleo com Elevação por Bombeio de Cavidades Progressivas**. 224f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), 224f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

CARVALHO. Paulo G., ROSSI. Nereu C. M. **Bombeio de Cavidades Progressivas**. Petrobras, 2008.

MATHEWS, Zahacy & Skoczylas. **Progressing Cavity Pumping Systems: Design, Operayion and Performance Optimization**. Course Notes, C-Fer, Edmonton, Canada, 2002.

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 4ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
PETERSON, RONALD G. **Estimating fluid levels in a progressing cavity pump system**. US pat. 8892372 B2, 18 de nov. de 2014.

PETROBRAS, Ouvidoria - geral. **Serviço de Informação ao Cidadão (SIC)**. Disponível em <<https://esic.cgu.gov.br/sistema/site/index.aspx>> Acesso em: 21 de agosto de 2019.

PID Controllers. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 47, n. 2, p. 241-252, feb. 2002.
SILVA, G. J.; BHATTACHARYYA, S. P.; DATTA, A. New Results on the Synthesis of PID Controllers, UFRN, Brazil.2017.

VIDAL, F. J. T. **Desenvolvimento de um Simulador de Bombeio por Cavidades Progressivas**. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.