



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



CLARA CÂMARA COUTO

A indústria 4.0 e a automação de protótipo de peneira vibratória

Uberlândia, MG
2020

Clara Câmara Couto

A indústria 4.0 e a automação de protótipo de peneira vibratória

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Química da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito parcial para
a obtenção do título de Engenheiro habilitação
Engenharia Química

Área de concentração: Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. Rubens Gedraite

Uberlândia

2020

Clara Câmara Couto

A indústria 4.0 e a automação de protótipo de peneira vibratória

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro habilitação Engenharia Química apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia

Área de concentração: Engenharia Química

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rubens Gedraite

Orientador

Faculdade de Engenharia Química / UFU

Prof. Dr. Sérgio Mauro da Silva Neiro

Faculdade de Engenharia Química / UFU

Eng. MsC. Vinicius Pimenta Barbosa

Faculdade de Engenharia Química / UFU

Uberlândia, dezembro de 2020

Dedico esse projeto à minha família e amigos,
que sempre foram tão presentes, por todo
carinho, força e apoio.

Dedico também ao meu querido e paciente
professor Rubens por todos os ensinamentos
e conselhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente aos meus pais, André Couto e Sandra Câmara, por terem sempre acreditado em mim, pelo apoio e suporte infindáveis, por não medirem esforços e por terem sido colo nos momentos difíceis. Sou grata também a minha irmã, Julia Couto, por sempre estar ao meu lado.

Agradeço ao meu namorado, Lucas Jordan, pelo apoio, incentivo, carinho e paciência em todos os momentos.

Agradeço às minhas amigas, as que viveram essa jornada comigo e as que estavam presentes no coração. Obrigada, vocês tornaram a caminhada mais leve. Especialmente agradeço à minha amiga Marina Sakomoto pela parceria tão essencial.

Sou grata ao meu professor orientador, Prof. Rubens Gedraite, pela orientação, mentoria, por todos os ensinamentos, conselhos e pelas valiosas contribuições dadas durante todo o processo.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Química e todo o corpo docente, responsáveis pela minha formação profissional e pessoal, sempre comprometidos com a qualidade do ensino. Agradeço por tudo que vivi nesses 5 anos, até pelos momentos de dificuldade e aflição que tanto me fizeram crescer e amadurecer.

Agradeço, acima de tudo, à Deus, pelo dom da vida, pela sabedoria, por ser tão presente e por ter colocado tais pessoas em meu caminho.

"Conhecimento não é aquilo que você sabe,
mas o que você faz com aquilo que você
sabe." Aldous Huxley

RESUMO

A recuperação do fluido de perfuração é importante na operação de perfuração de poços de petróleo, sob o ponto de vista ambiental e econômico. Este fluido é uma suspensão coloidal classificada de acordo com seus componentes. As propriedades físicas deste fluido devem ser monitoradas e corrigidas para carrear os cascalhos até a superfície; manter a estabilidade mecânica do poço; resfriar a broca; transmitir força hidráulica até a broca; manter os cascalhos em suspensão quando sem circulação; evitar oxidação entre outros. O entendimento do comportamento dinâmico dos diversos equipamentos que compõe esta planta de recuperação através de modelos matemáticos fenomenológicos, para fins de automação e controle do processo global, constitui um desafio pelo relativo grau de complexidade das equações de conservação e alto custo computacional na simulação. A investigação experimental do funcionamento da peneira vibratória assume papel preponderante na validação dos modelos e no entendimento dos fenômenos envolvidos nesta área tecnológica. Para tanto, o emprego de modernos sistema de monitoramento e controle é de fundamental importância. Os aspectos estudados neste trabalho apontam requisitos de automação moderna e que permita a comunicação com outros dispositivos além dos instrumentos de monitoramento e controle propriamente ditos.

Palavras-chave: automação, peneira vibratória, indústria 4.0

ABSTRACT

The recovery of the drilling fluid is important in the oil well drilling operation, from an environmental and economic point of view. This fluid is a colloidal suspension classified according to its components. The physical properties of this fluid must be monitored and corrected to carry the cuttings to the surface; maintain the mechanical stability of the well; cool the drill; transmit hydraulic force to the drill; keep cuttings in suspension when not in circulation; avoid oxidation among others. Understanding the dynamic behavior of the various equipment that make up this recovery plant through phenomenological mathematical models, for the purpose of automation and control of the global process, constitutes a challenge due to the relative degree of complexity of the conservation equations and high computational cost in the simulation. The experimental investigation of the functioning of the vibrating screen assumes a predominant role in the validation of the models and in the understanding of the phenomena involved in this technological area. Therefore, the use of modern monitoring and control systems is of fundamental importance. The aspects studied in this work point out requirements of modern automation and that allows communication with other devices besides the monitoring and control instruments themselves.

Keywords: automation, vibrating sieve, industry 4.0

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1. Esquema simplificado de uma sonda de perfuração

Figura 2.2. Esquema representativo do fluxo do fluido de perfuração

Figura 2.3. Fluido de perfuração

Figura 2.4. Representação esquemática de uma unidade de tratamento de fluido de perfuração para controle de sólidos típica

Figura 2.5. Representação simplificada de peneira vibratória

Figura 2.6. Estrutura tradicional para otimização em tempo real.

Figura 2.7. Representação típica de um sistema.

Figura 2.8. Diagrama de blocos que ilustra as principais variáveis de processo consideradas na identificação do modelo de uma peneira.

Figura 3.1. Modelo da peneira vibratória utilizada nos testes

Figura 3.2. Sistema de ajuste da inclinação da tela

Figura 3.3. Unidade experimental em estudo

Figura 3.4. Interface Homem-Máquina utilizada

Figura 3.5. Estratégia de controle configurada

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IoT: *Internet of Things*

SISO: *single input single output*

MIMO: *multiple inputs multiple outputs*

PSD: *particle-size distribution*

RFID: etiquetas de identificação por radiofrequência

GPS: *Global Positioning System*

M2M: *Machine to Machine*

IIoT: *Industrial Internet of Things*

RPM: rotações por minuto

CV: cavalo-vapor

g: grama

m: metro

m²: metro quadrado

V: volts

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
3	O PROTÓTIPO DE PENEIRA ESTUDADO	27
4	A AUTOMAÇÃO MODERNIZADA PROPOSTA	32
5	CONCLUSÃO.....	36
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1 INTRODUÇÃO

Desde o início da década de 60 as indústrias já começaram a introduzir o uso de computadores em seus sistemas de controle e automação. Durante os primeiros anos, as aplicações se concentraram na concepção de um controle centralizado, sendo o computador o único processador (GARCIA, 2005; SEBORG et al., 2005; OGATA, 2000). Com o avanço da tecnologia cada vez mais acelerado, hoje as indústrias empregam modernos sistemas digitais de controle distribuídos, viabilizados pelo baixo custo dos microprocessadores, permitindo assim uma confiabilidade similar àquela obtida pelos pioneiros sistemas analógicos convencionais, concomitante a potencialidade e flexibilidade dos sistemas digitais. Juntaram-se a esse sistema elementos de controle sequencial e combinatório, equipamentos designados controladores lógicos programáveis (RONAES et al., 2009).

No contexto da indústria petrolífera, os sistemas de controle e automação são de extrema importância, dada a necessidade de precisão e altos custos do processo produtivo. O equipamento de processo estudado neste trabalho, a peneira vibratória, é tipicamente utilizada em plataformas de perfuração de poços de petróleo instaladas ao redor do mundo. As perfurações de poços de petróleo são realizadas por meio de uma sonda. As rochas são perfuradas pela ação rotativa da broca, localizada na extremidade da coluna de perfuração. Os fragmentos de rocha são removidos pela ação de uma lama, conhecida como fluido de perfuração, que é injetado por bombeamento nesta coluna. Segundo THOMAS (2001), ILZUKA (2006) e FERNÁNDEZ et al. (2009), o fluido realiza mais funções do que apenas a lubrificação e resfriamento da broca como também a função de estabilização da perfuração e recolhimento de fragmentos de cascalho. A lama quando retornada tem em sua composição diversos novos componentes e, por se tratar de um importante recurso de custo elevado para os poços de perfuração, sua reutilização é viável a partir do seu tratamento. O tratamento de sólidos consiste na retirada de impurezas como cascalhos, gases dissolvidos e argilominerais utilizando diversos equipamentos como a peneira vibratória, hidrociclones e centrifugas (THOMAS, 2001; WANZELER, 2016).

A automação empregada atualmente no processo é bastante simples e está defasada em relação aos conceitos empregados na moderna automação industrial, que contempla a indústria 4.0.

O termo “indústria 4.0” foi usado pela primeira vez em 2011 na Alemanha em uma feira de automação industrial. Também conhecida como 4ª revolução industrial, ela surge em um

contexto de avanço tecnológico e propõe que empresas inteligentes utilizem um conjunto de tecnologias integradas, que reduzem a distância entre o mundo virtual e físico, permitindo que máquinas e humanos trabalhem coletivamente. Para isso, a indústria 4.0 explora conceitos conhecidos como tecnologias habilitadoras, são elas: manufatura digital, *Internet of Things* (IoT - Internet das Coisas), *Big Data* etc. O grande benefício da implementação de conceitos da indústria 4.0 está relacionado ao aumento da produtividade devido ao ganho de agilidade das empresas.

1.1. Objetivos deste trabalho

O objetivo do trabalho é analisar o sistema de automação atualmente usado em peneiras vibratórias, avaliando os parâmetros de controladores automáticos, visando propor melhorias no que tange a requisitos de segurança e desempenho operacional proporcionados pelos modernos sistemas de automação industrial baseados no conceito de indústria 4.0.

Complementarmente, a crescente utilização de sistemas de controle automático no ambiente industrial vem transformando o processo de ensino e aprendizagem em vigor nos cursos de engenharia. É imperativo que os alunos realizem experiências didáticas, onde a coleta eletrônica das informações pertinentes seja feita de forma automática e rápida, visando uma posterior análise dos dados, com o emprego de planilhas eletrônicas. Este procedimento pode permitir tanto a análise das condições de operação do equipamento como o projeto de modificações que se façam necessárias no mesmo este trabalho de conclusão de curso apresenta contribuição para as disciplinas Segurança e Análise de Riscos em Processos Industriais, Modelagem e Simulação de Processos e Controle de Processos Químicos, proporcionando uma visão aplicada do embasamento teórico apresentado por estas disciplinas, o que contribuirá para a melhoria da aprendizagem por parte dos alunos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Petróleo (do latim *petra* = rocha e *oleum* = óleo) é o nome dado as misturas naturais de hidrocarboneto que podem ser encontradas no estado sólido, líquido ou gasoso, a depender das condições de pressão e temperatura a que estejam submetidas. O petróleo tanto pode aparecer em uma única fase como pode se apresentar em mais de uma fase no equilíbrio (ROSA et al., 2006). Com o passar do tempo o petróleo se tornou uma importante fonte de energia com seu uso como combustível, mas, para além disso, com o surgimento de uma gama de utilidades de seus derivados (plástico, borrachas, tecidos sintéticos, tintas, corantes, etc.) ele se tornou imprescindível para a vida moderna. O petróleo é a maior fonte de energia e de matérias primas do planeta e encontra-se na natureza ocupando os vazios de uma rocha porosa chamada rocha reservatório (ANP, 2020).

Após a constatação da presença de petróleo através de estudos geológicos e sísmicos é iniciado o processo de perfuração do poço para a exploração utilizando plataformas móveis denominadas sondas de perfuração, conforme apresentado na Figura 2.1.

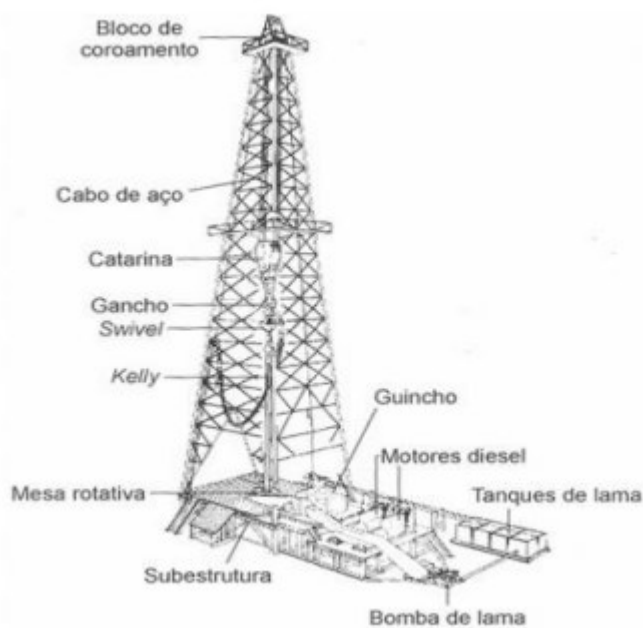


Figura 2.1. Esquema simplificado de uma sonda de perfuração
(Fonte: THOMAS, 2001)

Na perfuração rotativa o perfuramento das rochas ocorre por ação do movimento de rotação e peso exercidos sobre a broca na extremidade da coluna de perfuração. Como resultado do processo, são gerados fragmentos de rocha, conhecidos como cascalho, que devem ser continuamente removidos para evitar que obstruam o caminho da broca ou o espaço do fluxo. Essa remoção é feita por meio do fluido de perfuração, também conhecido como lama, que, por sua vez, é injetado para o interior da coluna com o auxílio de bombas e retorna à superfície através do espaço anular entre a broca de perfuração e as paredes do poço (ASME, 2005). Na superfície, este fluido deve ser encaminhado até a unidade de tratamento do fluido de perfuração para a remoção dos cascalhos e para receber tratamento de reciclagem a fim de que as suas propriedades reológicas sejam readequadas, podendo assim ser bombeado de volta ao poço, como mostrado na Figura 2.2.

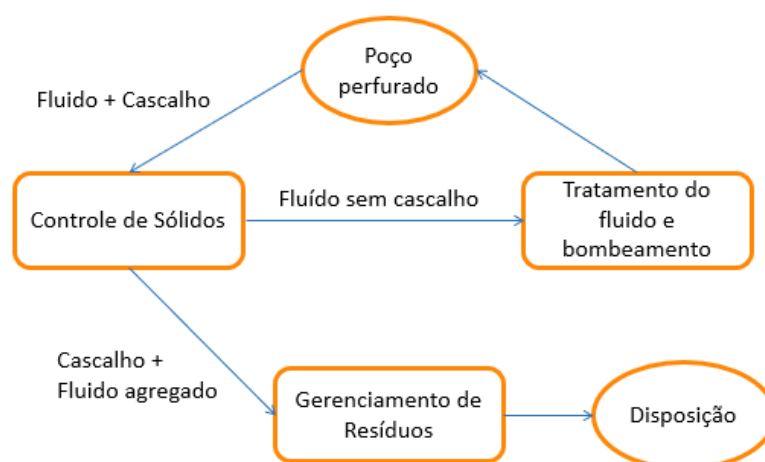


Figura 2.2. Esquema representativo do fluxo do fluido de perfuração
(Fonte: adaptado de GUERREIRO, 2015)

Existem várias definições para fluido de perfuração. Sua utilização começou em 1901 no poço de *Spindletop* no Texas e seu desenvolvimento permanece até hoje como um grande desafio para a indústria do petróleo (SCHAFFEL, 2002). De acordo com o API (Instituto Americano de Petróleo), fluido de perfuração é qualquer fluido circulante capaz de tornar a operação de perfuração viável. Conforme THOMAS (2001), os fluidos são como misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e até gases, podendo assumir aspectos de suspensão, emulsão ou dispersão coloidal, dependendo do estado químico dos componentes. No aspecto físico do fluido, assumem comportamentos não newtonianos, definidos por não ser constante a taxa de deformação e de cisalhamento (MACHADO, 2002).

Suas principais finalidades são: carrear os fragmentos das rochas perfuradas até a superfície, manter esses fragmentos em suspensão quando não há circulação de fluido no poço, resfriar e lubrificar a broca e a coluna de perfuração, sustentar hidraulicamente e mecanicamente as paredes do poço, transmitir força hidráulica até a broca e conter os fluidos (óleo, gás ou água) no reservatório (SOUZA; LIMA, 2002). Na Figura 2.3 é mostrado o aspecto visual de um fluido de perfuração.



Figura 2.3. Fluido de perfuração (Fonte: LOBATO, 2011)

Após a passagem do fluido de perfuração no poço, tem-se o processo de tratamento ou condicionamento desse fluido a ser realizado na superfície. A recuperação do fluido de perfuração é de suma importância nas operações de plataformas de perfuração de poços de petróleo, levando em conta o ponto de vista econômico e ambiental. A utilização de fluidos de perfuração é um grande desafio para a indústria do petróleo, na busca pelo ponto ótimo entre custo, performance técnica e o atendimento às exigências ambientais.

O tratamento do fluido consiste basicamente na eliminação de partículas sólidas, o cascalho que se incorpora durante o período de perfuração do poço e, quando houver a necessidade, na adição de aditivos químicos para a readequação das propriedades do fluido para uma nova circulação no poço. Companhias petrolíferas passaram a investir em pesquisas para o avanço da tecnologia do processo de separação e outros equipamentos para a remoção de partículas menores que aquelas retidas pela tela das peneiras. Até os dias atuais a peneira vibratória permanece como o principal equipamento do sistema de controle de sólidos e um indicador da eficiência de separação desse sistema.

Os equipamentos utilizados para a separação sólido-líquido em uma unidade típica de controle de sólidos são divididos em três grupos básicos, a saber: (I)- peneiras vibratórias,

(II)- baterias de hidrociclones (desareiaadores e dessiltadores) e (III)- centrífuga decantadora. Na Figura 2.4 é apresentada uma representação simplificada da unidade de recuperação de fluido de perfuração.

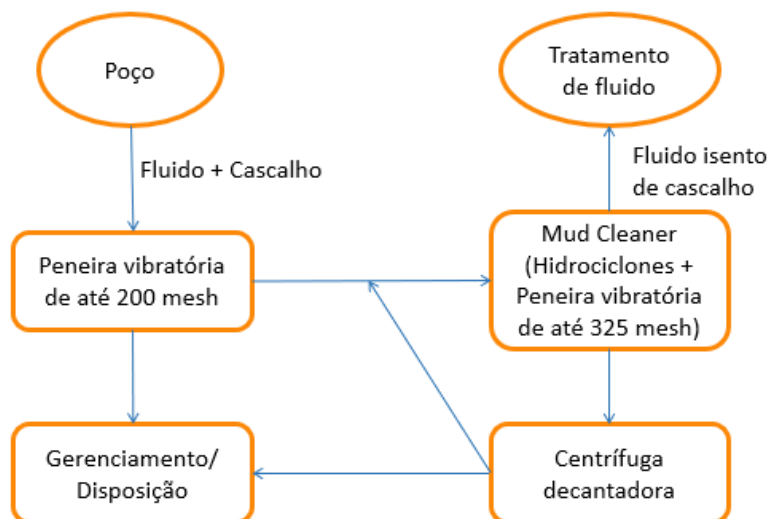


Figura 2.4. Fluxograma de unidade de tratamento de fluido de perfuração para controle de sólidos (Fonte: adaptado de GUERREIRO, 2015)

A eficiência de uma unidade de tratamento de fluido de perfuração pode ser avaliada de duas maneiras, a saber: (I)- eficiência de sólidos removidos propriamente dita e (II)- eficiência na conservação de líquido. Quanto maior a fração de sólidos removidos, maior a eficiência. Quanto menor a fração de sólidos no efluente de descarte, melhor é a eficiência de remoção. Ambos os aspectos devem ser considerados.

Um bom projeto de sistema de separação de sólidos leva em conta a instalação de vários tipos de equipamentos em série, como citado na Figura 2.4. É de suma importância observar que cada estágio de processamento possui um elevado grau de dependência com o seu predecessor, ou seja, para que um dado equipamento tenha uma eficiência adequada, o equipamento em série imediatamente antes deve estar operando de acordo com a sua capacidade. Caso contrário, haverá uma sobrecarga para o equipamento seguinte e assim por diante, ocasionado uma perda de eficiência global da unidade de recuperação.

Deve ser ressaltado o fato de que as peneiras têm um papel fundamental na eficiência global do sistema, pois são os primeiros equipamentos que entram em contato com o fluido de perfuração quando este retorna do poço. O dimensionamento adequado da quantidade e

qualidade das peneiras evita a sobrecarga dos hidrociclones (desareiaadores e dessiltadores) e dos equipamentos seguintes.

A peneira vibratória pode ser usada em todas as aplicações de perfuração em que o líquido é usado como fluido de perfuração. O objetivo da vibração é promover a movimentação das partículas sólidas liberando a área sobre a tela, acelerando a separação sólido-líquido. A seleção da tela é controlada pela taxa de circulação, design do agitador, propriedades do poço e propriedades do próprio fluido de perfuração. As peneiras evoluíram nos últimos anos, de equipamentos menores e mais simples, capazes de processar apenas sólidos mais grosseiros, para concepções bem mais modernas instaladas em diversos segmentos da indústria (SILVA et al., 2017).

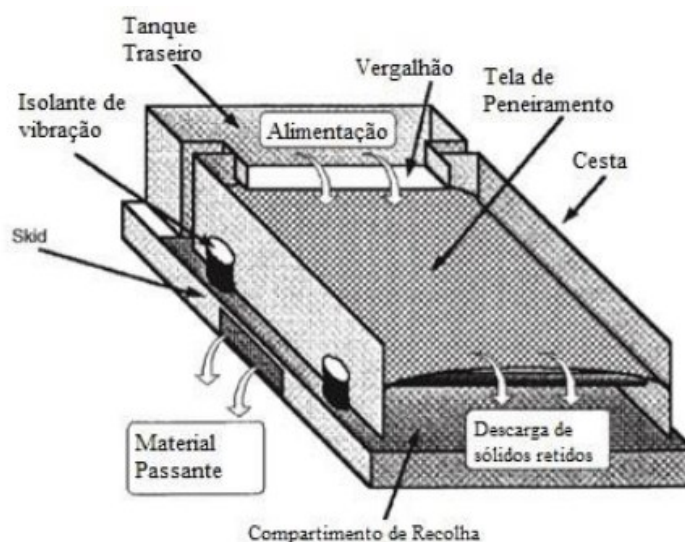


Figura 2.5. Representação simplificada de peneira vibratória
(Fonte: ASME, 2005)

O objetivo principal é remover o máximo possível de sólidos carreados sem remover quantidades excessivas de líquido de perfuração, o que requer grande cuidado visto que o fluido fica impregnado nos sólidos. Isso exige que os cascalhos fiquem retidos na tela enquanto a maior parte do fluido de perfuração é separada e removida. Parar uma peneira vibratória é a maneira mais simples de remover a maior quantidade de cascalhos. Entretanto, isso também removerá a maior parte do fluido de perfuração sem que o mesmo seja reaproveitado (ASME, 2005).

Remover os fragmentos e cascalhos gerados durante a perfuração de poços de petróleo continua sendo uma das principais funções dos fluidos de perfuração, e um dos maiores desafios é relacionar as diversas variáveis que afetam o processo com o teor de umidade impregnado no cascalho na corrente de saída, ou mesmo a eficiência de separação de uma peneira vibratória.

No contexto da operação de uma unidade de tratamento de fluido de perfuração típica, as variáveis de processo que devem ser monitoradas e/ou controladas, são: distribuição do tamanho das partículas, densidade do fluido, viscosidade do fluido, vazão de fluido e variação de volume do fluido na unidade de tratamento.

Algumas destas variáveis já são medidas com relativa facilidade. Dentre elas pode-se citar a densidade, a viscosidade e a variação de volume. Outras ainda requerem o emprego de elementos sensores não totalmente consolidados para medição contínua e em tempo real, tal como o analisador de tamanho de partículas (RONAES et al., 2009).

A otimização de um sistema consiste na determinação de suas variáveis independentes, através de um modelo matemático do mesmo e um algoritmo de programação matemática, com a finalidade de maximizar ou minimizar uma função objetivo sem violar as restrições do referido sistema. A otimização é em tempo real quando a solução deste problema, dita ótima, é obtida periodicamente e implementada de forma automática.

A tecnologia de otimização em tempo real é uma ferramenta poderosa na busca contínua das condições operacionais mais rentáveis de um processo. A otimização em tempo real da operação de um processo pode ser uma tarefa difícil e complexa, porém seus benefícios são relevantes, podendo proporcionar, em conjunto com o emprego de sistemas de controle avançado, uma redução significativa dos custos de operação da referida unidade. Estudos recentes apontam para a necessidade de uma visão global do negócio, bem como a escolha apropriada das restrições do processo para o sucesso de um projeto de otimização em tempo real.

Os benefícios da otimização estão associados à maximização da produção do poço de petróleo e à minimização no consumo específico de energia e de insumos e dependem de fatores, tais como:

- disponibilidade da sonda para aumento da capacidade de produção;

- diferença de preços entre os insumos;
- consumo específico de energia;
- número de variáveis manipuladas e restrições; e
- precisão do modelo do processo (na hipótese de sua aplicação).

A otimização de processo faz a conexão entre as tarefas de planejamento e programação da produção e as executadas por controlador multivariável. Na Figura 2.6 é ilustrada a estrutura tradicional para a otimização em tempo real de um sistema de múltiplos controladores multivariáveis, com seus componentes inter-relacionados. Seus principais componentes são:

a) Modelagem do processo

O modelo matemático deve representar o sistema numa ampla faixa de operação com elevado grau de precisão, de forma que a lucratividade máxima prevista pela função objetivo seja efetivamente a lucratividade potencial do processo real e que, quando implementada na planta a solução do otimizador, não seja violada nenhuma das restrições do processo.

b) Reconciliação de dados e estimativa de parâmetros

Os modelos rigorosos necessitam de muitas informações medidas, as quais apresentam incertezas. Este assunto é tratado pela reconciliação de dados. A primeira fase da reconciliação de dados consiste na detecção de erros grosseiros. Nesta etapa são identificadas e tratadas as medições inválidas decorrentes do inadequado funcionamento da instrumentação. Posteriormente, os pequenos erros dos balanços de massa e energia são distribuídos entre as medições, através do modelo do processo, das incertezas estatísticas dos medidores e das medições redundantes.

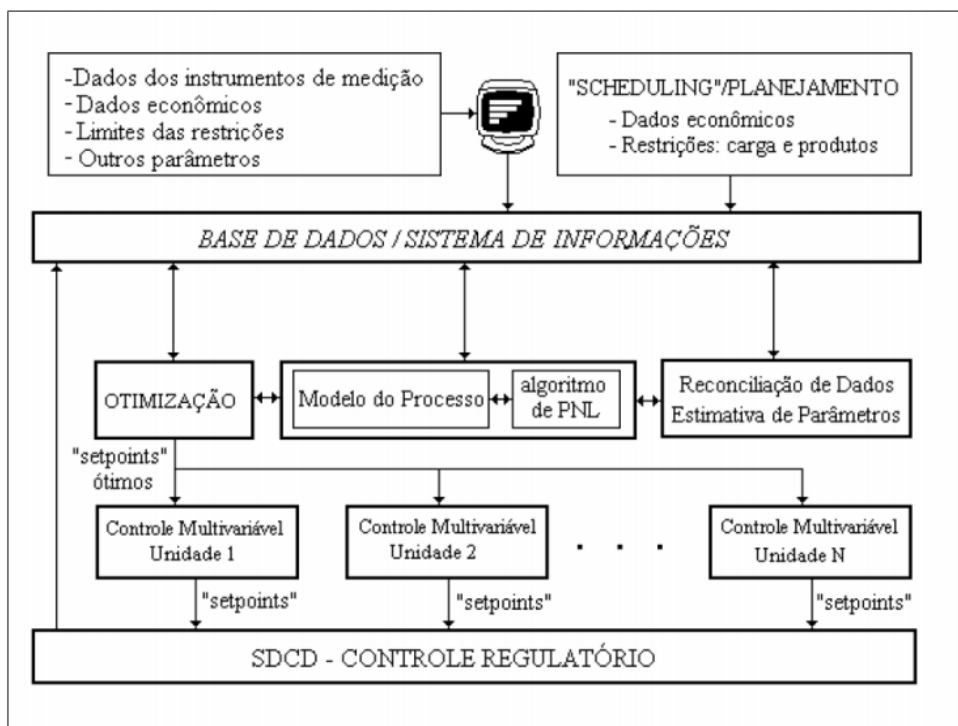


Figura 2.6. Estrutura tradicional para otimização em tempo real
(Fonte: SILVA et al., 2017)

Os modelos rigorosos são assim chamados porque se espera que os mesmos reproduzam com fidelidade o processo real em ampla faixa de operação. Para que isso se concretize, é necessário ajustar seus parâmetros para compensar perturbações não medidas e mudanças no desempenho do processo provocadas por fatores tais como: alterações nas propriedades de transporte do fluido de perfuração, entupimento das telas das peneiras etc. Por analogia aos controladores tradicionais, o ajuste do modelo através da atualização de seus parâmetros a partir de dados da planta, corresponde à retroalimentação do processo.

A identificação da dinâmica de um sistema consiste na determinação da sua estrutura dinâmica através da análise da relação entre as entradas e as saídas do mesmo. Na Figura 2.7 é apresentado um sistema constituído por um processo multivariável genérico com n entradas e m saídas.

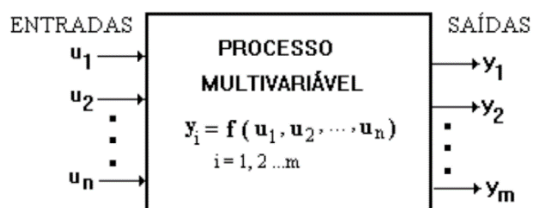


Figura 2.7. Representação típica de um sistema
(Fonte: SILVA et al., 2017)

A estrutura dinâmica de um sistema de controle consiste em utilizar um modelo matemático do processo, o qual pode ser:

- a) **Modelo teórico:** obtido através de equações algébricas e diferenciais envolvendo balanço de massa, energia e momento. Nesta categoria estão os modelos dinâmicos utilizados para treinamento operacional; e
- b) **Modelo empírico:** construído por intermédio de métodos estatísticos. São obtidos dados experimentais de operação da unidade de processo, através dos quais são ajustados os parâmetros do modelo. A quase totalidade dos controladores preditivos multivariáveis utilizados em aplicações industriais possuem um modelo linear do processo, obtido através de testes efetuados na planta. Outro exemplo de modelo empírico é o obtido através de redes neurais.

Os modelos dos processos também podem ser divididos em: (I) - físicos: protótipos e plantas-piloto e (II) - matemáticos: representando os fenômenos físicos através de equações (GARCIA, 2005).

A primeira fase de qualquer estudo sistemático do controle de um determinado processo deve ser o modelamento matemático. Este pode basear-se na modelagem fenomenológica clássica, ou seja, as equações diferenciais que regem o processo ou em testes realizados diretamente na planta.

Na prática, todos modelos são aproximações dos processos reais, pois os processos industriais apresentam comportamentos que muitas vezes não podem ser incorporados no modelo, tanto porque estes fenômenos são desconhecidos como porque os modelos matemáticos poderiam ser extremamente complexos.

Grande parte dos processos, em particular os industriais, que requerem controle, possuem diversas variáveis controladas e manipuladas, correspondentes às entradas e saídas do processo. Em certos casos, os pares de variáveis de uma entrada e de uma saída podem ser considerados independentes.

Nestes casos, o problema multivariável pode ser subdividido em diversos problemas simples do tipo SISO (*single input single output*). Contudo, na maioria das vezes, as diversas variáveis de entrada e saída são interdependentes. Neste caso, o problema é tratado como MIMO (*multiple inputs multiple outputs*), conforme já ilustrado na Figura 2.7. Estas interações

podem acarretar desempenho insatisfatório ou mesmo instabilidade, caso sejam empregadas técnicas de controle clássicas. A identificação do modelo utilizado em controladores preditivos pode ser realizada tanto em malha fechada como em malha aberta.

Um dos principais equipamentos para o funcionamento correto e adequado da unidade de tratamento do fluido de perfuração é a peneira. Sem um peneiramento adequado do fluido de perfuração neste estágio inicial de separação de sólidos, a eficiência e efetividade de todo o sistema fica seriamente comprometida.

As peneiras modernas de alto desempenho estão equipadas com motores vibratórios que produzem movimentos de vários tipos e permitem variadas inclinações da tela e são capazes de operar com telas tão finas quanto 200 *mesh* na maioria das vazões encontradas em poços. A identificação da dinâmica das peneiras deverá ser feita levando-se em consideração as variáveis de processo apresentadas na Figura 2.8.

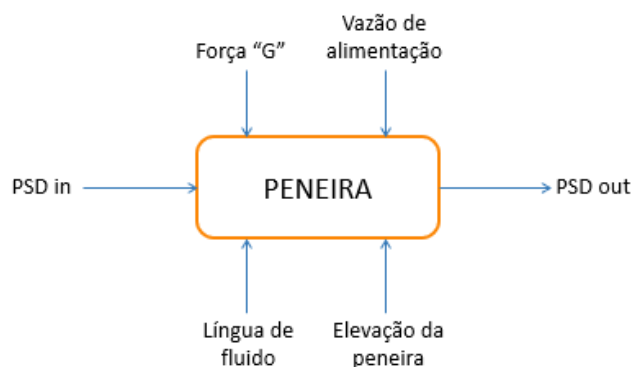


Figura 2.8. Diagrama de blocos que ilustra as principais variáveis de processo consideradas na identificação do modelo de uma peneira
(Fonte: A autora)

De uma maneira simplificada, podem-se classificar as variáveis de processo estudadas em: variáveis de saída e de entrada do modelo. A principal variável de saída será a Distribuição de Tamanho de Partículas (*PSD*, em inglês), considerada para fins de identificação como a variável a ser controlada neste sistema. As variáveis de entrada do sistema, são: (I) a Distribuição de Tamanho de Partículas; (II) a força “G” aplicada; (III) a elevação da peneira; (IV) a língua de fluido sobre a tela da peneira e (V) a vazão de fluido de processo alimentada.

Para fins de posterior equacionamento do sistema a ser identificado, pode-se assumir que dentre as variáveis de entrada, a *PSD in* e a vazão de alimentação serão distúrbios, ao passo que a força “G” e a elevação da peneira serão as variáveis manipuladas do sistema.

No contexto da Indústria 4.0, o conceito de Internet of Things (IoT) pode se aplicar na automação de equipamentos da indústria pesada, como a peneira vibratória utilizada nas indústrias petrolíferas. O desenvolvimento de redes de computadores modernas levou à criação de novos tipos de sistemas de controle automatizado de processos. Equipamentos modernos de medição de informações e tecnologias de transmissão de dados resolvem muitos problemas associados à coleta, conversão, transmissão e armazenamento de diversas informações para controle de processos (KONDRATENKO et al., 2017).

A abordagem do conceito de IoT consiste em uma rede de objetos físicos (“*things*”) ou aparelhos inter-relacionados que tem sensores embutidos e softwares que os permitem transferir e trocar dados entre a esfera física e os sistemas computacionais fazendo o uso de protocolos de comunicação padrões. Além de sensores, a rede pode contar com atuadores embutidos nos objetos e conectados juntos por redes com ou sem fio. Esses objetos correlacionados, por sua vez, tem a capacidade de leitura e atuação de dados de acordo com sinais de controle e funções de programação (KONDRATENKO et al., 2017). Para implementação desse conceito as tecnologias a seguir são amplamente utilizadas:

Ferramentas de identificação: equipamentos para registro e processamento de informações, bem como atuadores, estão presentes em qualquer sistema IoT. É necessário garantir um alto nível de conexão de rede e identificação única de elementos de sistema de software e hardware. Os problemas de identificação dependem do número de conexões simultâneas com a internet que o sistema suporta. A identificação de elementos da rede pode ser obtida também com o auxílio de chips RFID que podem transmitir informações para dispositivos de leitura sem sua própria fonte de alimentação, de modo que cada chip possui um número único. Ainda como alternativa, podem ser usados os *QR-Codes*. Além disso, para determinar a localização exata dos objetos IoT pode ser usada a tecnologia GPS.

1. **Instrumentos de medição:** por meio de medição do objeto, os transdutores são geralmente entendidos e são projetados para gerar dados de medição de forma adequada para posterior transmissão, transformação, processamento e armazenamento. A tecnologia IoT usa diferentes ferramentas de medição, desde os sensores básicos (temperatura, ângulo de rotação etc.) até dispositivos de medição de consumo (medidores inteligentes) para sistemas integrados complexos. Todas os

instrumentos de medição são combinados, via de regra, nas redes de sensores com ou sem fio, devido ao que é possível construir sistemas de interação M2M. Os sensores de medição podem ser fixados permanentemente e, também, tem uma mobilidade relativa que os permite mover livremente em relação aos outros sensores em um certo espaço, sem quebrar a conectividade lógica da rede.

2. **Meios de processamento de dados:** para o processamento e armazenamento de dados coletados a partir dos sensores é aconselhável o uso de software embarcado e meios de hardware na forma de pequenos computadores com acesso à internet (Ex: Raspberry, Pi, Intel Edison). Ademais, o processamento final e tomada de decisão são realizadas com o uso de tecnologias de *Big Data*.
3. **Meios de transmissão de dados:** a gama de tecnologia de transmissão de dados abrange todos os meios possíveis de redes sem e com fio. Para transmissões sem fio as seguintes qualidades devem ser consideradas: eficiência em baixas velocidades, resiliência, adaptabilidade e capacidade de auto-organização. Em tecnologias com fio, os componentes de interação padrão de rede já estabelecidos nas indústrias é utilizado como o Profibus, Canbus etc.

Conhecida como IloT (*Industrial Internet of Things*), os equipamentos a serem integrados são complexos tecnicamente e é necessária a implementação de um sistema de monitoramento e controle automático via internet, com alta qualidade e em tempo real. Qualquer erro técnico causado por um controle incorreto, retardando o desempenho, perda de Internet temporariamente etc., pode levar a uma redução da eficiência econômica ou até a graves acidentes industriais. Assim, os sistemas IloT devem incluir software e hardware altamente eficientes, meios para a implementação de algoritmos especializados de monitoramento e automação ao controle. Além disso, esses sistemas devem ter um maior nível de confiabilidade, desempenho e segurança da informação.

Tais sistemas devem ter uma estrutura modular com meios de software e hardware confiáveis e altamente eficientes, bem como interfaces de comunicação industrial, localizadas nas proximidades dos objetos técnicos, para monitoramento e implementação de controle automático em modo seguro e ininterrupto a nível local. Além disso, esses sistemas devem ser facilmente integrados em sistemas IloT existentes de grande escala por meio de conexões de Internet com ou sem fio que

cobrem um ou um grupo de empresas industriais para monitoramento e controle automático à nível remoto.

3 O PROTÓTIPO DE PENEIRA ESTUDADO

3.1 A peneira vibratória em escala industrial

A unidade experimental disponível para os ensaios conta com uma peneira MONGOOSE PRO, mostrada na Figura 3.1, com área de peneiramento de 2,73 m² e com dois motovibradores em contra rotação de 1.800 RPM e 2,5 CV cada. O equipamento pode operar em duas condições vibratórias, sendo uma de menor intensidade (denominada “*Normal*”) que atinge 6,5 g e outra, com maior intensidade (denominada “*Capacity*”), que atinge 7,5 g de acordo com as informações disponibilizadas pelo fabricante.



Figura 3.1. Modelo da peneira vibratória utilizada nos testes
(Fonte: Mi SWACO Schlumberger Company, 2020)

Durante o processo de peneiramento é possível ajustar o ângulo da tela do equipamento, que pode variar de -3° a +3° como mostrado na Figura 3.2.

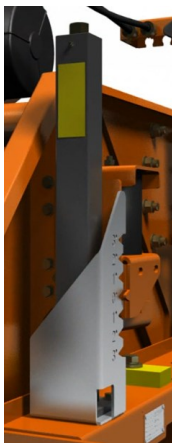


Figura 3.2. Sistema de ajuste da inclinação da tela
(Fonte: Mi SWACO Schlumberger Company, 2020)

Para operação do sistema, uma estrutura de aço carbono com 3 m de altura e piso com área de 15 m² foi construída. A suspensão é bombeada do tanque de mistura, que possui capacidade de 3.000 litros, para a peneira por uma bomba de lama Warman Weir 4/3C – AH com motor WEG de 15 CV para alimentação da peneira. O filtrado e o material retido pela tela de peneiramento são canalizados para o tanque de mistura. A peneira vibratória se encontra no topo do sistema e o tanque de alimentação na parte de baixo, de forma que o fluido e os sólidos presentes na suspensão operem em um circuito fechado. A unidade experimental como um todo pode ser vista na Figura 3.3.



Figura 3.3. Unidade experimental em estudo
(Fonte: A Autora, 2020)

3.2 O sistema de monitoramento e controle

A unidade experimental está equipada com uma placa de aquisição de dados da *National Instruments* (NI), modelos USB-6211. O software supervisor utilizado foi o *LabVIEW* na versão 64 bits de 2014 da mesma empresa.

Esta placa de aquisição de dados (DAQ) multifuncional tem oito entradas diferenciais e duas saídas analógicas, com taxa de amostragem de 250 kS/s na faixa de -10V a 10V e resolução de 16 bits. Também comporta quatro entradas e quatro saídas digitais, dois contadores de 32 bits e sua alimentação é realizada por barramento USB. Neste trabalho foram utilizados: uma entrada analógica para aquisição de dados de um acelerômetro e uma saída analógica para comunicação com inversor de frequência WEG- CFW700 responsável pelo controle da velocidade de rotação dos motovibradores da peneira.

Para o controle da vibração da peneira foi utilizado um acelerômetro modelo PCB Piezoelectronic 646B00, configurado para faixa de leitura de 0 a 10 grms, com não linearidade de 1% (VARGAS et al., 2015). O sensor envia as informações do adimensional de força-g para a placa de aquisição (NI-USB 6211) e através do supervisor *LabView* é calculada a resposta do controlador. Um inversor de frequência vetorial (WEG –CFW700) é o elemento transdutor responsável por controlar a rotação dos dois motores responsáveis pela vibração da peneira e consequentemente o valor do adimensional de força-g de operação do sistema. Na Figura 3.4 é mostrada a interface com o usuário desenvolvida no *software LabView*, e na Figura 3.5 a configuração da estratégia de controle.

A interface com o usuário permite definir o valor do *set-point* do adimensional de força-g e utilizar o sistema de controle da unidade, tanto no modo automático quanto no modo manual, habilitando a inserção do valor da velocidade de rotação dos motores vibratórios para os casos em que não seja necessário o controle automático da força-g. No caso de um controle automático de força-g, deve-se selecionar um valor de *set-point* para a aceleração de modo que o aplicativo compara o valor recebido do acelerômetro com o valor desejado e atua no inversor de frequência para compensar o erro: caso a força-g medida seja superior ao *set-point* o inversor diminui

a vibração e, analogamente, caso a força-g medida seja inferior ao set-point o inversor aumenta a vibração da peneira (SILVA et al., 2017). Em todos os casos o sistema faz a aquisição de dados de força-g e o usuário acompanha estes valores em tempo real por meio de um gráfico. Além disso, o usuário tem acesso à informação da amplitude de vibração da peneira, sendo os valores coletados em intervalos de 1 segundo, com opção de geração de um arquivo do tipo planilha eletrônica para armazenar os valores aquisitados.

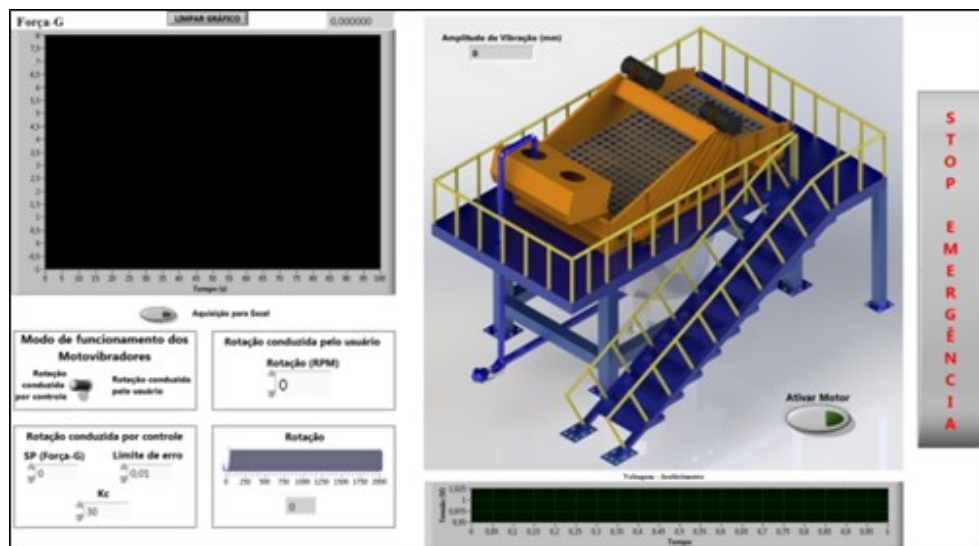


Figura 3.4. Interface Homem-Máquina utilizada
(Fonte: SILVA et al., 2017)

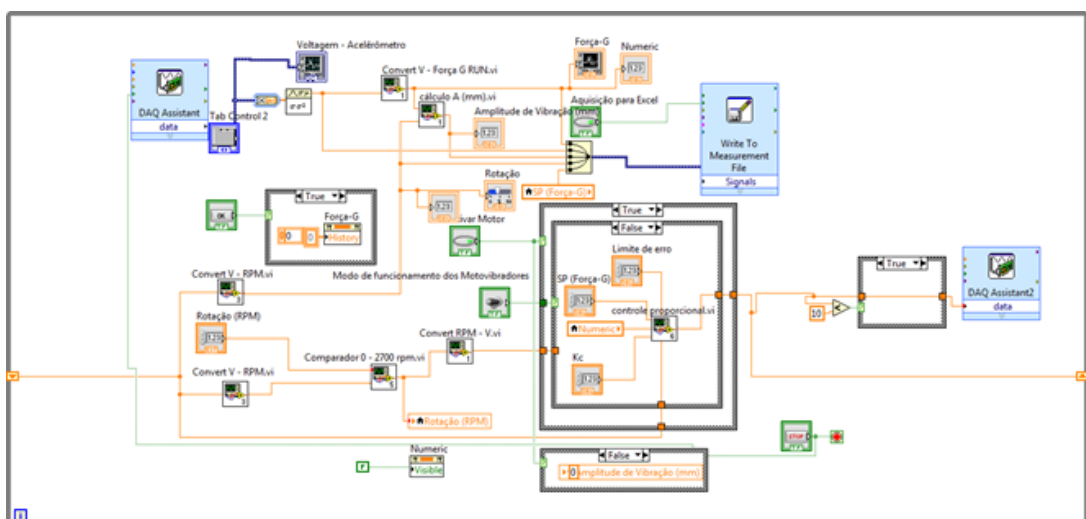


Figura 3.5. Estratégia de controle configurada
(Fonte: VARGAS et al., 2015)

A estratégia de controle é configurada com base em blocos funcionais previamente definidos na base de dados do aplicativo *LabView*. O algoritmo do

controlador empregado é o proporcional, em que o parâmetro ganho proporcional adotado foi 30 ($K_c = 30$), o qual pode ser alterado de acordo com a necessidade de resposta do sistema (mais lenta ou mais rápida).

É válido destacar que o ganho do controlador (K_c) representa a sensibilidade que o mesmo deve apresentar para reagir a distúrbios da malha de controle. Valores elevados de K_c tendem a favorecer o comportamento instável do processo, existindo um valor limite de ganho do controlador, acima do qual o sistema começa a oscilar de maneira contínua e com amplitudes cada vez maiores (SILVA et al., 2016).

4 A AUTOMAÇÃO MODERNIZADA PROPOSTA

4.1 Readequação da estrutura da peneira industrial

O primeiro passo para a implementação do sistema de automação modernizado consiste em readequar a estrutura de suportação da peneira vibratória, como apresentado na seq ncia:

- Reforço da estrutura de sustentação da peneira visando diminuir a vibração dela quando da realização dos experimentos.
- Alterações na tubulação de descarga da bomba para instalação de medidor de vazão de alimentação da peneira e de ramal de recirculação com válvula de regulagem manual.
- Instalação de tampa no tanque de suspensão para evitar o respingo de suspensão para o ambiente externo.
- Instalação de suportes adequadamente posicionados para fixar as câmeras de vídeo, o sensor de umidade e o sensor de nível.
- Aquisição de conjunto extra de telas de separação para substituição das existentes em caso de desgaste ou danos sofridos durante a realização dos experimentos.

4.2 Especificar, instalar e comissionar o sistema de controle da peneira vibratória

Deverão ser comprados e instalados os seguintes instrumentos/dispositivos que atuarão como elementos sensores ou como elementos finais de controle das malhas de controle a serem implementadas no sistema digital de controle:

- 01 medidor de vazão do tipo CORIOLIS para tubulação de 3 polegadas de diâmetro, com capacidade para medir e transmitir vazão mássica e densidade;
- 01 acelerômetro capaz de medir a vibração do cesto da peneira em dois eixos;
- 01 medidor de nível para avaliar o comportamento do nível de fluido na região de piscina sobre a tela da peneira;
- 02 câmeras de vídeo para monitorar a posição da língua de fluido sobre a tela da peneira;
- 01 sensor de umidade para os sólidos retidos;
- 02 servomotores para atuar no sistema de ajuste de inclinação do cesto da peneira; e
- 01 transdutor de corrente elétrica para avaliar a corrente elétrica consumida pelo motor em tempo real.

O sistema de controle que se pretende utilizar deverá ser composto por controlador lógico programável e respectivo software, considerando como requisito essencial a robustez do hardware e a confiabilidade do software.

Será utilizado um aplicativo robusto e confiável de visão computacional, visando obter o máximo de recursos para a monitoramento da posição da língua de fluido.

A lógica de controle será revisada e ampliada de modo a contemplar no algoritmo de controle as seguintes variáveis de processo que afetam a operação da peneira, a saber: inclinação do cesto da peneira, posição da língua de fluido, umidade, adimensional de força-g, concentração e vazão mássica de alimentação.

Será necessário o treinamento da equipe envolvida neste subprojeto na utilização dos recursos avançados do sistema de controle, o qual deverá seguir o padrão tecnológico vigente, que aponta para a integração da informação e dos equipamentos (indústria 4.0 e IIoT – “Industrial Internet of Things”).

4.3 Obter e validar os modelos matemáticos semi-empíricos na estratégia de controle.

Serão realizados experimentos com a peneira em escala industrial para definir os modelos matemáticos semi-empíricos que serão usados para estimar o comportamento das variáveis de processo de interesse, tais como: teor de líquido residual arrastado com o sólido retido e eficiência de separação granulométrica. Por se tratar de modelos identificados experimentalmente, eles podem ser executados mais rapidamente, permitindo que o sistema de controle obtenha informação antecipada sobre a tendência de comportamento do processo frente a perturbações. Os modelos matemáticos semi-empíricos farão parte da estratégia de controle a ser configurada no sistema de controle e deverão funcionar em tempo real, permitindo recalcular o set-point de operação automaticamente em função de alteração nos valores das seguintes variáveis de processo: concentração de alimentação, vazão mássica de alimentação e posição da língua de fluido sobre a tela da peneira.

4.4 Configurar os modelos matemáticos na base de dados do sistema de controle e realizar testes de funcionamento visando manter, de forma autônoma, a operação da peneira na condição mais adequada

Serão realizados experimentos com a peneira em escala industrial, equipada com o sistema de controle acoplado com os modelos matemáticos, contemplando variações de carga nos valores das variáveis de processo de interesse. O objetivo é manter a peneira na condição de operação mais adequada, a saber: (I) proporcionar o menor arraste de líquido residual, (II) proporcionar a maior eficiência de separação granulométrica e (III) encontrar o ponto de operação que permita o menor consumo de energia possível. Será considerado nos experimentos assegurar a manutenção da posição da língua de fluido no ponto desejado de operação frente a variações de carga de alimentação ou de bloqueio parcial da tela de separação. E, também,

experimentos que permitam avaliar o desgaste da tela em função da operação da peneira com diferentes inclinações do cesto da peneira vibratória.

5 CONCLUSÃO

As alterações propostas neste trabalho apontam para a possibilidade de melhoria da capacidade de operação da peneira vibratória existente no Laboratório de Separação Sólido/Líquido da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia:

1. Implantação (fase avançada) de sistema de monitoração em tempo real do teor de líquido residual arrastado pelos sólidos retidos na peneira industrial;
2. Aplicação de processamento de imagens para melhorar o controle em tempo real da operação da peneira;
3. Instalação de sensores industriais para melhorar a confiabilidade da operação do equipamento e permitir a implantação de estratégia de controle multivariável.

Com a aplicação das modificações sugeridas neste trabalho, as seguintes metas poderão ser alcançadas em médio prazo:

Meta 1: operação mais segura do equipamento (sob o ponto de vista de impacto ao meio ambiente) e maior economia de energia, (reduzindo a demanda do sistema de geração de energia elétrica da plataforma).

Meta 2: monitorar o estado da tela por meio de variáveis operacionais facilmente mensuráveis; e

Meta 3: permitir que a operação da peneira se de dentro da área de restrições operacionais definidas, preservando a vida útil das telas e do equipamento como um todo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANÁLISE DE PARÂMETROS DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO - Revista Transformar |12(2), ago./dez. 2018. E-ISSN:2175-8255.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Combustíveis. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/petroleo-derivado/petroleo>>. Acesso em 24 de Outubro de 2020
- ASME SHALE SHAKER COMMITTEE. **Drilling Fluid Processing Handbook**. [s.i.]. Elsevier Inc., 2005.
- FERNÁNDEZ, F.E.; PEDROSA JUNIOR, O. A.; PINHO, A.C.; Dicionário do Petróleo em Língua Portuguesa: exploração e produção de petróleo e gás: uma colaboração Brasil, Portugal e Angola. 1º edição. Rio de Janeiro: Lexikon: PUC-Rio, 2009. 665p.
- GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Dinâmicos**. 2005. EDUSP, São Paulo.
- ILZUKA, E. K. Análise de tensões em peneiras vibratórias através de modelagem numérica utilizando o método dos elementos finitos e experimentalmente por extensometria. Mestrado. Campinas, SP: [s.n.], 2006.
- KONDRATENKO, Y.P., KOZLOV, O.V., KOROBKO, O.V., TOPALOV, A.M. Internet of things approach for automation of the complex industrial systems. *In: Proceedings of the 13th International Conference on Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer, ICTERI 2017, CEUR-WS, Kyiv, Ukraine, vol. 1844.*
- LOBATO, F. S., OLIVEIRA-LOPES, L. C., GEDRAITE, R., NEIRO, S. M. S., MURATA, V. Identificação de modelos para unidades de recuperação do fluido de perfuração. *In: Anais do IV Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás, Foz do Iguaçu - PR, 2011.*

LOBATO, M. Blowout de ideias. Maio de 2011. Disponível em: <http://blowoutdeideias.blogspot.com.br/2011/05/por-dentro-dos-fluidos-deperfuracaoe.html>>.

MACHADO, J. C. **Fundamentos e Classificação de Fluidos Viscosos. Reologia e Escoamento de Fluidos– Ênfase na indústria do petróleo.** Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2002. pg 1-40.

Mi SWACO Schlumberger Company. Key features of the MONGOOSE PRO Shale Shaker. Disponível em: <<https://www.slb.com/-/media/files/mi/brochure/mongoose-pro-shaker-brochure>>. Acesso em 24 de Outubro de 2020.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 3ª edição, 2000.

RONAES, E., VIK, S. E., TAUGBOL, K., SJAHOLM, A.; KAAGESON-LOE, N. (2009). Remote real-time monitoring of particle size distribution in drilling fluids during drilling of a depleted HTHP reservoir. *In: Proceedings of SPE/IADC*, pp. 1-11, Manama, Bahrain, 26-28 October 2009.

ROSA, A. J.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, J. A. D. **Engenharia de Reservatórios de Petróleo.** Editora Interciência. Rio de Janeiro/RJ, 2006.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLINCHAMP, D. A. (2005). **Process Dynamics and Control.** Wiley, 2nd Ed., USA.

SCHAFFEL, S. B.; A Questão Ambiental na Etapa da Perfuração de Poços Marítimos de Óleo e Gás no Brasil [Rio de Janeiro] 2002 VIII, 130 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M. Sc., Programa de Planejamento Energético, 2002).

SILVA, R. M.; BARBOSA, V. P.; FREITAS, M. S.; GEDRAITE, R. Aplicação de malha de controle de força-G em protótipo de peneira vibratória. *In: Anais da XXI Jornada em Engenharia Química.* 22 a 26 de agosto de 2016, Uberlândia, MG.

SILVA, R. M.; BARBOSA, V. P.; MENEZES, A. L.; GEDRAITE, R.; ATAIDE, C. H. Estudo experimental acerca da influência da vibração sobre o teor de umidade residual em

material sólido granular utilizando protótipo de peneira vibratória. *In: Anais do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica (XII 27 COBEQ IC 2017)*. 16 a 19 de julho de 2017, São Carlos, SP.

SILVA, R. M.; SANTIAGO, T. S. A.; BARBOSA, V. P.; ATAÍDE, C. H.; GEDRAITE, R. Sintonia de controlador de vibração em protótipo de peneira vibratória usando método da síntese direta. *In: Anais da XXII Jornada em Engenharia Química*. 25 a 29 de setembro de 2017, Uberlândia, MG.

SOUZA, P. J. B. D.; LIMA, V. L. D. Avaliação das técnicas de disposição de rejeitos da perfuração terrestre de poços de petróleo. Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia – Monografia. Salvador, BA, 2002.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 1ª edição. Rio de Janeiro: Interciência, 2001. 271 p.

VARGAS, I.K.G.; GUERREIRO, F.S.; GEDRAITE, R. Instrumentação aplicada a protótipo de peneira vibratória. *In: Anais do XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica (XI COBEQ IC 2015)*. 19 a 22 de julho de 2015, Campinas, SP.

WANZELER, I. P., Avaliação da recuperação da barita no processo de tratamento de sólidos em centrífugas horizontais. Trabalho de conclusão de curso. UFAM, Manaus, AM, Brasil, 2016.