



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



**ANÁLISE DE IMAGEM APLICADA EM PROCESSO DE
PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO**

RAQUEL MENEZES SILVA

Uberlândia – MG

2017



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



ANÁLISE DE IMAGEM APLICADA EM PROCESSO DE PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO

Raquel Menezes Silva

Monografia de graduação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia como parte
dos requisitos necessários para a aprovação na
disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do
curso de Engenharia Química

Uberlândia – MG

2017

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE RAQUEL MENEZES SILVA
APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 15/12/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Rubens Gedraite.
Orientador FEQ/UFU

Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
FEQ/UFU

Mestre Neiton Carlos da Silva
FEQ/UFU

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, o maior mestre que alguém pode conhecer, que tem me permitido vencer diversas etapas, incluindo esta, e que tem estado presente em todos os momentos da minha vida, me orientando, disciplinando e guardando.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela pela qual, hoje, vislumbro um horizonte superior. Por toda a confiança no mérito e ética aqui presentes e depositados em mim ao longo de toda a graduação.

Ao meu orientador, Professor Rubens Gedraite, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos, além de toda a confiança e apoio. Agradeço também ao mestrando Vinícius P. Barbosa, por me disponibilizar grande parte de seu tempo e estudos, além das constantes revisões, sugestões, críticas e ensinamentos.

Agradeço a minha mãe, heroína que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço. Pelas longas correções e formatações e por todo o amor e dedicação em todos os momentos. Ao meu pai, que sempre colocou nossa educação e conhecimentos em primeiro lugar.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação. Aos meus amigos, tanto os que trouxe em meu coração, quanto aos que fiz em Uberlândia. Aos meus familiares, o meu muito obrigada.

*Pois o que você ouve e vê depende do lugar em
que se coloca, como depende também de quem
você é.*

(C. S. Lewis)

Sumário

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas.....	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura do Trabalho.....	3
2. PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO.....	5
2.1. Formação do Reservatório	5
2.2. Processo de Exploração do Petróleo	6
2.3. Fluido de Perfuração	10
2.4. Peneira Vibratória	11
3. SISTEMA DE ANÁLISE DE IMAGEM DIGITAL	15
3.1. Imagem Digital.....	15
3.2. Análise de Imagem Digital.....	19
3.2.1. Reconhecimento de Padrões.....	21
3.3. Filtros para Imagens Digitais	22
3.3.1. Filtro Passa-baixa	23
3.3.2. Filtro Unsharp Masking	23
3.3.3. Filtro Erode	23
3.3.4. Filtro Sharpen.....	24
3.3.5. Remove Outliers.....	24
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
5. MATERIAIS E MÉTODOS	29
5.1. Materiais Utilizados	29
5.2. Metodologia Empregada	30
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
7. CONCLUSÕES.....	41
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

Lista de Figuras

Figura 1 – Reservatório típico de petróleo e gás	6
Figura 2 – Esquema de sonda de perfuração rotativa	9
Figura 3 - Representação dos tipos de sondas marítimas	9
Figura 4 - Representação de peneira vibratória	12
Figura 5 - Exemplo de quantização e amostragem de uma imagem	15
Figura 6 - Exemplo de diferentes resoluções para a mesma imagem.....	16
Figura 7 - Tipos de vizinhança entre pixels.....	17
Figura 8 - Exemplo de imagem em níveis de cinza e binarizada	19
Figura 9 - Um Sistema de Visão Artificial (SVA) e suas principais etapas.....	20
Figura 10 - Ilustração da unidade experimental utilizada.....	29
Figura 11 – Etapas do procedimento experimental	32
Figura 12 – Gráfico do Teor de Umidade para experimentos descendentes.	34
Figura 13 – Gráfico da Área de Secagem para experimentos descendentes.	34
Figura 14 – Gráfico do teor de umidade para os experimentos ascendentes.....	36
Figura 15 – Gráfico da Área de secagem para os experimentos ascendentes.	37
Figura 16 - Áreas de secagem dos experimentos (a).	38
Figura 17 - Áreas de secagem dos experimentos (b).	39
Figura 18 - Áreas de secagem dos experimentos binarizada (a).	39
Figura 19 - Áreas de secagem dos experimentos binarizada (b).	40

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Equipamentos e Instrumentos da bancada experimental.	30
Tabela 2 - Resultados obtidos após a análise.	33

RESUMO

Ao longo das etapas de perfuração de poços de petróleo, o fluido de perfuração, que é usado principalmente para retornar os cascalhos gerados pela ação da broca de volta à superfície, deve ser limpo para que o mesmo possa ser retornado e reutilizado no processo. Para isso é usada uma série de equipamentos sequenciais que consistem basicamente em peneiras vibratórias, baterias de hidrociclones e centrífugas decantadoras. No presente trabalho, toma-se como enfoque as peneiras vibratórias, que são a primeira barreira no controle de sólidos quando o fluido de perfuração retorna à superfície. Sabe-se que seu funcionamento interfere no funcionamento dos demais equipamentos, logo seu entendimento e otimização torna-se fundamental. Para um melhor entendimento da dinâmica que ocorre sobre sua tela e das variáveis que podem influenciar em seu funcionamento, um protótipo de peneira vibratória foi equipado com uma câmera e os experimentos realizados, que seguiam um planejamento 2^k , foram gravados para posterior análise. Logo, como objetivo do trabalho, buscou-se entender melhor a ferramenta de análise de imagem, seus conceitos e fundamentos e aplicar a técnica nos experimentos gravados. Intentou-se analisar de forma qualitativa como a força-g aplicada, a vazão de alimentação, inclinação da tela da peneira e concentração volumétrica poderiam interferir no teor de umidade dos sólidos retidos e na área de tela ocupada. Para isso, os vídeos foram divididos em frames e para cada experimento foi realizada uma análise em triplicata, em que as imagens foram estudadas a partir da técnica de binarização. Avaliou-se que todas as variáveis possuem uma influência significativa, em especial a força-g e a inclinação, porém as mesmas não poderiam ser analisadas de forma separada, uma vez que o efeito em conjunto produz melhores condições de operação. Concluiu-se, também, que a ferramenta de análise de imagem, apesar de pouco explorada no curso de graduação, pode ser extremamente útil e de grande valia no campo de estudos das engenharias.

Palavras-chaves: peneira vibratória, análise de imagem, binarização, força-g, concentração volumétrica, vazão de alimentação, inclinação.

ABSTRACT

Throughout the stages of oil well drilling, the drilling fluid, which is used to return the drilled solids generated by the action of the drill back to the surface, must be cleaned so that it can be returned and reused in the process. A series of sequential equipment was used for this, which basically consist of shale shakers, hydrocyclones and decanting centrifuges. In the present work, the focus is on shale shakers, which are the first line of defense in the solids-removal chain when the drilling fluid returns to the surface. It is known that its operation interferes in the operation of other solids-removal equipment, so its understanding and optimization become fundamental. For a better understanding of the dynamics that take place on its screen and of the variables that may influence its operation, a prototype of a shale shaker was equipped with a video camera and the experiments, that followed a 2^k planning, were recorded for later analysis. Therefore, the aim of this work was to better understand the image analysis tool, its concepts and fundamentals, and to apply this technique to the recorded experiments. It was sought to analyze by qualitative form how the applied g-force, feed rate, sieve screen tilt and volumetric concentration could interfere in the amount of liquid removed from the drilling solids and the occupied screen area. For this, the videos were divided into frames and for each experiment a triplicate analysis was performed, in which the images were studied with the binarization technique. It was evaluated that all variables have a considerable influence, especially the g-force and sieve screen tilt, but they could not be analyzed separately, since the combined effect produces better operating conditions. It was also concluded that the image analysis tool, although little explored in the graduation course, can be extremely useful in the field of engineering studies.

Keywords: shale shaker, image analysis, binarization, g-force, volumetric concentration, feed rate and sieve screen tilt.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa

Diversas civilizações antigas já mostravam a importância do petróleo para o dia-a-dia do ser humano. Os gregos e romanos o utilizavam para fins bélicos enquanto os egípcios utilizavam o petróleo como um elemento para o embalsamento de corpos, pavimentação de estradas, além de fazer utilização do betume para a união de gigantescos blocos de rochas na construção de pirâmides. Sabe-se que com o passar dos anos ele foi ganhando cada vez mais importância e funcionalidade. Desde querosene para iluminação até gasolina e diesel combustíveis, o petróleo vem encontrando diversas funções em múltiplas áreas, tornando-se indispensável à vida moderna (SOUZA; LIMA, 2002).

A dependência global por petróleo e o grande número de empresas que atuam na área juntamente com as crescentes exigências ligadas às questões ambientais, tem feito com que as empresas do ramo invistam cada vez mais em inovações tecnológicas. Isto se deve às necessidades de mercado ligadas à lucratividade, à competitividade e à adequação de produtos e efluentes às novas normas ambientais, cada vez mais rigorosas, e que são aplicadas em todas as etapas de exploração de um poço, desde sua perfuração até a venda dos insumos provenientes de sua exploração (ASME, 2005; PEREIRA, 2010).

Ocorre que, após a viabilidade econômica e de exploração de um poço de petróleo, há o início da perfuração do poço, que consiste em abrir o caminho pelo qual o petróleo escoará até a superfície. Nesta etapa é utilizado o fluido de perfuração, cujas principais funções são: conduzir os cascalhos até a superfície; manter a estabilidade mecânica do poço; resfriar a broca; transmitir força hidráulica até a mesma; manter os cascalhos em suspensão quando não há circulação; lubrificar a coluna de perfuração, entre outros (SILVA *et al.*, 2017 a). Porém, ao serem retirados do poço, os cascalhos estão impregnados com o fluido, que contém diversos componentes tóxicos. Devido a restrições ambientais e fatores econômicos, é de extrema importância a separação deste fluido de perfuração dos cascalhos.

Assim sendo, a procura por lucratividade e adequação à legislação leva as empresas petrolíferas à necessidade de soluções quanto ao controle de sólidos em sondas de perfuração de petróleo e gás. Esse fato torna a separação sólido-líquido indispensável ao reaproveitamento do fluido de perfuração e a adequação do cascalho às leis ambientais, cada vez mais rígidas (PEREIRA, 2010).

Como consequência, profissionais de diversos campos e diferentes áreas vêm desenvolvendo processos capazes de melhorar a eficiência da separação sólido-líquido. Uma ferramenta útil foi o aperfeiçoamento de equipamentos já utilizados não apenas na exploração do petróleo, mas em áreas como a mineração e indústrias de carvão. A recuperação do fluido de perfuração é de suma importância na operação dos poços de petróleo dos pontos de vista econômico, ambiental e operacional. Isto porque a recuperação dos fragmentos e detritos gerados durante a perfuração permite o reaproveitamento do fluido, garante uma melhor eficiência na sua utilização durante o processo e evita o descarte do produto, o qual contém componentes químicos nocivos para o meio ambiente (DA MATTA *et al.*, 2015).

Sabe-se, hoje, que o bom projeto de um sistema de controle de sólidos é realizado através de vários tipos de equipamentos instalados em série que apresentam uma alta dependência com o seu antecessor. Isso é, para que um dado equipamento tenha eficiência adequada, o equipamento em série imediatamente anterior deve estar operando de acordo com sua capacidade, para que não haja sobrecarga no equipamento seguinte, reduzindo a eficiência global do sistema (PETROBRAS, 2008 apud PEREIRA, 2010). Por fim, chegou-se a um processo em que os equipamentos utilizados incluem, em sua maioria, três grupos sequenciais: peneiras vibratórias, baterias de hidrociclones e centrífugas decantadoras.

As peneiras têm um papel fundamental na eficiência global no processo de separação de sólidos, visto que são os primeiros equipamentos a partir do *flowline* (PEREIRA, 2013). A eficiência de remoção de sólidos pode ser verificada de duas maneiras: quanto a maior fração de sólidos removidos e quanto a menor fração de sólidos no efluente de descarte. Ambos os aspectos devem ser considerados (GUERREIRO, 2013; GUERREIRO, 2016). Um dos principais desafios nesse processo é caracterizar o tamanho das partículas e material sólido nas correntes de entrada e de saída da peneira. Assim, é possível ajustar condições operacionais, tais como: a vazão do fluido, a frequência e amplitude de vibração da esteira, além da inclinação da tela de filtração visando melhorar a eficiência da operação de retirada dos detritos e minimizar o seu desgaste (DA MATTA *et al.*, 2015).

1.2. Objetivos

Diante dessa dificuldade de caracterização das partículas e do material sólido nas correntes de entrada da peneira vibratória, busca-se entender de maneira mais precisa a dinâmica ocorrida sobre sua tela. Assim, através da instrumentação, pesquisa-se um meio de compreender as diversas variáveis que interferem no processo e que, manipuladas corretamente,

podem ser a chave para um aumento de eficiência na separação do sólido do fluido de perfuração.

Uma ferramenta que vem sendo incorporada cada vez mais em diversas áreas é o processamento de imagem digital, cuja pesquisa tem produzido resultados de grande relevância para diversos segmentos da sociedade. Como exemplos, pode-se citar a reconstrução 3D de cenas reais, rastreamento em tempo real, controle de processos de manufatura ou sistemas industriais, identificação e segmentação de objetos ou imagens humanas, entre outros. Algumas das principais técnicas utilizadas em aplicações de processamento de imagem digital, cujo objetivo é a classificação a partir das dimensões do objeto, incluem a binarização e a conectividade (GONZALES; WOODS, 2009; DA MATTA *et al.*, 2015).

Ao se fazer a captura de imagens digitais em um ambiente real pode haver, muitas vezes, interferências indesejadas ou imperfeições devido às diferentes tonalidades e fontes de luz diretas ou refletidas, prejudicando o processamento da imagem em questão. Dessa forma, pode-se utilizar algoritmos digitais que permitem a implementação de filtros capazes de remover pontos destoantes de luz, refinar bordas, delimitar contornos do objeto estudado entre outras funções (GONZALES; WOODS, 2009).

Este trabalho propõe um melhor entendimento dos conceitos de processamento e análise de imagem, ferramenta pouco explorada ao longo do curso de graduação. Busca-se, também, entender a base de seu funcionamento de forma simplificada, aplicando suas técnicas no processo de peneiramento vibratório em suspensão de areia, usando um protótipo de peneira vibratória. Com isso, deseja-se ampliar os conhecimentos acerca da dinâmica da peneira relacionando as imagens e dados obtidos com algumas de suas variáveis de processo, como área da tela ocupada, vazão de alimentação e teor de umidade dos sólidos retidos.

1.3.Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em sete capítulos, incluindo este introdutório.

O capítulo 2 traz uma breve apresentação do sistema de perfuração de poços de petróleo. São abordadas a operação de peneiramento e as funcionalidades do fluido de perfuração.

No capítulo 3 são apresentadas as características de um sistema de visão computacional, desde a definição de imagem digital e sua descrição até reconhecimento de padrões e uso de filtros para imagens digitais.

O capítulo 4 apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre instrumentação de peneira vibratória e análise de imagem.

O capítulo 5 aborda os materiais e métodos utilizados no trabalho. É apresentado como a análise de imagem foi utilizada no protótipo de peneira vibratória.

Os resultados obtidos e discussões são apresentados no capítulo 6. Nele é explorado como algumas das variáveis do processo podem se relacionar de maneira qualitativa às imagens obtidas.

As conclusões são apresentadas no capítulo 7.

2. PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

O petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos - moléculas compostas de carbono e hidrogênio, compostos voláteis (enxofre, oxigênio, nitrogênio e azoto) e metais. No estado líquido, é uma substância oleosa, inflamável, menos densa que a água, com cheiro característico e cor variando entre o negro e o castanho-claro (THOMAS, 2001). Atualmente, existem mais de 200 tipos de petróleo sendo comercializados no mundo (ALMEIDA, 2002). Sua variedade se deve à sua composição: quanto maior a quantidade de hidrocarbonetos de longas cadeias, mais viscoso e mais escuro será o petróleo.

Diferente do que muitos pensam, as reservas de petróleo não existem na forma de grandes lagos subterrâneos. Se assim fosse, a exploração do petróleo seria uma atividade muito mais simples do que é na realidade (ALMEIDA, 2002). Para se ter uma acumulação de petróleo é necessário que, após o processo de geração na rocha denominada geradora, ocorra a migração do líquido até encontrar um terreno poroso para se concentrar, denominado de rocha reservatório.

2.1. Formação do Reservatório

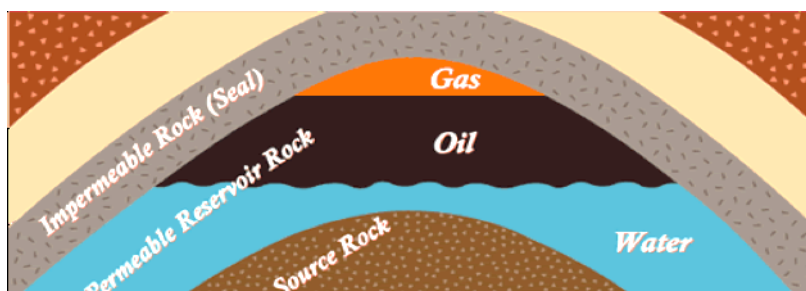
As rochas reservatórios são formadas através da migração do petróleo a partir das rochas geradoras. Caso não houvesse esta migração, o óleo estaria disperso numa forma de lama no terreno poroso (bacia sedimentar), sendo economicamente inviável sua recuperação. Porém, uma vez formado, as gotículas de petróleo tendem a migrar para a superfície, visto que é mais leve que a água. O caminho da migração é determinado pelo tipo de solo e rochas que tem que atravessar (ALMEIDA, 2002).

O óleo se concentra no reservatório devido a existência de uma armadilha geológica que interrompe a migração do petróleo para outras áreas. Trata-se de uma rocha impermeável num formato de concha de cobertura, que impede que o óleo vá para a superfície. Essa rocha, também conhecida como selante, possui baixa permeabilidade e deve ser dotada de plasticidade, característica que a capacita a manter sua condição selante mesmo após submetida a esforços e deformações (THOMAS, 2001). Em função dessa armadilha, o petróleo é concentrado abaixo da rocha de cobertura.

Após sua geração e migração, o petróleo fica armazenado nos poros ou fissuras da rocha reservatório, que pode ter qualquer origem ou natureza desde que apresente uma porosidade adequada. Deve, também, apresentar permeabilidade suficiente para permitir o escoamento do

óleo, ou seja, apresentar poros que estejam interconectados. A permeabilidade influenciará o ritmo de produção de petróleo da reserva. Se a rocha for muito permeável, o petróleo contido na mesma pode ser extraído com facilidade. Caso contrário, a produtividade será menor (ALMEIDA, 2002). A Figura 1, a seguir, ilustra um típico reservatório de petróleo.

Figura 1 – Reservatório típico de petróleo e gás



Fonte: Google

A Figura 1 também mostra que o reservatório não é composto apenas por petróleo, ou seja, a concentração do óleo não ocorre isoladamente, mas na presença de água e gás. Por efeito de gravidade, os componentes se organizam abaixo da rocha de cobertura devido a diferença entre suas densidades. Assim, encontra-se água na camada mais inferior e gás na parte superior da rocha. Por estarem armazenados sob pressão, quando a perfuração do poço atinge o reservatório, os fluidos tendem a subir para a superfície devido à diferença de pressão. Sabe-se que a pressão de um reservatório é de suma importância, visto que é ela quem determina a produção de petróleo ou gás (ALMEIDA, 2002).

2.2. Processo de Exploração do Petróleo

A descoberta de uma jazida de petróleo em uma nova área é uma tarefa que envolve um longo e dispendioso estudo e análise de dados geofísicos e geológicos das bacias sedimentares (THOMAS, 2001). O processo de exploração de petróleo pode ser dividido em duas etapas principais: a primeira constituída de estudos geológicos e geofísicos, também conhecida como prospecção; e a segunda constituída pela perfuração, podendo ser de um ou mais poços, tanto para a exploração quanto para a melhoria da qualidade dos estudos. Em média, um programa de exploração leva cerca de oito anos para a realização de todas as etapas (ALMEIDA, 2002).

Na primeira etapa de um programa exploratório é realizado um estudo geológico. Neste estudo, são elaborados mapas de geologia de superfície com o apoio de fotogeologia e aerofotogrametria; é inferida a geologia de subsuperfície a partir dos mapas de superfície e dados de poços; além de se analisar as informações de caráter paleontológico (estudo dos

fósseis) e geoquímico. Busca-se, assim, reconstituir as condições de formação e acumulação de hidrocarbonetos na região a ser estudada (THOMAS, 2001).

O levantamento de informações sobre as características do solo, a análise da probabilidade de presença de óleo e o volume estimado da reserva é o principal papel da geologia na prospecção do petróleo. A exploração geológica começa pelo mapeamento das áreas onde é possível a ocorrência de reservas de petróleo, também conhecidas como bacias sedimentares, em que existe a presença de rochas sedimentares acima de rochas de base. O trabalho de um geólogo do petróleo consiste em colocar um pequeno “x” num mapa de grande extensão indicando o local exato para perfuração de um poço de petróleo (ALMEIDA, 2002).

Já a geofísica pode ser definida como o estudo das características das rochas e identificação das estruturas geológicas. Os primeiros tipos de estudos geofísicos basearam-se no desenvolvimento do gravímetro e magnetômetro. Estes aparelhos medem a intensidade gravitacional e o campo magnético da terra, respectivamente, e podem ser empregados para o estudo das características do solo na busca de acidentes geográficos que possam ser armadilhas para o petróleo (ALMEIDA, 2002).

Outro método de prospecção bastante utilizado atualmente, devido ao baixo custo, é a prospecção sísmica. O levantamento sísmico inicia-se com a geração de ondas elásticas que se propagam pelo interior do planeta, através de fontes artificiais como a dinamite, o vibrador em terra e canhões de ar comprimido em levantamentos marítimos. Essas ondas são refletidas e refratadas nas interfaces que separam rochas de diferentes constituições petrofísicas e retornam à superfície, onde são captadas por sofisticados equipamentos de registro (THOMAS, 2001). Busca-se, assim, as deformações geológicas típicas de armadilhas para o petróleo.

Os dados obtidos na prospecção sísmica devem ser processados com o objetivo de produzir imagens da subsuperfície com a máxima fidelidade possível, atenuando as várias distorções “ópticas” presentes no método. Geólogos e geofísicos interpretam estas imagens na busca de situações mais favoráveis à acumulação de hidrocarbonetos, ou para caracterizar reservatórios produtores, melhorando o gerenciamento da produção (THOMAS, 2001). Esta interpretação é crucial para minimizar o risco geológico de grandes investimentos para perfuração de poços na busca do óleo ou gás, embora somente a perfuração de um poço revelará se os prognósticos serão ou não confirmados (ALMEIDA, 2002).

A segunda etapa principal consiste na perfuração do poço de petróleo, realizada através de uma sonda. Na perfuração rotativa, as rochas são perfuradas pela ação da rotação e peso

aplicados a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração, que consiste basicamente de comandos (tubos de paredes espessas) e tubos de perfuração (tubos de paredes finas). Os fragmentos da rocha são continuamente removidos através do fluido de perfuração, sendo que o fluido é injetado por bombas para o interior da coluna de perfuração através da cabeça de injeção, ou *swivel*, e regressa à superfície através do espaço anular formado pelas paredes do poço e a coluna.

Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada do poço e uma coluna de revestimento de aço, de diâmetro inferior ao da broca, é descida no poço. O espaço anular entre os tubos do revestimento e as paredes do mesmo é cimentado para se isolar as rochas atravessadas, permitindo então o avanço da perfuração com segurança. Após a cimentação, a coluna de perfuração é novamente descida no poço, tendo na sua extremidade uma nova broca de diâmetro menor do que a do revestimento para o prosseguimento da perfuração. Nota-se, assim, que um poço é perfurado em diversas fases ininterruptas, seja em terra ou em mar, caracterizadas pelos diferentes diâmetros das brocas (THOMAS, 2001).

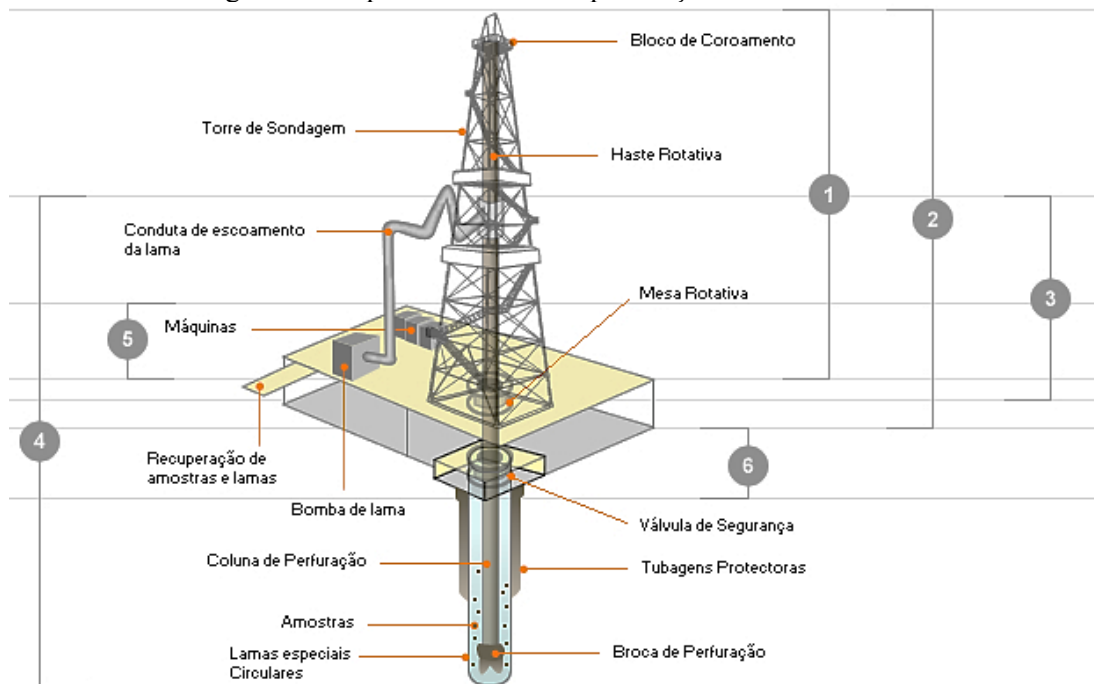
A Figura 2 mostra um esquema simplificado de uma sonda de perfuração rotativa. De acordo com a figura, pode-se observar a representação de:

1. Sistema de sustentação de cargas: sustenta a coluna de perfuração e as tubagens de proteção;
2. Sistema de movimentação de cargas: através de cabos, permite a movimentação da coluna de perfuração e das tubagens de proteção;
3. Sistema de rotação: induz a rotação da broca, que contribui para perfurar a formação;
4. Sistema de circulação: permite a circulação e o tratamento do fluido de perfuração;
5. Sistema de geração e transmissão de energia: A energia, proveniente de motores a diesel ou energia elétrica, aciona todos os equipamentos da sonda;
6. Sistema de segurança do poço: permite o controle e fechamento do poço, quando ocorre um influxo indesejável da formação para o poço.

Existem basicamente dois tipos de unidades de perfuração marítimas: as com o *Blowout Preventer* (BOP – conjunto de válvulas que permitem o fechamento do poço para medidas de segurança, evitando erupções de gás ou óleo) na superfície, tais como plataformas fixas e as auto eleváveis; e as com BOP no fundo do mar, conhecidas como unidades flutuantes, tais como as semissubmersíveis e os navios-sonda. Seu emprego fica condicionado à distância que vai do fundo do mar até a superfície, condições de relevo, finalidade do poço, além da relação

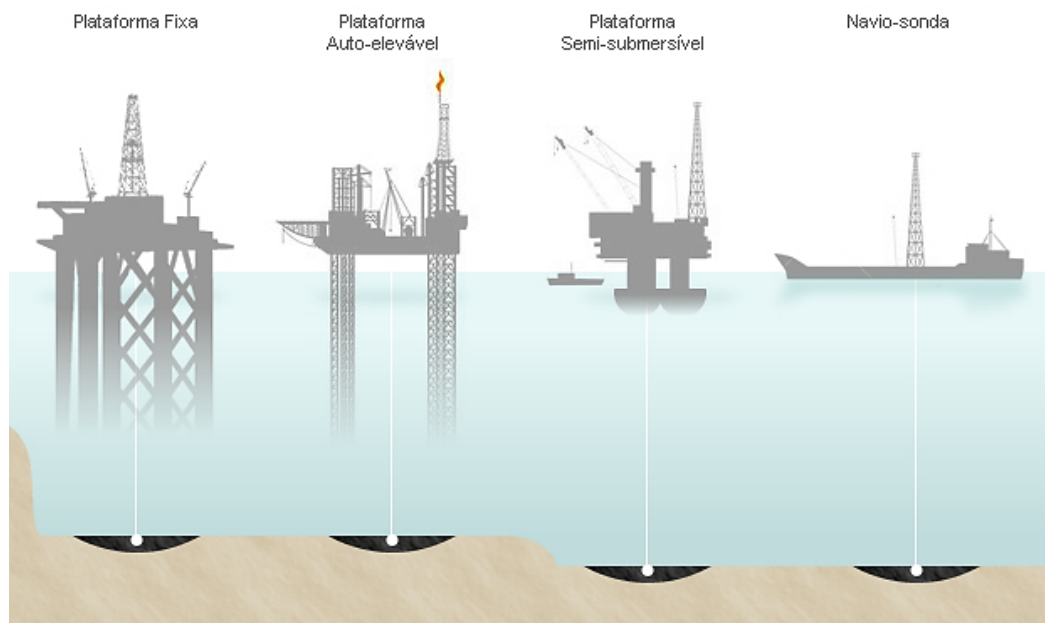
custo/benefício. Vale ressaltar que em qualquer um dos sistemas as colunas de revestimento são sempre ancoradas no fundo do mar para evitar sobrecarga na sonda, o que resulta em maior estabilidade da plataforma (THOMAS, 2001). A Figura 3 retrata os diferentes tipos de sonda de perfuração marítimas.

Figura 2 – Esquema de sonda de perfuração rotativa



Fonte: Adaptado de GALP, 2011.

Figura 3 - Representação dos tipos de sondas marítimas



Fonte: Adaptado de GALP, 2011.

2.3.Fluido de Perfuração

Um fluido ou lama de perfuração, como também é conhecido, é qualquer fluido que possa ser usado em uma operação de perfuração. São misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e, por vezes, até gases. Do ponto de vista químico, eles podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependendo do estado físico dos componentes (LIMA, 2001).

Esse fluido é circulado ou bombeado da superfície, descendo o poço através da broca e retornando à superfície através do espaço anular entre a parede do poço e a broca de perfuração, trazendo consigo os cascalhos cortados pela broca (ASME, 2005). 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 hidráulicamente 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).

Para cumprir suas finalidades, o fluido necessita possuir a capacidade de não reagir com as formações com as quais entre em contato; ser estável quimicamente; ser inerte em relação a danos às rochas produtoras; ser bombeável; além de apresentar baixo grau de corrosão e de abrasão em relação à coluna de perfuração e demais equipamentos do sistema de circulação (THOMAS, 2001).

A classificação de um fluido de perfuração se dá em função do constituinte principal da fase contínua ou dispersante, sendo a seguinte (SOUZA; LIMA, 2002):

a) Fluidos à base de água: a água é a fase contínua e seu principal componente, podendo ser doce, dura ou salgada. A principal função da água é prover o meio de dispersão para os materiais coloidais. Estes, principalmente as argilas e polímeros, controlam a viscosidade, capacidade de estabilização das paredes do poço, entre outros (SOUZA; LIMA, 2002).

b) Fluidos à base de óleo: a fase contínua é o óleo, que pode conter até 45% de água (emulsão inversa, na qual as gotas de água ficam encapsuladas pelo óleo, tendo uma maior dificuldade de interagir com as rochas ativas). As principais características dos fluidos à base de óleo, e que lhes confere vantagens sobre os fluidos à base de água, são: grau de inibição elevado em relação às rochas ativas; baixíssima taxa de corrosão; propriedades controláveis

acima de 175°C; grau de lubricidade elevado; amplo intervalo de variação de densidade (de 0,89 a 2,4 g/L); baixíssima solubilidade de sais inorgânicos (SOUZA; LIMA, 2002).

Porém, os fluidos à base de óleo apresentam algumas desvantagens em relação aos fluidos à base de água, ressaltando-se: menores taxas de penetração; maior grau de poluição; maior custo inicial e dificuldade no combate à perda de circulação. Muitos progressos têm sido alcançados nos últimos anos em relação às pesquisas de novos sistemas à base de óleo, sendo utilizados óleos minerais e sintéticos, que além de serem menos poluentes que o óleo diesel, são mais biodegradáveis (SOUZA; LIMA, 2002).

Vale lembrar que a função mais crítica e essencial que um fluido de perfuração desempenha é minimizar a concentração de cascalhos ao redor da broca e ao longo do poço. É claro que, ao fazê-lo, o próprio fluido assume essa carga de sólidos e, se os cascalhos não forem removidos, muito rapidamente se perde a habilidade de limpar o poço. Para permitir a reciclagem no local e a reutilização da lama de perfuração, os sólidos provenientes da ação de corte das formações rochosas devem ser continuamente removidos (ASME, 2005). Os principais equipamentos utilizados em uma unidade típica de controle de sólidos para a separação sólido-líquido são divididos em três grupos sequenciais: peneiras vibratórias, baterias de hidrociclones (desareiaadores e dessiltadores) e centrífuga decantadora (LOBATO *et al.*, 2011).

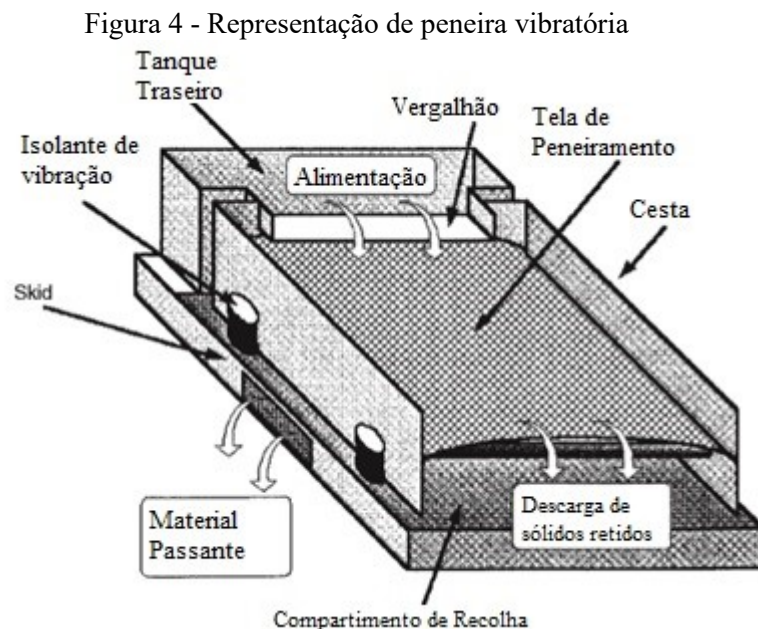
Sendo a primeira barreira no controle de sólidos, o desempenho das peneiras vibratórias afeta drasticamente a eficiência dos demais equipamentos subsequentes. Um dos principais objetivos no controle de sólidos é remover a maior quantidade de partículas grandes na primeira vez que esses sólidos são bombeados para o exterior do poço. Logo, o entendimento de como a peneira funciona e como é possível otimizá-la torna-se essencial.

2.4.Peneira Vibratória

Peneira vibratória é um termo geral para um dispositivo vibratório usado para separar sólidos de um fluido de perfuração circulante (ASME, 2005). Muitas configurações podem ser usadas, dentre elas:

- a) Área de triagem quadrada ou retangular com fluxo ao longo do comprimento;
- b) Telas cilíndricas vibratórias, não rotativas, com fluxo longitudinal ao longo do eixo central;
- c) Telas circulares com fluxo do centro para o exterior.

A peneira vibratória pode ser usada em todas as aplicações de perfuração em que o líquido, sendo a base de água ou óleo, é usado como fluido de perfuração. 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 b). A Figura 4 mostra um esquema simplificado de uma peneira vibratória. Sabe-se que a medida que o volume do sólido reduz, e, conseqüentemente, sua área superficial, aumenta-se o volume da camada líquida impregnada no sólido. Logo, aberturas moderadas da tela da peneira provocam um maior retorno de fluido de perfuração do que aberturas muito pequenas (PEREIRA, 2013).



Fonte: Adaptado de ASME, 2005.

O objetivo principal é remover o máximo possível de sólidos perfurados 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).

O peneiramento é uma operação unitária de simples execução, contudo sua descrição matemática e entendimento detalhado podem ser bastante complexos (STANDISH, 1985; LESCHONSKI, 1979). Essas dificuldades baseiam-se no fato de muitas variáveis afetarem a operação de uma peneira vibratória típica, tais como: a tela de peneiramento (formato e tamanho das aberturas); a amplitude e frequência de vibração; o ângulo de inclinação da cesta da peneira; massa específica e distribuições de tamanho e forma das partículas a serem peneiradas; a viscosidade da suspensão; entre outros. Além disso, tem-se as diversas interações entre essas variáveis, o que concede um grau de complexidade ainda maior à operação. Todas essas características mostram porque ainda não foi desenvolvida uma metodologia geral e eficiente para a predição da operação de peneiramento (LIU, 2009; SILVA *et al.*, 2017 b).

O efeito de algumas variáveis operacionais sobre o desempenho do peneiramento vibratório tem sido alvo de estudo de diversos autores, não apenas na área de perfuração de poços de petróleo, mas também na área de mineração (MAKINDE *et al.*, 2015). Fowler & Lim (1959) investigaram, no peneiramento a seco, os efeitos da taxa de alimentação, frequência de vibração, ângulo de inclinação e tamanho de abertura da tela sobre a efetividade de uma peneira vibratória. Beeckmans *et al.* (1985) estudaram o comportamento do diâmetro de corte sobre a influência do ângulo de inclinação, taxa de alimentação, frequência e amplitude de vibração, abertura de tela e massa específica dos sólidos utilizados nos experimentos. Standish *et al.* (1986) estudaram o efeito da alimentação, ângulo do deck, rotação dos motovibradores, proporção de partículas de tamanho superior à abertura da tela, massa específica e tamanho relativo de partículas sobre a eficiência de peneiramento com uma abordagem cinética. Dorry (2010) avaliou a velocidade de transporte de sólidos em função da força-g. Trumic & Magdalinovic (2011) realizaram, também, uma análise cinética de peneiramento de sólidos minerais para avaliar a influência de fatores como dimensões da tela de peneiramento, distribuição de tamanho de partícula, formato dos materiais particulados, a massa inicial de sólidos e massa específica.

Na área de Modelagem, estudos como de Yin *et al.* (2016) estuda o efeito da frequência e amplitude de vibração na velocidade de transporte de sólidos e eficiência de separação granulométrica. Já Zhao *et al.* (2016) realizou a modelagem de uma peneira com vibração circular e validação experimental do modelo.

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.

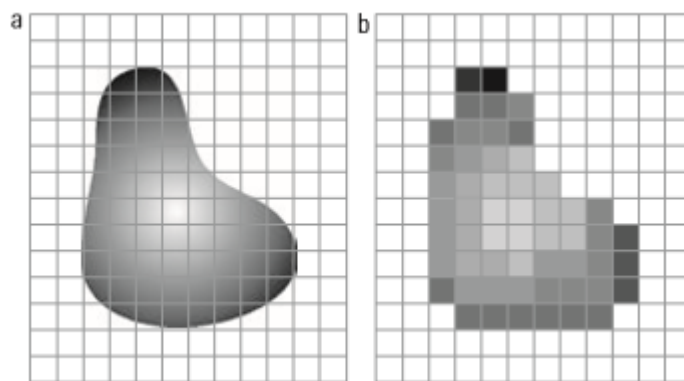
3. SISTEMA DE ANÁLISE DE IMAGEM DIGITAL

Imagem monocromática pode ser definida como uma função bidimensional, $f(x, y)$, em que x e y são as coordenadas planas espaciais, e a amplitude da função f em qualquer par de coordenadas (x, y) é chamada de intensidade ou nível de cinza da imagem nesse ponto. Se x , y e os valores de intensidade de f tiverem quantidades finitas e discretas, é chamada de imagem digital (GONZALEZ; WOODS, 2009).

3.1. Imagem Digital

Por meio de um elemento sensor é possível fazer a captura da imagem de um objeto real, que poderá ser discretizada e quantizada, resultando em uma imagem digital. Sabe-se que o processo de discretização do eixo x (o domínio) é chamado de Amostragem e o do eixo $f(x)$ (o contradomínio) é chamado de Quantização e que, uma vez amostrado o plano, temos uma matriz de valores que representam a cor. Cada elemento dessa matriz é chamado de Pixel (abreviação de *Picture Element*) e ela busca representar, da melhor maneira possível, a imagem tridimensional original a partir de um modelo bidimensional (SCURI, 1999). A Figura 5 ilustra o processo de quantização e amostragem de uma imagem contínua, em que 'a' representa a imagem original em uma matriz de sensores e 'b' representa o resultado da amostragem e quantização.

Figura 5 - Exemplo de quantização e amostragem de uma imagem



Fonte: GONZALEZ & WOODS, 2009.

Uma das primeiras aplicações das imagens digitais ocorreu no envio das imagens por cabo submarino entre Londres e Nova York, na indústria dos jornais. A implementação do sistema de transmissão de imagens por cabo submarino (cabo Bartlane) no início da década de 1920 reduziu o tempo necessário para transportar uma fotografia pelo oceano Atlântico de mais de uma semana para menos de três horas. Os primeiros sistemas Bartlane codificavam uma

imagem em cinco níveis de intensidade de cinza distintos. Esta capacidade seria expandida, já em 1929, para 15 níveis. Um equipamento de impressão especializado codificava as imagens para a transmissão a cabo e depois as reconstruía no recebimento (FILHO; NETO, 1999; GONZALEZ; WOODS, 2009).

Sabe-se que quanto maior a quantidade de pixels existentes melhor será a representação da imagem, ou seja, sua representação será cada vez mais similar à imagem tridimensional original. Isso porque aumentando-se o tamanho da matriz de pixels, melhora-se a resolução da imagem, ampliando, conseqüentemente, o espaço na memória necessário para armazená-la (MATTA, 2013). A Figura 6 ilustra os diferentes tamanhos da matriz de pixels para uma mesma figura.

Figura 6 - Exemplo de diferentes resoluções para a mesma imagem



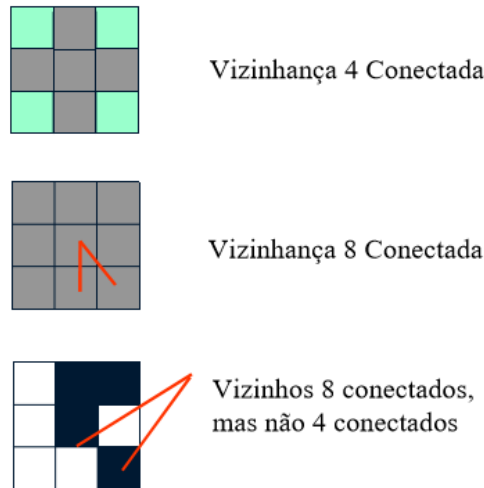
Fonte: LIMA, 2010.

Como visto, pixels são normalmente quadrados, gerando uma grade (grid) regular devido à amostragem uniformemente espaçada. Um problema que aparece nesse momento é definir quais são os vizinhos de um determinado pixel, problema fundamental para algoritmos de preenchimento de áreas e algoritmos de determinação de continuidade de objetos na imagem (SCURY, 1999).

Podem ser definidos dois tipos de vizinhança em uma grade regular: a vizinhança 4 conectada, em que os vizinhos são equidistantes; e a 8 conectada, onde nem todos são equidistantes, visto que os vizinhos na diagonal estão mais distantes que aqueles nas laterais.

Normalmente usa-se uma combinação das duas vizinhanças, definindo 4 conectada para os objetos e 8 conectada para o fundo. A Figura 7 ilustra os dois tipos de vizinhança abordados.

Figura 7 - Tipos de vizinhança entre pixels



Fonte: SCURY, 1999.

Já a origem do sistema de coordenadas de uma grade é normalmente localizada no canto superior esquerdo na maioria dos sistemas de processamento de imagem, mesmo podendo ser posicionada em qualquer lugar da imagem ou até mesmo fora dela. Essa preferência pelo canto superior esquerdo, com o eixo y invertido em relação ao padrão da matemática, é herdada dos próprios dispositivos de visualização, onde a primeira linha a ser redesenhada é a do topo da tela, que segue o padrão de escrita ocidental (da esquerda para a direita, de cima para baixo) (SCURY, 1999).

Sendo R um subconjunto de pixels de uma imagem, a fronteira (também chamada de borda ou contorno) dessa região é o conjunto de pontos adjacentes aos pontos que estão fora do subconjunto R . Dito de outra forma, a fronteira de uma região é o conjunto de pixels da região que tem pelo menos um vizinho no fundo da imagem, ou seja, que não é o objeto principal selecionado ou o que se quer estudar. Se R for a imagem inteira (que, lembrando, é um conjunto retangular de pixels), sua fronteira será definida como o conjunto de pixels da primeira e última linha e da primeira e última coluna da imagem (GONZALEZ; WOODS, 2009).

A maioria das imagens são capturadas em cores, isto é, o sensor de captura absorve os fótons e monta de três a quatro matrizes de pixels ao invés de apenas uma (MATTA, 2013), dependendo do dispositivo de captura de imagem e do modo como a mesma será visualizada. Sabe-se que grande parte dos modelos de cores utilizados atualmente é orientada ou em direção ao hardware (como no caso de monitores e impressoras coloridas) ou em direção a aplicações

envolvendo a manipulação de cores (como a criação de imagens coloridas para uma animação). Em termos de processamento digital de imagens, o modelo orientado para hardware mais utilizado na prática é o RGB tanto para monitores coloridos quanto para uma ampla classe de câmeras de vídeo em cores (GONZALEZ; WOODS, 2009).

Assim, são formadas três matrizes nesse sistema, em que cada uma representa os componentes espectrais primários, sendo estes: Vermelho (*Red*), Verde (*Green*) e Azul (*Blue*), dando origem ao nome do modelo. Isto significa dizer que, do ponto de vista construtivo, cada pixel é na verdade uma combinação de três pequenos pixels, um para cada cor primária. Quando alimentadas em um monitor RGB, esses três componentes se combinam na tela para produzir uma única imagem de cores compostas, ou melhor, cores formadas pela junção das três matrizes de cores primárias.

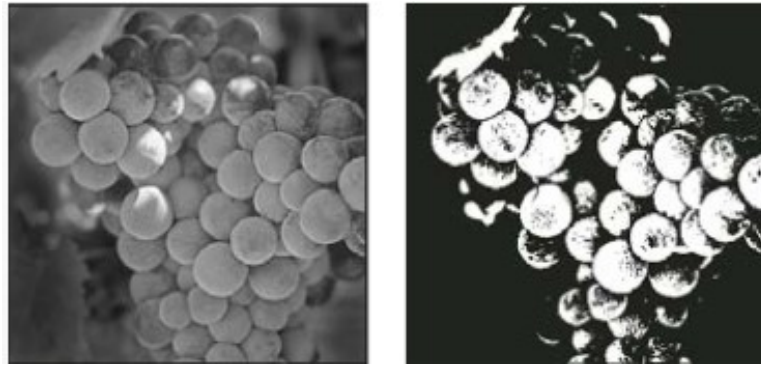
Em diversas ocasiões torna-se necessário obter uma imagem em níveis de cinza (*greyscale*), mesmo que a mesma tenha sido capturada em cores. Existem diversas técnicas para se fazer tal transformação, dentre as quais uma das mais comuns é a utilização da expressão matemática utilizada por Araújo (2010):

$$L[i, j] = 0,299 \cdot R[i, j] + 0,587 \cdot G[i, j] + 0,144 \cdot B[i, j] \quad (1)$$

Em que $L[i, j]$ é o valor do nível de cinza do pixel $[i, j]$, as variáveis i e j representam a linha e a coluna da imagem, respectivamente e $R[i, j]$, $G[i, j]$, $B[i, j]$ os valores do pixel nas matrizes vermelha, verde e azul.

Outra forma de se representar uma imagem é conhecida como imagem binária (preto e branco puros). Ela pode ser definida como grupos de pixels de frente (valor 1, ou seja, a presença de todas as cores definindo o tom branco) e de fundo (valor 0, completa ausência de cor, definindo o preto). A partir de uma imagem em níveis de cinza é possível convertê-la em binarizada, fixando-se um valor de nível de cinza para ser o ponto de corte, também conhecido como *threshold*. Assim, todos os valores abaixo dele serão determinados como nulos (preto) e todos os valores acima dele serão valores unitários (branco) (MATTA, 2013). A Figura 8 ilustra um exemplo de imagem em níveis de cinza (à esquerda) e a mesma imagem binarizada à direita.

Figura 8 - Exemplo de imagem em níveis de cinza e binarizada



Fonte: Guia do Usuário Adobe.

3.2. Análise de Imagem Digital

O reconhecimento e a classificação de padrões são partes essenciais em um sistema de análise de imagens e tem por objetivo analisar determinado evento ou objeto e classificá-lo dentre várias categorias pré-determinadas. Para isso faz-se necessário o uso de um sistema de visão artificial (SVA) (FILHO; NETO, 1999; MATTA, 2013).

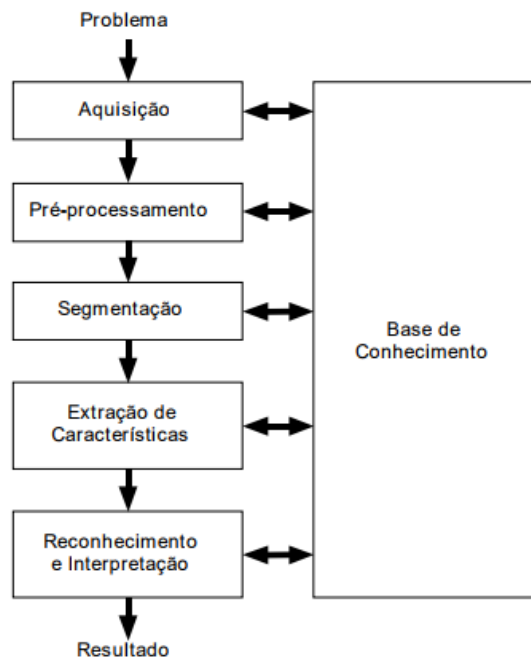
Pode-se definir um sistema de visão artificial como um sistema capaz de adquirir, processar e interpretar imagens correspondentes a cenas reais. A Figura 9 mostra esquematicamente um diagrama de blocos de um SVA, retratando as etapas de um sistema de reconhecimento e classificação de padrões. Sabe-se que a etapa de análise de imagem é representada como extração de características, que também pode englobar as etapas de reconhecimento e interpretação (FILHO; NETO, 1999; MATTA, 2013).

A fase de aquisição tem como função converter uma imagem em uma representação numérica adequada para o processamento digital subsequente. O pré-processamento aprimora a qualidade da mesma para as próximas etapas, visto que a imagem resultante pode apresentar diversas imperfeições, tais como: presença de ruídos, contraste e/ou brilho inadequado, caracteres interrompidos ou indevidamente conectados, entre outros. Caso se faça necessário, pode-se dividir a imagem em unidades significativas, ou seja, nos objetos de interesse que a compõem.

Na etapa de extração de características tenta-se representar a imagem por um conjunto de características próprias, visando caracterizar com precisão cada elemento que a compõe. Vale lembrar que nessa etapa a entrada é a imagem, mas a saída é um conjunto de dados específicos dela. Já na última etapa do sistema, denomina-se reconhecimento o processo de atribuição de

um rótulo a um objeto baseado em suas características. A atribuição é feita a partir da comparação das mesmas com uma classe de padrões previamente estabelecidos ou reconhecidos pelo classificador. A tarefa de interpretação, por outro lado, consiste em atribuir significado a um conjunto de objetos reconhecidos (FILHO; NETO, 1999; MATTA, 2013).

Figura 9 - Um Sistema de Visão Artificial (SVA) e suas principais etapas



Fonte: FILHO & NETO, 1999.

Vale ressaltar que nem todos os sistemas de visão artificial contemplam todas estas etapas, grande parte apenas classifica-os, percorrendo até a fase de reconhecimento. Além disso, todas as tarefas das etapas descritas acima pressupõem a existência de um conhecimento sobre o problema a ser resolvido, armazenado em uma base de conhecimento. Seria ideal que esta base de conhecimento não somente guiasse o funcionamento de cada passo, mas também permitisse a realimentação entre elas. Porém, esta integração entre as várias etapas através da base de conhecimento ainda é um objetivo difícil de alcançar e não está presente na maioria dos SVAs existentes atualmente (FILHO; NETO, 1999).

O principal desafio até hoje permanece sendo o de fazer com que os sistemas de visão artificial trabalhem em diferentes condições de luminosidade, contraste, posicionamento relativo dos objetos em uma cena sem perder a capacidade de interpretá-la, de forma análoga à capacidade humana de reconhecer padrões e objetos, sejam eles inanimados ou não, estejam em movimento ou não.

3.2.1. Reconhecimento de Padrões

Para se entender melhor um sistema de reconhecimento e classificação de padrões é importante assimilar alguns conceitos que se diferenciam pela utilização desejada para a imagem. Os três principais conceitos são:

- i) **Processamento de Imagem:** consiste em transformar sucessivamente uma imagem com o objetivo de extrair mais facilmente a informação nela presente, ou seja, transformar uma imagem em outra resultando em uma versão melhorada (ALBUQUERQUE; ALBUQUERQUE, 2000). Assim, a imagem final apresenta condições suficientes para ser usada em aplicações específicas;
- ii) **Análise de Imagem:** relaciona-se a parte do tratamento onde existe uma descrição da informação presente na imagem. Esta parte é chamada de parametrização e é nela que várias medidas quantitativas (parâmetros) são utilizadas para descrever diferentes informações dentro de uma imagem. De maneira geral, a análise de imagens é um processo de descobrimento, de identificação e de entendimento de padrões que sejam relevantes ao desempenho de uma tarefa fundamentada em imagens (GONZALES; WOODS, 2010).
- iii) **Reconhecimento de Padrões:** busca realizar a descrição baseada em características próprias da imagem, ou seja, processo pelo qual um padrão recebido é descrito, classificado e atribuído a uma classe dentre um número pré-determinado de classes (MATTA, 2013).

Dependendo do modo como o reconhecimento de padrões é realizado, ele pode ser classificado em diferentes técnicas de acordo com MARIN (2003), como:

- a) **Técnica Estatística:** em que um padrão é representado por um conjunto de características chamado de vetor de característica d-dimensional. Ou seja, os dados de entrada do sistema de reconhecimento são organizados em vetores de características.
- b) **Técnica Estrutural-Sintática:** Em muitos problemas de reconhecimento envolvendo padrões complexos é mais apropriado adotar uma perspectiva hierárquica, onde um padrão é visto como uma composição de simples sub-padrões. Os métodos estruturais-sintáticos usam a estrutura interna do padrão como um elemento de análise. Eles são baseados no fato de que um padrão, por exemplo, um objeto, pode ser descrito recursivamente a partir de formas simples (primitivas), através de sua

estrutura. A análise é realizada pela comparação de cada uma das estruturas próprias do objeto com classes referência, ou determinando se o exemplo pertence ou não a famílias de modelos referência, gerados a partir de cada classe.

- c) Redes Neurais: os elementos são identificados a partir de redes neurais artificiais previamente treinados com base em um conjunto de elementos representativos das classes que se deseja identificar. Sabe-se que redes neurais artificiais são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência, tentando simular o comportamento biológico das interações que ocorrem no cérebro.

3.3.Filtros para Imagens Digitais

Frequentemente ao se capturar uma imagem digital em um ambiente real que apresente diferentes fontes de luz diretas ou refletidas podem ocorrer imperfeições, distorções e interferências indesejadas que podem prejudicar o processo de análise da imagem. Com o objetivo de minimizar esses efeitos foram desenvolvidos diferentes tipos de filtros, cada qual com sua finalidade (MATTA, 2013).

A filtragem consiste na aplicação de técnicas de transformação (usando operadores, também conhecidos como máscaras) com o objetivo de corrigir, suavizar ou realçar determinadas características de uma imagem dentro de uma aplicação específica. A filtragem é realizada pixel a pixel, onde o novo nível de cinza de um ponto P qualquer depende do seu nível de cinza original e do de outros pontos considerados como vizinhança de P, além de um critério pré-determinado. Para a aplicação do filtro deve-se escolher um ponto de ancoragem, de onde partirá uma varredura por todos os pixels da imagem (GONZALEZ; WOODS, 2009; MATTA, 2013).

Na operação de filtragem deve-se calcular os pontos pertencentes à borda da imagem de modo diferente dos demais, já que estes não dispõem de todos os vizinhos. Isso é um problema da aplicação de máscaras, visto que independentemente de onde seja fixado o ponto de ancoragem, sempre irá existir pixels que não possuem vizinhos, já que normalmente as máscaras são apresentadas na forma quadrada ($N \times N$). Possíveis soluções são a duplicação das últimas linhas ou colunas próximas às bordas, se houver necessidade; cortar a imagem,

desconsiderando os pixels das bordas ou mesmo considerá-los nulos (pretos puros) (GONZALEZ; WOODS, 2009; MATTA, 2013).

Existem basicamente três tipos de classificação de filtros, baseado no modo como eles operam sobre uma imagem. Os métodos que trabalham no domínio espacial operam diretamente sobre a matriz de pixels que é a imagem digitalizada, normalmente utilizando operações de convolução com máscaras. Os métodos que atuam no domínio da frequência se baseiam na modificação da transformada de Fourier da imagem. Existem técnicas de filtragem que combinam ambas as abordagens. A seguir são apresentados alguns exemplos de filtros corriqueiros, que atuam em uma imagem como se fosse um conjunto de objetos (GONZALEZ; WOODS, 2009; MATTA, 2013).

3.3.1. Filtro Passa-baixa

Este filtro tem o objetivo de suavizar a imagem pela redução das variações nos níveis de cinza que dão a aparência de “serrilhado” nos patamares de intensidade. Assim, atenua-se as altas frequências, que correspondem às transições abruptas e, consequentemente, minimiza-se os ruídos. A ideia por trás do filtro de suavização é direta. Ao substituir o valor de cada pixel de uma imagem pela média dos níveis de intensidade da vizinhança definida pela máscara, o processo resulta em uma imagem com perda da nitidez, ou seja, com redução das transições “abruptas” nas intensidades (GONZALEZ; WOODS, 2009).

3.3.2. Filtro *Unsharp Masking*

O filtro visa acentuar os contornos da imagem, proporcionando um aumento de detalhe e nitidez, sempre que há um contorno entre duas áreas distintas. Podendo ser entre claros e escuros ou entre cores diferentes, especialmente entre pares de complementares. Consiste, basicamente, em subtrair uma versão não nítida (suavizada) de uma imagem da imagem original, sendo a resultante mais nítida que a original.

3.3.3. Filtro *Erode*

Este filtro visa remover pequenos detalhes irrelevantes em termos de tamanho. Ele provoca efeitos de erosão das partes claras da imagem (altos níveis de cinza), gerando imagens mais escuras. Além de reduzir as regiões brancas, ele provoca a suavização das linhas da imagem e suaviza seu contorno.

3.3.4. Filtro *Sharpen*

Filtro também usado para aumentar a nitidez da imagem, aumentando o contraste e acentuando detalhes. Ele substitui cada pixel pela média ponderada de seus vizinhos 8-conectados. Como consequência, pode aumentar os ruídos da imagem.

3.3.5. *Remove Outliers*

Substitui um pixel pela mediana dos pixels no entorno se ele se desviar da mediana por mais de um determinado valor (o limite). Útil para corrigir, por exemplo, pixels abruptos ou pixels inexistentes de uma imagem.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Cutt (1991) Propôs o emprego da análise de imagem como forma de classificar as telas de peneiras vibratórias relacionando a eficiência de separação com as características relacionadas à distribuição das aberturas na tela. O objetivo foi criar um método mais adequado para a classificação de telas, já que, devido à grande quantidade de fabricantes e tecnologias diferentes, a abordagem de contagem de *mesh* da tela nem sempre descreve de maneira adequada o potencial de separação destas.

Lu et al. (2008) estudaram o método iterativo numérico da bissecção e seu desempenho de convergência, que é usado para resolver a equação dos parâmetros-chave do ponto de entrada do alvo de perfuração dos poços de petróleo, sendo estes direcionais e horizontais, e forneceram fórmulas detalhadas para três tipos de curva: de intervalo de arco espacial, curva cilíndrica e curva natural. Analisaram, também, que tanto casos teóricos quanto práticos mostram que o método da bissecção é muito eficaz na obtenção da solução numérica do ponto de entrada do alvo.

Liao & Tarng (2009) desenvolveram um novo sistema online automático de inspeção ótica, usando processamento de imagem digital para medir a distribuição do tamanho de partículas grosseiras. Seus resultados experimentais mostraram que o sistema apresentou alta precisão e exatidão na medição da porcentagem de massa acumulada, número e distribuição do tamanho de partículas.

Guilherme et al. (2011) propuseram auxiliar o processo de perfuração de poços por meio da análise das imagens do cascalho em peneira vibratória. Assim, desenvolveram um sistema inovador de visão por computador composto por um estimador de volume de corte em tempo real, abordado pela regressão do vetor de suporte, sendo os pioneiros na área de análise de imagem no processo de perfuração de poços.

Ko & Shang (2011) caracterizaram a uniformidade da imagem baseado na captura de imagens de superfície de partículas de minério aleatoriamente desorganizadas. A distribuição do tamanho de partículas foi então investigada se aplicando o modelo base de redes neurais juntamente com a uniformidade de imagem obtida. O sensor proposto promoveu um modelo preditivo melhorado, podendo ser usado em medições em tempo real em operações industriais.

Da Matta et al. (2014) propuseram o desenvolvimento de um algoritmo de processamento de imagem capaz de realizar a caracterização e contagem automatizada dos detritos presentes

nos fluídos de perfuração de forma a permitir o aprimoramento e automação do processo de perfuração de poços de petróleo. Para isso, fizeram aplicações de técnicas de segmentação além de combinações com filtros morfológicos que permitiram identificar e classificar as partículas presentes no fluído de perfuração conforme suas dimensões.

Silva *et al.* (2014) desenvolveram uma análise dinâmica do processo de separação em peneiras vibratórias, através de modelos matemáticos simplificados obtidos a partir de dados experimentais. Visando um entendimento básico sobre o comportamento dinâmico do sistema em estudo, o modelo do protótipo da peneira vibratória utilizada foi desenvolvido com base na fundamentação teórica correspondente à visão sistêmica da interrelação entre as entradas e as saídas do processo, com base em modelos aproximados correspondentes a sistemas de primeira ordem com tempo morto.

Guerreiro (2015) avaliou os efeitos da abertura de tela de peneira vibratória, a concentração volumétrica de sólidos na alimentação e a vibração (força-g) da peneira sobre o teor de umidade dos sólidos retidos, a eficiência granulométrica global de separação e o diâmetro de corte de cada tela utilizando uma suspensão de rocha fosfática diluída em água e goma xantana. Seus resultados foram importantes para se compreender os principais aspectos operacionais na separação sólido-líquido utilizando peneiras vibratórias, principalmente o comportamento do protótipo utilizado no presente trabalho.

Vargas *et al.* (2015) investigaram experimentalmente o emprego de malha de controle do adimensional referente à força-g aplicado a protótipo de peneira vibratória. Foi definida e montada uma malha de controle do adimensional de vibração (ou força-g), tendo como variável de processo manipulada a rotação imposta aos motovibradores instalados na peneira vibratória. O principal benefício que visavam obter com a aplicação do modelo no processo relacionava-se ao melhor controle da operação, minimizando a perda de fluido de perfuração e maximizando a vida útil da tela da peneira.

Guerreiro *et al.* (2015) avaliaram os efeitos das variáveis de processo, como a proporção de partículas maiores que a abertura da tela na alimentação (partículas grossas), a taxa média de alimentação e a força-g imposta à peneira sobre a eficiência de separação de partículas grossas da operação de peneiramento em escala piloto. Os resultados foram analisados estatisticamente e um ajuste não-linear foi realizado para a estimativa dos efeitos das variáveis sobre a eficiência. A partir disso eles conseguiram verificar que a taxa média de alimentação

não teve efeito significativo e a proporção de partículas grossas na alimentação e a força-g influenciaram positivamente o aumento da resposta avaliada.

Khojasteh et al. (2015) focaram seus estudos na análise de imagens coloridas e agrupamentos *fuzzy* para extrair dados relevantes das imagens sobre os cascalhos do fluido de perfuração. Foi utilizado um vetor suporte e diferentes funções *kernel* para classificar as amostras em *keybeds*. Além disso, devido às variações das colorações dos cascalhos de diferentes poços de perfuração, o estudo propôs a análise de textura para classificação em *keybeds*. Por fim, o método se mostrou extremamente eficiente, com aproximadamente 95% de precisão.

Guerreiro et al. (2016) avaliaram a melhor combinação possível entre as variáveis de processo: tamanho da abertura da tela, concentração volumétrica de sólidos na alimentação e força-g. Os resultados obtidos em protótipo de peneira vibratória foram analisados estatisticamente e as correlações para cada resposta foram consideradas adequadas. Os valores mais altos de eficiência de separação foram encontrados com os valores mais baixos do diâmetro do corte, o que é considerado desejável em termos de separação. Eles também desenvolveram uma otimização multi-objetivo na faixa experimental, encontrando o ponto ideal para o teor de umidade e a eficiência de separação.

Freitas et al. (2016) caracterizaram o comportamento dinâmico da peneira e relacionaram a umidade dos sólidos retidos com as principais variáveis de operação através do modelo estático e dinâmico identificados. O modelo estático relacionava a umidade dos sólidos retidos com a concentração de sólidos alimentados e a força-g. Já o modelo dinâmico foi obtido por uma perturbação degrau na rotação dos motovibradores e relacionou a força-g com a rotação dos mesmos. Propuseram e simularam, então, uma estratégia de controle capaz de avaliar qual era o melhor ponto de operação.

Silva et al. (2016) conduziram uma investigação experimental sobre o emprego de malha de controle do adimensional força-g aplicado a protótipo de peneira vibratória. A malha de controle da força-g foi configurada na base de dados do LabView®, tendo sido escolhida como variável de processo manipulada a rotação dos motores vibratórios instalados no protótipo da peneira. A estratégia de controle contemplava o condicionamento e o tratamento do sinal provenientes do acelerômetro, sendo escolhido o modo de controle proporcional e integral para a realização dos testes de avaliação. Foram realizados experimentos para validar o funcionamento da malha de controle com um único valor de força-g. Os resultados obtidos

sugeriram um funcionamento adequado e coerente da malha de controle proposta com um erro de regime inferior a 2% para alterações impostas no valor do set-point.

Abhik *et al.* (2017) desenvolveram um modelo de massa que converte a distribuição de tamanho obtida por imagem digital em distribuição de massa, tornando-se facilmente comparável aos dados mecânicos de peneiramento. O método proposto fornece uma maneira precisa e eficiente de tempo no processo de distribuição mássica do tamanho de partículas usando o processamento de imagem digital.

Lagos-Avid & Bonilla (2017) desenvolveram um modelo para prever a distribuição do tamanho de partículas de solos erodidos. Usando dados recolhidos em mais de 29 eventos, uma rede artificial neural foi desenvolvida, calibrada e comparada com outros 3 modelos empíricos, provando ter um melhor desempenho na predição que os modelos testados.

Facco *et al.* (2017) estudaram como desenvolver um sistema de visão artificial rápido, confiável e não invasivo para se estimar quantitativamente a distribuição do tamanho de partículas de produtos granulares. O sistema, baseado em análise multivariável e de multirresolução, utiliza imagens digitais do material úmido para extrair informações quantitativas das faixas dos tamanhos de partículas que aparecem em cada imagem, independente do formato da distribuição das mesmas.

Santiago *et al.* (2017) abordaram a questão de como a análise de imagem pode ser utilizada no monitoramento e na avaliação do tamanho e da quantidade de conglomerados de partículas e do comportamento da suspensão mantida sobre a tela de separação da peneira vibratória. As imagens foram binarizadas e filtros foram aplicados de modo a permitir uma melhor caracterização dos conglomerados. Concluíram que o tempo de resposta do software livre utilizado dependia do número e combinação de filtros utilizados, que também podem ser desenvolvidos de acordo com as necessidades de análise e particularidades do processo, mas que é um método eficiente para a atividade proposta.

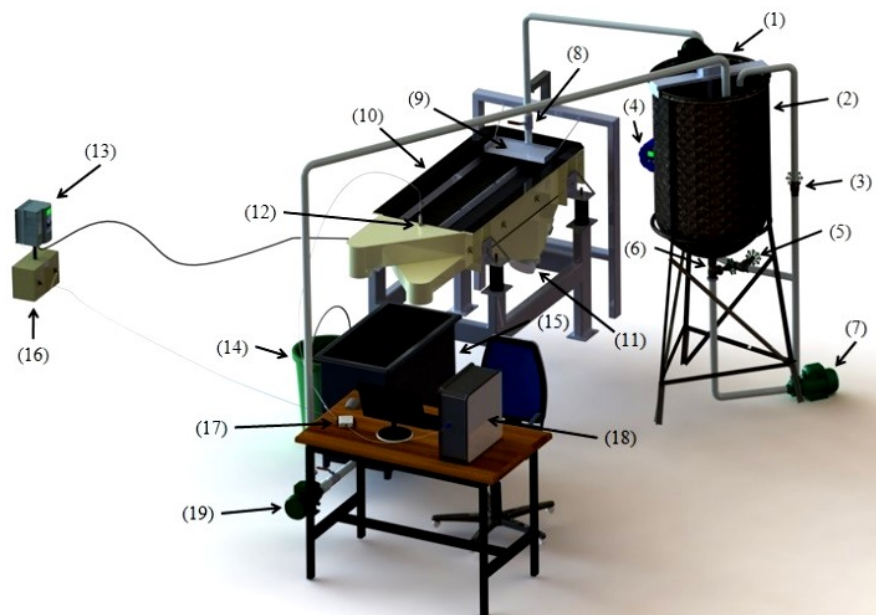
5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Materiais Utilizados

Para a realização do presente trabalho, foram utilizados os dados e experimentos conduzidos por Barbosa *et al.* (2017). Para tal, foi empregada a unidade experimental ilustrada pela Figura 10. Essa bancada é formada por uma peneira vibratória em escala piloto, equipada com dois motovibradores, uma tela de separação de 175 *mesh* e um sistema de controle de força-g. Esse sistema é semelhante ao utilizado por Guerreiro (2015) e Freitas (2017). Com a finalidade de se obter uma melhor agitação e uma alimentação homogênea, equipou-se o tanque de alimentação de 300 litros com um sistema de agitação mecânica e uma tubulação de recirculação. Quatro válvulas controlam a recirculação e redirecionam parte da mistura para alimentar a peneira. Um medidor de vazão tipo *Coriollis* modelo Contech TCM28K mede a vazão mássica de mistura alimentada na peneira. Uma calha instalada ao fim dessa tubulação permite uma melhor distribuição da alimentação sobre a tela.

Um tanque de 200 litros foi utilizado para coleta do fluido passante pela peneira. Esse tanque está ligado a uma tubulação que realimenta o tanque de alimentação, entretanto, durante os experimentos, a bomba centrífuga de realimentação permanece desligada para não haver diluição do material alimentado. Para a coleta do material sólido retido, utilizou-se um tanque com aproximadamente 80 litros. Esse tanque se encontra posicionado sobre uma balança, UDC CO 30/5 sendo possível acompanhar a quantidade de sólido retido.

Figura 10 - Ilustração da unidade experimental utilizada



A Tabela 1, a seguir, apresenta os equipamentos e instrumentos utilizados, bem como os ranges de cada um. Vale lembrar que foi preparada uma suspensão de 300 litros de água com areia padronizada (densidade de 2,3 kg/L e com granulometria final variando entre 0,15 e 1,20mm e goma xantana na concentração mássica de 0,1%) para a alimentação da peneira e, para a coleta de imagens, foram efetuadas gravações realizadas com celular LG X Power com 30 frames/segundo, resolução full HD (1920X1080 p) posicionado logo acima da peneira vibratória. Para uma melhor visão da dinâmica ocorrida sobre sua tela e a análise das mesmas foi realizada no *software* ImageJ. A escolha do software deve-se ao fato do mesmo ser livre e de intuitiva utilização.

Tabela 1 – Equipamentos e Instrumentos da bancada experimental.

Número	Equipamento/Instrumento	Range/Span
(1)	Agitador	
(2)	Tanque de mistura de alimentação	500 L
(3)	Válvula gaveta de recirculação	0 a 100 % abertura
(4)	Medidor de vazão Coriolis	0 a 28800 kg/h
(5)	Válvula gaveta de alimentação da peneira	0 a 100 % abertura
(6)	Válvula gaveta de saída do tanque de alimentação	0 a 100 % abertura
(7)	Bomba de recirculação/alimentação	2 cv
(8)	Válvula esfera de alimentação da peneira	0 a 100 % abertura
(9)	Calha de distribuição da alimentação sobre a tela da peneira	-
(10)	Peneira vibratória	-
(11)	Motores vibratórios	3/4 cv
(12)	Sensor piezoelétrico	0 a 10 g rms
(13)	Inversor de frequência	4 a 20 mAcc
(14)	Tanque de coleta do sólido retido	30 L
(15)	Tanque de coleta do fluido passante	200 L
(16)	Quadro de carga equipamentos e instrumentos da peneira	-
(17)	Placa de aquisição de dados	-
(18)	Computador de operação da peneira	-
(19)	Bomba de realimentação do tanque de mistura	1½ cv

5.2. Metodologia Empregada

Os ensaios foram realizados em um planejamento 2^k , em que $k=4$, visto que seriam avaliadas a força-g aplicada (X1), a concentração volumétrica de sólidos (X2), a vazão de alimentação (X3) e a inclinação (X4). Para fins de praticidade na apresentação dos resultados, os dados foram apresentados no formato 2^k , em que -1 representa o menor valor utilizado e +1 o maior valor utilizado. Logo, para a força-g aplicada tem-se os valores de 3 e 5, a concentração volumétrica de sólidos foi avaliada em 2 e 5%, a inclinação da peneira esteve operando tanto na posição descendente quanto ascendente de 2° com a horizontal, enquanto a vazão de alimentação foi verificada para os valores de 25 e 50kg/min.

Após realizadas as gravações dos experimentos foi efetuada a análise de imagem pelo método da binarização de imagens. Os vídeos foram divididos em frames (imagens estáticas) para a escolha do frame mais adequado para o estudo, ou seja, aquele que mostrava com maior clareza o material granular sobre a tela da peneira. Em seguida ajustou-se o contraste, gama e brilho da imagem para melhorar a diferenciação das partículas sólidas, tela de peneiramento e material líquido.

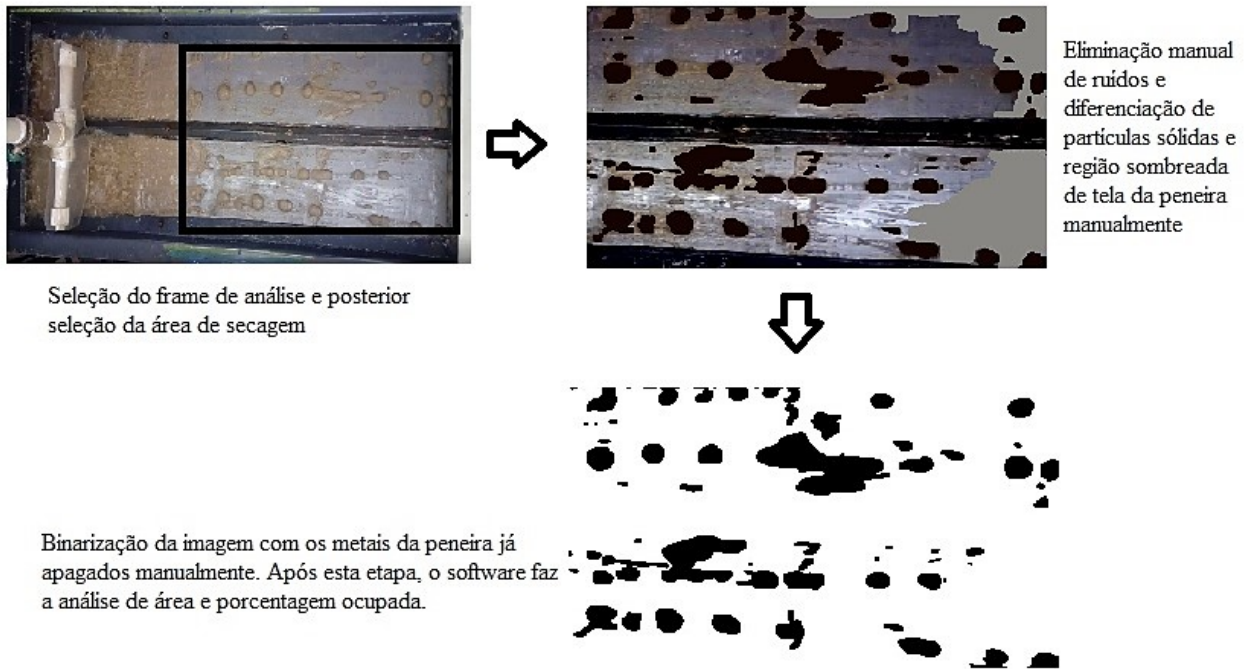
O próximo passo consistiu na conversão do frame para tons de cinza. Para isso foram utilizados histogramas em *greyscale* aplicados pixel por pixel. Fez-se a seleção da região de interesse da imagem e a mesma foi recortada. Logo após escolheu-se o *threshold* que seria utilizado, o mesmo pode ser local (apenas uma região da imagem) ou comum (para toda a imagem). Dessa forma o frame foi transformado em níveis de branco e preto puros, visto que todos os pixels acima do *threshold* são transformados em brancos puros e todos abaixo, em pretos puros. Poderiam ser aplicados alguns filtros, como os já citados, para a eliminação de pixels isolados e definição de bordas.

Em muitos casos, mesmo depois da binarização e aplicação de filtros, não houve grande diferenciação entre os conglomerados formados e a tela da peneira vibratória, sendo necessária uma intervenção manual na imagem antes de a mesma ser transformada em escalas de cinza. Diferenciou-se, assim, à mão livre, o que é tela e o que é material particulado. Aplicou-se a binarização e, em seguida, o próprio software foi capaz de fazer a análise, indicando a quantidade de conglomerados e porcentagem de área ocupada. A Figura 11, a seguir, ilustra o passo-a-passo já descrito.

Com esses parâmetros, buscou-se investigar de forma qualitativa a influência de algumas variáveis da peneira vibratória, como a vazão de alimentação, a concentração do fluido utilizado e a força-g aplicada.

Sabe-se que a análise qualitativa do material granular sobre a tela da peneira vibratória torna-se essencial para o entendimento do desempenho e dinâmica da mesma. Isto porque uma área de secagem muito pequena ou muito extensa, mas com grande carga de material pastoso, pode indicar uma menor remoção do teor de umidade e, conseqüentemente, menor eficiência de peneiramento.

Figura 11 – Etapas do procedimento experimental



6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a edição e análise de todos os 16 experimentos propostos, foi produzida a Tabela 2 com os resultados obtidos para a porcentagem de área de tela ocupada pelos sólidos na região de secagem, o desvio padrão dos resultados e o valor médio da área de secagem, visto que para cada experimento foi feita uma análise em triplicata. Vale ressaltar que os resultados obtidos foram avaliados em base seca.

Tabela 2 - Resultados obtidos após a análise.

EXP	Fg X ₁	Cv X ₂	Vazão X ₃	Inclinação X ₄	Umidade	Desvio padrão da umidade	Área (%)	Desvio padrão	Área de Secagem (cm ²)
1	-1	-1	-1	-1	0,3848	0,0617	65,7840	-	511,6470
2	1	-1	-1	-1	0,2465	0,0061	64,1373	6,8096	1661,1630
3	-1	1	-1	-1	0,2267	0,0027	18,6803	1,9985	2740,0500
4	1	1	-1	-1	0,2329	0,0012	13,0513	1,7200	2634,3030
5	-1	-1	1	-1	0,8016	0,0125	-	-	-
6	1	-1	1	-1	0,2955	0,0022	53,0343	8,5459	1230,0310
7	-1	1	1	-1	0,2374	0,0003	45,8783	6,7645	2369,3130
8	1	1	1	-1	0,2330	0,0050	19,4340	4,8863	2438,6930
9	-1	-1	-1	1	0,2200	0,0052	50,4213	0,5417	2205,8040
10	1	-1	-1	1	0,2427	0,0057	25,9063	4,4195	2675,9820
11	-1	1	-1	1	0,2164	0,0060	25,1590	2,7391	2707,8880
12	1	1	-1	1	0,2302	0,0023	11,5597	1,0854	2626,7690
13	-1	-1	1	1	0,2164	0,0041	54,1973	3,9412	2538,3490
14	1	-1	1	1	0,2483	0,0023	32,4403	4,9715	2567,7610
15	-1	1	1	1	0,1992	0,0023	62,0083	4,3406	2712,7270
16	1	1	1	1	0,2159	0,0050	17,1150	1,0034	2814,4160

A análise foi dividida em duas etapas: a primeira com a peneira inclinada com a horizontal de forma descendente em -2°, e a segunda com a mesma de forma ascendente com a horizontal com +2° de inclinação. Dessa forma, analisando os dados apresentados na Tabela 2, pode-se inferir que foram analisados separadamente os experimentos de 1 a 8 e, posteriormente, os experimentos de 9 a 16. As Figuras 12 e 13 apresentam os dados obtidos para os experimentos de 1 a 8 para o teor de umidade e área de secagem, respectivamente.

Figura 12 – Gráfico do Teor de Umidade para experimentos descendentes.

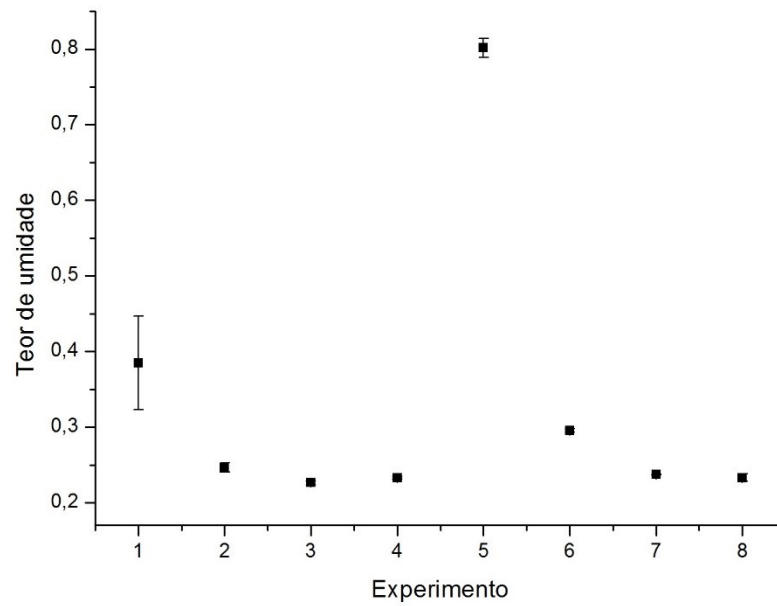
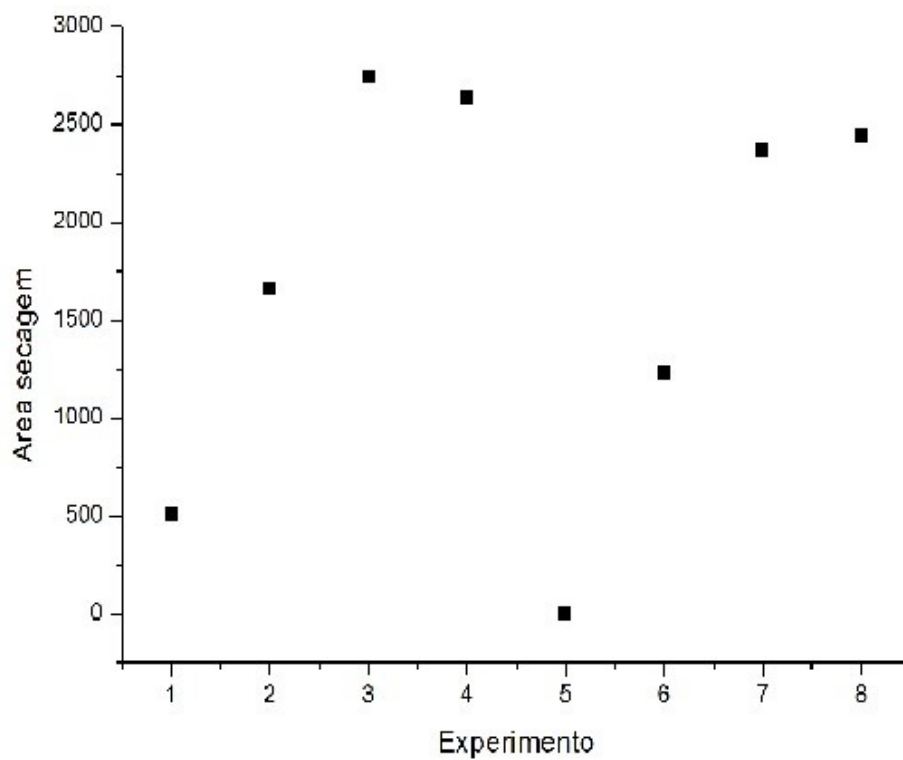


Figura 13 – Gráfico da Área de Secagem para experimentos descendentes.



Pela análise dos gráficos das Figura 12 e 13 e da Tabela 2, pode-se perceber que comparando os experimentos 1 e 2, que possuem uma mesma inclinação (-2°) ($X_4=-1$), mesma vazão

(25kg/min) ($X_3=-1$) e concentração volumétrica (3%) ($X_2=-1$), o aumento da força-g provocou uma redução da umidade dos sólidos retidos. O aumento de força-g, neste caso, provoca maior separação sólido-líquido do material, ao passo que houve uma leve redução da porcentagem de área ocupada. Tal fato pode parecer estranho, mas, ao ser comparado às áreas de secagem dos experimentos 1 e 2, fica claro que a área de secagem do segundo é muito maior que a do primeiro, mesmo que a porcentagem seja levemente inferior. O experimento 1 não apresenta desvio padrão visto que não foi possível de ser realizado em triplicata. Sua área de secagem só se apresentou visível nos segundos finais do experimento, uma vez que toda a tela estava ocupada pela suspensão e não apenas por sólidos ou conglomerados.

Ao comparar os pares de experimentos 1 com 2 e 3 com 4, sendo que nesse último par houve um aumento de concentração volumétrica, nota-se que com um aumento da força-g o teor de umidade para as mesmas condições aumenta, diferindo das condições em que a concentração era menor. Além disso, a porcentagem de área ocupada também reduz, indicando maior formação de conglomerados em vez de dispersão de sólidos retidos sobre a tela. Pode-se conferir, também, que para os experimentos 3 e 4, a área de secagem foi próxima uma da outra. O fato da umidade aumentar pode ser justificado pelo fato da força-g provocar um aumento da velocidade de transporte de sólidos sobre a tela, reduzindo seu tempo de residência e, conseqüentemente, sua secagem.

Fazendo um comparativo entre os experimentos 1 e 3, em que a força-g, a vazão e a inclinação foram mantidas constantes, apenas se aumentou a concentração volumétrica, nota-se uma redução do teor de umidade, bem como de porcentagem de área ocupada, ao passo que a área de secagem aumenta. O mesmo pode ser verificado para os experimentos 2 e 4. Isso pode ser justificado pelo fato de que com o aumento da concentração volumétrica de sólidos, torna-se mais fácil a formação de conglomerados, aumentando a área de secagem e reduzindo a quantidade de material pastoso sobre a tela.

Novamente observando os dados apresentados nas Figuras 12 e 13 e a Tabela 2, observa-se que para o experimento 5, não houve porcentagem de área de tela ocupada por sólidos. Esse fato é justificado pela inundação da tela da peneira, que ficou inteiramente preenchida pela suspensão e não havia área de secagem. Porém, para um aumento de força-g com a mesma concentração, inclinação e vazão (experimento 6), a umidade dos sólidos coletados foi reduzida drasticamente, comprovando, mais uma vez, a influência dessa variável sobre os resultados obtidos. Para uma concentração volumétrica maior (experimentos 7 e 8), nota-se que o aumento

de força-g provoca pouca alteração no teor de umidade, mas grande variação de porcentagem de área preenchida para áreas de secagem muito próximas, devido a uma maior velocidade de transporte, que diminui o tempo de residência na região de secagem e, consequentemente, a área de tela ocupada.

Já ao fazer a comparação entre os experimentos 4 e 8, em que houve apenas alteração da vazão de alimentação, percebe-se que o teor de umidade não varia, já a porcentagem de área ocupada aumenta e a área de secagem diminui, sendo estas variações pequenas, evidenciando a pouca influência da vazão para esse caso. O mesmo pode ser verificado para os experimentos 2 e 6, cuja concentração volumétrica é menor. Já para os experimentos 3 e 7, nota-se que com uma maior concentração volumétrica e vazão, mas com menor força-g, a porcentagem de área ocupada tem uma tendência de ser maior (experimento 7), quando comparada a uma vazão menor (experimento 3). Isto se deve ao ato de mais mistura estar sendo alimentada na peneira. Além disso, a área de secagem também se mostra menor, o que pode ser justificado pelo aumento da vazão no experimento 7 em relação ao 3, que aumenta a região de inundação, diminuindo, assim, a de secagem.

Já para a peneira inclinada de forma ascendente em $+2^\circ$, foram plotados os gráficos das Figuras 14 e 15, a seguir. Da mesma forma que os dados anteriores, foram plotados os gráficos dos experimentos de 9 a 16 para o teor de umidade e área de secagem, respectivamente.

Figura 14 – Gráfico do teor de umidade para os experimentos ascendentes.

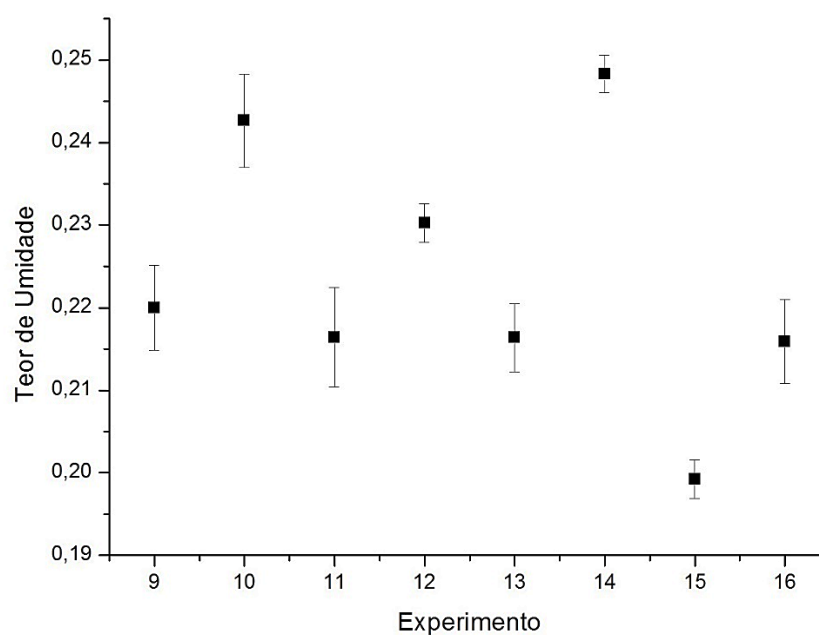
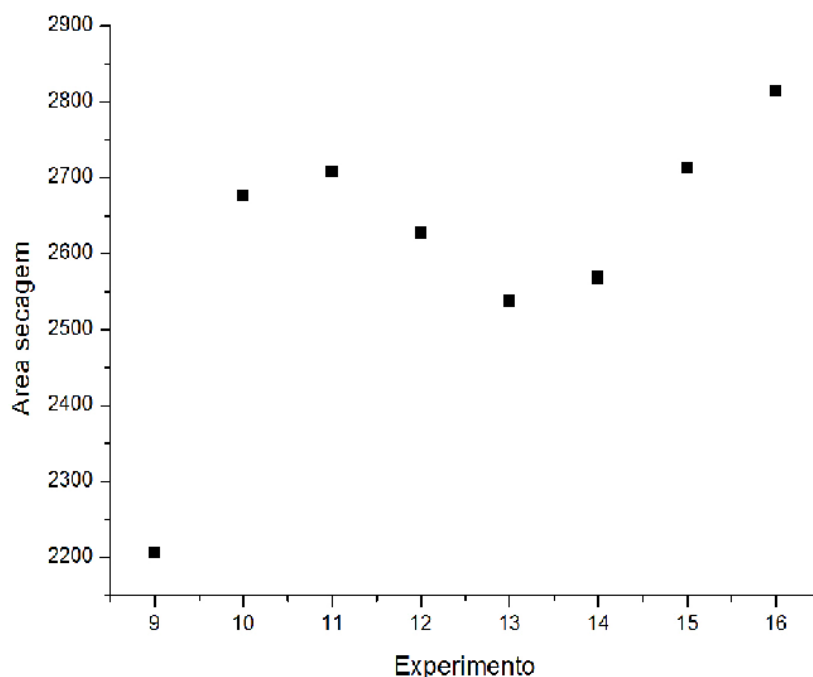


Figura 15 – Gráfico da Área de secagem para os experimentos ascendentes.



Pela análise gráfica e da Tabela 2, pode-se inferir que com o aumento da força-g entre os experimentos 9 e 10, houve aumento do teor de umidade e redução da porcentagem de área ocupada. Como os experimentos foram realizados na posição ascendente, o aumento da força-g pode ter provocado melhor transporte material, além de maior formação de conglomerados, que pôde ser verificado pelas imagens analisadas. Logo, houve menor dispersão do material sólido sobre a tela e os conglomerados percorriam a peneira com maior velocidade, tendo menor tempo de residência e, conseqüentemente, maior teor de umidade. Para os experimentos 11 e 12, verificou-se a mesma tendência dos anteriores, apesar de a concentração ter sido maior. A mesma tendência pôde ser verificada para os experimentos 13 e 14, e 15 e 16.

Já analisando para a mesma inclinação, força-g e vazão de alimentação, para um aumento de concentração volumétrica, o teor de umidade tende a reduzir, bem como a porcentagem de área ocupada, efeito observado para a comparação entre os experimentos 9 e 11, 10 e 12, assim como 14 e 16. Isso se deve, novamente, ao fato da maior facilidade de formação de conglomerados que, além de ocuparem menor área, secam mais rápido devido ao caminho ascendente que deve ser percorrido. Porém, nos experimentos 13 e 15, apesar do teor de umidade reduzir, verifica-se um aumento da porcentagem de área ocupada. Além disso, analisando as imagens, constata-se que houve grande dispersão do material sólido sobre a tela, mesmo o experimento 15 apresentando maior formação de conglomerados que o 13. Tal fato

pode ser justificado pelo menor valor de força-g utilizado, que com o aumento da concentração volumétrica provocou maior arraste de material sólido, mas não o suficiente para a dispersão do material sobre a tela, ocupando maior porcentagem de área.

Quando se mantém a força-g, a concentração volumétrica e a inclinação constantes, variando apenas a vazão, para os pares de experimentos 9 e 13, 10 e 14, assim como 12 e 16, verifica-se que com o aumento da mesma, o teor de umidade e a porcentagem de área ocupada por sólidos variam pouco. Ou seja, pouco se altera com o aumento de vazão para o caso da tela na posição ascendente. Já, no caso dos experimentos 11 e 15, a vazão menor provocou maior formação de conglomerados e, conseqüentemente, menor porcentagem de área ocupada, apesar do teor de umidade variar pouco quando comparado com os valores do experimento 15. A maior vazão, em conjunto com uma força-g mais baixa e maiores concentrações, pode ter dificultado a formação dos conglomerados de material sólido retido, ficando este disperso sobre a tela.

Por fim, fazendo o comparativo entre os experimentos ascendentes e os descendentes, ou seja, mantendo todas as outras variáveis constantes e apenas alterando a inclinação da peneira, percebe-se que para a posição ascendente tem-se uma tendência geral de redução do teor de umidade, porcentagem de área ocupada por sólidos e aumento da área de secagem. As Figuras 16 e 17 demonstram as áreas de secagem de cada experimento, enquanto a 18 mostra as mesmas áreas de secagem após ação manual e binarização.

Figura 16 - Áreas de secagem dos experimentos (a).

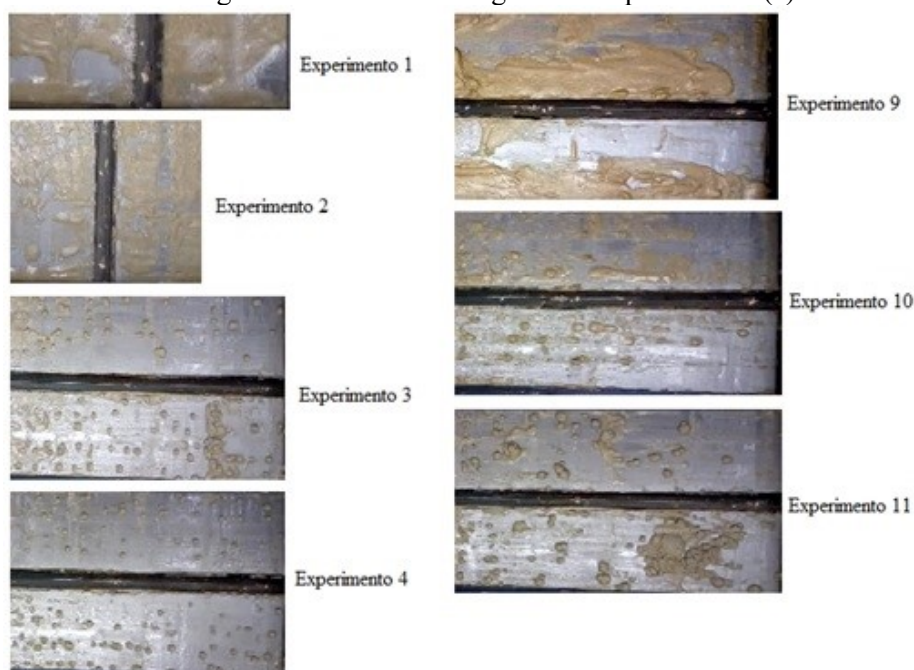


Figura 17 - Áreas de secagem dos experimentos (b).



Figura 18 - Áreas de secagem dos experimentos binarizada (a).

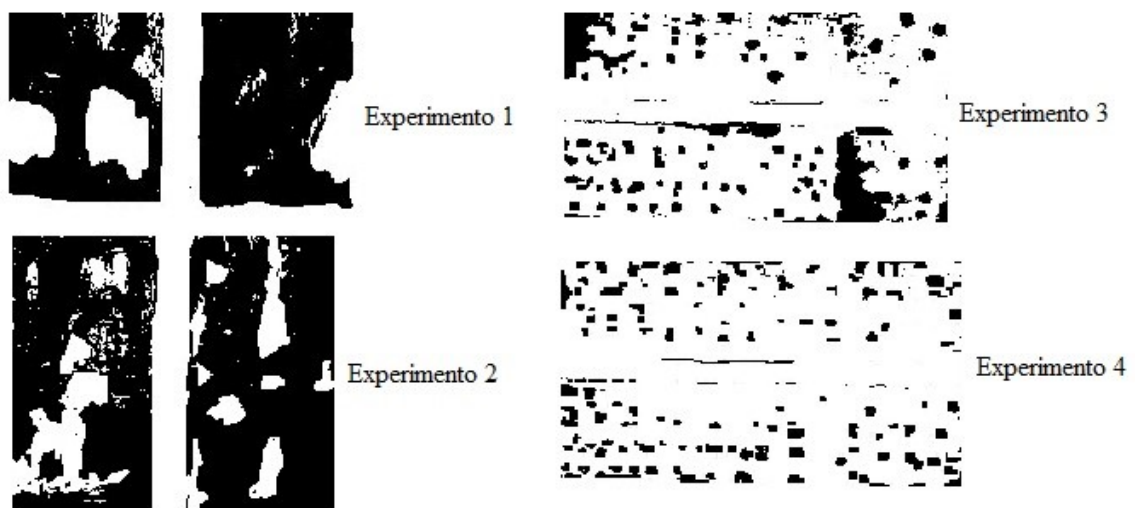
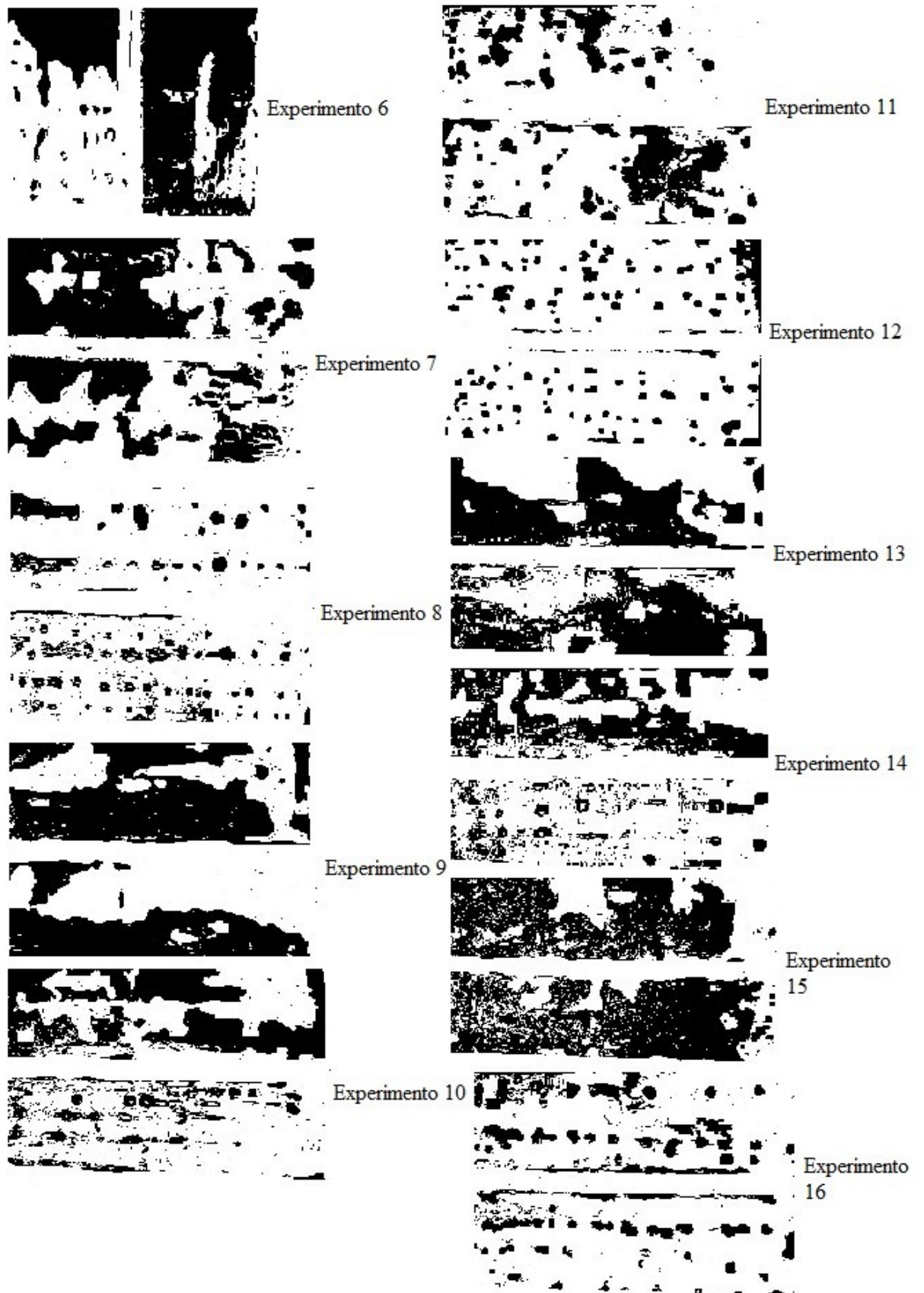


Figura 19 - Áreas de secagem dos experimentos binarizada (b).



7. CONCLUSÕES

Após todo o estudo sobre a perfuração de poços de petróleo e os conceitos fundamentais de imagem digital, análise e processamento, conclui-se que a utilização da análise de imagem no processo de peneiramento vibratório pode ser um campo de estudo promissor. Estando cada vez mais presente no dia a dia de diversas áreas, não apenas no campo da engenharia, mas também na geofísica, medicina, aerodinâmica entre outros, a análise de imagem mostra-se uma ferramenta nova, ainda pouco explorada no campo de peneiramento vibratório, com poucas publicações não apenas no Brasil, mas mundialmente. Porém, cada vez mais versátil, ela é capaz de atender a diversas necessidades e formas de utilização.

Ao ser aplicada nos experimentos de peneiramento vibratório, esta ferramenta mostrou-se perfeitamente aceitável para melhor compreensão da dinâmica ocorrida sobre a tela da peneira, bem como para uma análise qualitativa das variáveis que se queria estudar. Observou-se, igualmente, que mesmo não sendo explorada ao longo da graduação, a análise de imagem é um campo com diversas possibilidades de utilização e que deveria ser mais empregada por alunos e professores.

Restringindo o olhar para os diversos resultados obtidos, conclui-se que a força-g é a variável que mais influencia na dinâmica ocorrida sobre a tela da peneira, tanto por facilitar a formação de conglomerados quanto por facilitar o arraste e velocidade de transporte do material sólido sobre a mesma, que em maiores concentrações volumétricas provoca um aumento do teor de umidade. Conclui-se, também, em linhas gerais, que a inclinação ascendente de $+2^\circ$ provoca um aumento no tamanho da área de secagem, visto que boa parte da suspensão forma uma piscina de líquido na parte descendente da tela da peneira.

É importante ressaltar, ainda que, tanto para os experimentos realizados de forma descendente quanto para ascendente, um aumento da concentração volumétrica provoca uma redução no teor de umidade. Isso pode ser devido à maior facilidade dos sólidos de formação de conglomerados. Além disso, verifica-se que com esse aumento há uma tendência de redução de porcentagem de área de tela ocupada, exatamente pelo mesmo motivo. Este comportamento pode ser verificado com o aumento da força-g, quando comparado com as mesmas condições.

Já o aumento de vazão de alimentação provoca efeitos contrários nas partes descendentes e ascendentes. Para a peneira com inclinação de -2° com a horizontal, o aumento de vazão tende a provocar um arraste de material e, conseqüentemente, um aumento do teor de umidade. Além disso, provoca um aumento de porcentagem de tela ocupada, tendo em vista a maior presença

de material sólido disperso sobre a tela, em vez de conglomerados. Um claro exemplo desse aumento de vazão foi o experimento 5, que para o menor valor de força-g e concentração volumétrica, verificou-se inundação da tela da peneira.

Por fim, conclui-se que as variáveis estudadas provocam grande influência sobre a dinâmica ocorrida na tela da peneira, principalmente quando se compara os efeitos combinados de cada uma. Em termos gerais, pela análise qualitativa dos dados, pode-se inferir que a vazão de alimentação causa pouca influência quando comparada com as outras variáveis. Já a posição ascendente resultou em teores de umidade melhores, mas, para uma maior eficiência de funcionamento da peneira, é necessária a análise das variáveis de forma combinada.

Além disso, o desenvolvimento deste tipo de análise é importante uma vez que o consumo energético e a vida útil da tela de peneiramento estão relacionados à quantidade de material sólido sobre a peneira, ou seja, quanto maior a área de secagem, menor a sobrecarga. Sabe-se que quanto maior a carga sobre a tela, maior o consumo energético, pois os motovibradores têm que trabalhar em rotações maiores para manter o set-point da força-g no valor desejado, e maior o desgaste da tela, já que uma massa maior força mais a tela, diminuindo sua vida útil.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABHIK, M. DEBASHISH, C.; KOUSIK, B.; ARPAN, H. Development of a mass model in estimating weight-wise particle size distribution using digital image processing. **International Journal of Minig Science and Technology**, p.435-443, 2017.

ADOBE. Guia do Usuário. Noções básicas sobre imagens e cores, 2016. Disponível em: <<https://helpx.adobe.com/br/photoshop/using/converting-color-modes.html>>. Acesso em: 6 de setembro de 2017.

ALBUQUERQUE, M. P.; ALBUQUERQUE, M. P. **Processamento de Imagens: Métodos e Análises**. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, 2000.

ALMEIDA, E. L. F. D. **Dinâmica Tecnológica das Indústrias Energéticas**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2002.

American Society Mechanical Engineers (ASME) Shale Shaker Committee. **Drilling Fluid Processing Handbook**. Elsevier, 2005.

ARAÚJO, C. W. **Fundamentos de Processamento de Imagens**, 2010. Disponível em: <<http://www.inf.ufrgs.br/~cwaraujo/inf01046/trabalho1.html>>. Acesso em: 5 de setembro de 2017.

BARBOSA, V. P.; MENEZES, A. L.; SANTIAGO, T. S. A.; GEDRAITE, R.; ATAÍDE, C. H. **Análise da influência de variáveis sobre a área de tela ocupada por sólidos em região de secagem em processo de peneiramento vibratório**. In: Anais do XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP 2017). 22 a 25 de outubro de 2017, Maringá, PR.

BEECKMANS, J. M. *et al.* Performance Characteristics of a Probability Screening Machine. **Powder Technology**, p. 249-256, 1985.

CUTT, A. R. **Shaker screen characterization through image analysis**. Society of Petroleum Engineers, 1991.

DORRY, K. E. **Effect of constant-g control on shale shaker performance**. In: American association of drilling engineers fluids conference and exhibition. American Association of Drilling Engineers, Houston, 2010.

FACCO, P.; SANTOMASO, A. C.; BAROLO, M. Artificial vision system for particle size characterization from bulk materials. **Chemical Engineering Science**, p. 246-257, 2017.

FILHO, O. M.; NETO H. V. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999.

FOWLER, R. T.; LIM, S. C. The Influence of Various Factors upon the Effectiveness of Separation of a Finely Divided Solid by a Vibrating Screen. **Chemical Engineering Science**, 1959.

FREITAS, M. S.; GUERREIRO, F. S.; BARBOSA, V. P.; ATAÍDE, C. H.; GEDRAITE, R. **Contribuição ao estudo experimental do comportamento dinâmico de peneira vibratória equipada com sistema de controle do adimensional força-g.** In: Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ 2016). 25 a 29 de setembro de 2016, Fortaleza, CE.

FREITAS, M. S. **Avaliação do comportamento dinâmico do peneiramento vibratório utilizando modelos identificados.** Universidade Federal de Uberlândia – Dissertação de Mestrado. Uberlândia, MG, 2017.

GALP ENERGIA. Perfuração. **Galp Energia**, 2011. Disponível em: <<http://www.galpenergia.com/PT/investidor/ConhecerGalpEnergia/Os-nossos-negocios/Exploracao-Producao/fundamentos-engenharia-petroleo/Paginas/Perfuracao.aspx>>. Acesso em: 20 novembro de 2017.

GONZALES, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento Digital de Imagens.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

GUERREIRO, F. S. **Dimensionamento e especificação técnica de equipamentos a serem instalados em unidade experimental de tratamento de fluido de perfuração automatizada.** Universidade Federal de Uberlândia - Projeto de Graduação em Engenharia Química. Uberlândia, MG, 2013. 40p.

GUERREIRO, F. S. **Estudo experimental do peneiramento vibratório em batelada de suspensão diluída de rocha fosfática: determinação do teor de umidade de material retido, eficiência granulométrica e diâmetro de corte.** Universidade Federal de Uberlândia - Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – Faculdade de Engenharia Química. Uberlândia, MG, 2015.

GUERREIRO, F. S.; BARBOSA, V. P.; GEDRAITE, R.; ATAÍDE, C. H. **Estudo de variáveis que afetam a umidade residual e a eficiência de separação em peneira vibratória.** In: Anais do VI Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás (ENAHPE 2015). 10 a 13 de agosto de 2015, Rio Quente, GO.

GUERREIRO, F. S.; GEDRAITE, R.; ATAÍDE, C. H. (2016). Residual moisture content and separation efficiency optimization in pilot-scale vibrating screen. **Powder Technology**, p. 301 – 307, 2016.

GUILHERME, I. R.; MARANA, N. A.; PAPA, J. P.; CHIACHIA, G.; AFONSO, L. C. S.; MIURA, K.; FERREIRA, M. V. D. TORRES, F. Petroleum well drilling monitoring through citting imagem analysis and artificial intelligence techniques. **Engineering Applications of Artificial Intelligence.** Science Direct, p. 201-207, 2011.

KO, Y.; SHANG, H. A neural network-based soft sensor for particle size distribution using image analysis. **Powder Technology**, p. 359-366, 2011.

KHOJASTEH, P.; AHMADYFARD, A.; TOKHMECHI, B.; MIRMAHDAVI, S. A. Automatic detection of formations using images of oil well drilling cuttings. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, p. 67-74, 2015.

LAGOS-AVID, M.; BONILLA, C. A. Predicting the particle size distribution of eroded sediment using artificial neural networks. **Science of the Total Environment**, p. 833-839, 2017.

LESCHONSKI, K. Sieve analysis, the Cinderella of particle size analysis methods? **Powder Technology**, p. 115-124, 1979.

LIAO, C. W.; TARNG, Y. S. On-line automatic optical inspection system for coarse particle size distribution. **Powder Technology**, p. 508-513, 2009.

LIMA, H. R. P. **Fundamentos de Perfuração**. Apostila do curso de formação de engenheiros de petróleo da Petrobras, Centro de Desenvolvimento de Recursos Humanos Norte-Nordeste, Salvador, BA, 2001. p.1-14 e 159-166.

LIMA, R. WORDRESS. **Resolução de uma imagem, DPI**, 2010. Disponível em: <<https://rauellima16.wordpress.com/2010/11/20/resolucao-de-uma-imagem-dpi/>>. Acesso em: 20 de novembro de 2017.

LIU, K. Some Factors Affecting Sieving Performance and Efficiency. **Powder Technology**, 2009.

LOBATO, F. S.; OLIVEIRA-LOPES, L. C.; GEDRAITE, R.; NEIRO, S. M. S.; MURATA, V. **Identificação de Modelos para Unidades de Tratamento de Fluido de Perfuração**. In: Anais do IV Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás (ENAHPE – 2011). 2011, Foz do Iguaçu, PR.

LU, G.; LI, X.; SHAN, J. Numerical calculation for the distance to target center in directional and horizontal wells. **Petroleum Exploration and Development**. Science Direct, 2008. 452-456p.

MAKINDE, O. A.; RAMATSETSE, B. I.; MPOFU, K. Review of vibrating screen development trends: Linking the past and the future in mining machinery industries. **Internal Journal of Mineral Processing**, p.17-22, 2015.

DA MATTA, E. N.; MARANHÃO, G. F. G.; ORTIZ, R. de S. L.; ASSIS, W. de O. GEDRAITE, R.; COELHO, A. D.; KUNIGK, L. **Caracterização de partículas em fluido utilizado na perfuração de poços de petróleo**. In: Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática. 20 a 24 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG.

DA MATTA, E. N.; ASSIS, W. de O.; GOMES, M. M.; BARBOSA, V. P.; GEDRAITE, R.; ATAÍDE, C. H. **Contribuição para o melhor aproveitamento de fluido de perfuração de poços de petróleo – uma abordagem utilizando processamento de imagem**. In: Anais do

XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP – 2015). 18 a 21 de outubro de 2015, São Carlos, SP.

MARIN, L.O. **Investigações sobre redes neurais artificiais para o reconhecimento de faces humanas na forma 3D**. Universidade Federal de Santa Catarina – Dissertação de Mestrado. Florianópolis, SC, 2003.

MATTA, E. N. **Caracterização das partículas de material sólido nas correntes de entrada e saída do fluido de perfuração de poços de petróleo fundamentada em processamento digital de imagens**. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2013.

PEREIRA, M. S. **Caracterização de cascalho e lama de perfuração ao longo do processo de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás**. Universidade Federal de Uberlândia – Dissertação de Mestrado. Uberlândia, MG, 2010.

PEREIRA, B. L. V. **Especificação técnica de sistema de controle de peneira instrumentada aplicada a unidades de tratamento de fluido de perfuração**. Universidade Federal de Uberlândia - Projeto de Graduação em Engenharia Química. Uberlândia, MG, 2013. 57p.

PETROBRAS. **Apostila de Controle de Sólidos: separação de sólidos na perfuração de poços**. 2008, 36p. (Material interno da PETROBRAS).

SCURI, A. E. **Fundamentos da Imagem Digital**. Rio de Janeiro: Tecgraf/ PUC- Rio, 1999.

SANTIAGO, T. S. A.; BARBOSA, V. P.; GEDRAITE, R.; ATAIDE, C. H. **Análise de imagem aplicada ao processo de separação sólido-líquido em peneira vibratória no processo de perfuração de poços de petróleo**. In: Anais do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica (XII COBEQ IC 2017). 16 a 19 de julho de 2017, São Carlos, SP.

SILVA, M. E. D.; SILVA, R. M.; GUERREIRO, F. S.; MORAIS, A. S. de; GEDRAITE, R. **Contribuição ao estudo do comportamento dinâmico de peneira vibratória utilizada em unidade de tratamento de fluido de perfuração**. In: Anais da XII Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia (UFU). 13 a 17 outubro de 2014, Uberlândia, MG.

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 (XXI JORNEQ 2016). 22 a 26 de agosto de 2016, Uberlândia, MG.

SILVA, R. M.; BARBOSA, V. P.; MENEZES, A. L.; GEDRAITE, R.; ATAIDE, C. H. (a) **Sintonia de controlador de vibração em protótipo de peneira vibratória usando o método da síntese direta**. In: Anais da XXII Jornada em Engenharia Química (XXIIJORNEQ 2017). 25 a 29 de setembro de 2017, Uberlândia, MG.

SILVA, R. M.; BARBOSA, V. P.; MENEZES, A. L.; GEDRAITE, R.; ATAIDE, C. H. (b) **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 COBEQ IC 2017). 16 a 19 de julho de 2017, São Carlos, SP.

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. 38p.

STANDISH, N. The kinetics of batch sieving. **Powder Technology**, p. 57-67, 1985.

STANDISH, N.*et al.* Study of the Effect of Operating Variables on the Efficiency of a Vibrating Screen. **Powder Technology**, 48, p. 161-172, 1986.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

TRUMIC, M., & MAGDALINOVIC, N. New Model of Screening Kinectics. **Minerals Engineering**, p. 42-49, 2011.

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.

YIN, Z.; ZHANG, H.; HAN, T. Simulation of particle flow on na elliptical vibrating screen using the discrete elemento method. **Powder Technology**, p.443-454, 2016.

ZHAO, L.; ZHAO, Y.; BAO, C.; HOU, Q.; YU, A. Laboratory-scale validation of a DEM modelo f screening processes with circular vibration. **Powder Technology**, p.269-277, 2016.